

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

RICARDO CAPIBERIBE NUNES

**UM ESTUDO HISTÓRICO-SOCIAL DAS CONTRIBUIÇÕES DE
HENRI POINCARÉ À TEORIA DA RELATIVIDADE: SUBSÍDIOS
PARA O ENSINO DE FÍSICA**

Campo Grande, MS

2020

RICARDO CAPIBERIBE NUNES

**UM ESTUDO HISTÓRICO-SOCIAL DAS CONTRIBUIÇÕES DE
HENRI POINCARÉ À TEORIA DA RELATIVIDADE: SUBSÍDIOS
PARA O ENSINO DE FÍSICA**

Dissertação apresentada ao programa de
pós-graduação em Ensino de Ciências da
Universidade Federal de Mato Grosso do
Sul, como requisito final para a obtenção do
título de Mestre em Ensino de Ciências.

Orientador: Profº. Drº. Wellington Pereira
de Queirós

Campo Grande, MS

2020

RICARDO CAPIBERIBE NUNES

**UM ESTUDO HISTÓRICO-SOCIAL DAS CONTRIBUIÇÕES DE
HENRI POINCARÉ À TEORIA DA RELATIVIDADE: SUBSÍDIOS
PARA O ENSINO DE FÍSICA**

Dissertação apresentada ao programa de
pós-graduação em Ensino de Ciências da
Universidade Federal de Mato Grosso do
Sul, como requisito final para a obtenção do
título de Mestre em Ensino de Ciências.

Campo Grande, MS, 20 de Maio de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA

Profº. Drº. Wellington Pereira de Queirós – Presidente da Banca
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Profª. Drª. Daniele Correia – Avaliadora Interna
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Profº. Drº. Ivã Gurgel – Avaliador Externo
Universidade de São Paulo

Aos meus dois Pais que habitam os Céus:

O Senhor Nosso Deus, Pai Celestial!

O Senhor Ricardo Sérgio, Pai Carnal!

Homenagem

Agradeço a Deus Todo-Poderoso que me concedeu a vida, a cognição e a teimosia, dádivas sem as quais esse trabalho seria irrealizável.

Agradeço ao Buda Gautama, o sábio, que revelou o maravilhoso Dharma e o caminho da sagrada luz que me permitiram dissipar o orgulho, a dúvida e medo, abrindo caminho para minha evolução.

Agradeço a minha família por terem me dado as duas coisas que um cientista precisa: amor e incentivo. Obrigado por nunca desistirem de mim e compartilharem as minhas ideias estranhas durante o almoço e até nos passeios. Posso dizer com toda certeza que tem muito mais de vocês nesse trabalho do que vocês podem imaginar.

Agradeço a minha família por terem me dado as duas coisas que um cientista precisa: amor e incentivo. Obrigado por nunca desistirem de mim e compartilharem as minhas ideias estranhas durante o almoço e até nos passeios. Posso dizer com toda certeza que tem muito mais de vocês nesse trabalho do que vocês podem imaginar.

Agradeço aos meus irmãos de Sangha: Anderson Tibana, André Oshiro e Carlos Salles, com quem aprendi o valor da amizade e a recitar e viver o mantra: *Unus Pro Omnibus, Omnes Pro Uno*.

Agradeço ao meu orientador Wellington Queirós, um dos homens mais sábios que tive o privilégio de conhecer, e que me orientou com sabedoria e espírito. Um verdadeiro mestre a quem devo a formação do meu espírito acadêmico.

Agradeço aos meus amados antigos mestres Moacir Lacerda, Alexandre Maciel e Paulão que me introduziram na relatividade e investiram na minha formação com a sua sabedoria, amizade e os melhores livros que já pude ler.

OZYMANDIAS

*Eu encontrei um viajante de uma terra antiga
que disse:—duas gigantescas pernas de pedra sem torso
erguem-se no deserto. Perto delas na areia,
meio afundada, jaz um rosto partido, cuja expressão
e lábios franzidos e escárnio de frieza no comando
dizem que seu escultor bem aquelas paixões leu
que ainda sobrevivem, estampadas nessas partes sem vida,
a mão que os zombava e o coração que os alimentava.
E no pedestal estas palavras aparecem:
"meu nome é Ozymandias, rei dos reis:
contemplem minhas obras, ó poderosos, e desesperai-vos!"
Nada resta: junto à decadência
das ruínas colossais, ilimitadas e nuas
as areias solitárias e inacabáveis estendem-se à distância.*

PERCY BYSSHE SHELLEY, 1818

RESUMO

NUNES, Ricardo Capiberibe. **Um Estudo Histórico-Social das Contribuições de Henri Poincaré À Teoria Da Relatividade: Subsídios para o Ensino de Física.** Campo Grande. 2019. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciência, UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL.

Essa pesquisa tem como questão básica investigar quais as contribuições de Henri Poincaré para o desenvolvimento da teoria da relatividade especial? Para respondermos a esta questão, propomos a construção de uma micro-história, no sentido proposto por Ginzburg e Levi, sobre as contribuições de Henri Poincaré à da Teoria da Relatividade Especial, orientada pela epistemologia de Fleck. A natureza realista crítica da epistemologia de Fleck permite que compreendamos a estrutura das teorias em suas dimensões científicas, humanísticas e sociais, mostrando que a ciência é uma construção coletiva que envolve a circulação de ideias entre a cultura científica, a cultura humanística e a sociedade. A análise revelou que diferente da opinião majoritária dos livros didáticos e textos históricos de divulgação científica, Henri Poincaré antecipou praticamente todos resultados atribuídos a Albert Einstein, a proposta de um espaço-tempo quadridimensional onde as grandezas físicas devem apresentar quatro componentes invariantes frente as transformações de Lorentz. Poincaré, em 1905, previu até mesmo a existência de ondas gravitacionais, que foram recentemente detectadas por interferômetros gravitacionais, e celebradas como um dos feitos de Einstein. Todos esses resultados são ostensivamente omitidos e desconhecidos até de acadêmicos. Durante a análise fleckiana, também detectamos fortes evidências da influência social e outros elementos externos na fabricação da relatividade. Tendo em vista a falta de material que aborde as contribuições de Poincaré e os elementos sociais, realizamos a elaboração de contos de ficção científica em relatividade especial, por meio de uma leitura fleckiana e do uso do recurso de Comunicação Não-Violenta (CNV) com sugestões de atividades e temáticas, fornecendo subsídios para professores de física.

Palavras-Chaves: Sociologia da Ciência, Epistemologia de Fleck, Relatividade Especial, Henri Poincaré, Micro-história.

ABSTRACT

NUNES, Ricardo Capiberibe. **A Historical-Social Study of Henri Poincaré's Contributions to The Theory of Relativity: Subsidies for Teaching Physics.** Campo Grande. 2019. Dissertation. Graduate Program in Science Teaching, FEDERAL UNIVERSITY OF MATO GROSSO DO SUL.

This research has as basic investigative questions what are the contributions of Henri Poincaré to the development of the theory of special relativity? To answer this question, we propose the construction of a micro-history, meaningless directed to Ginzburg and Levi, about Henri Poincaré's contributions to the Theory of Special Relativity, guided by Fleck's epistemology. A critical nature of Fleck's epistemology allows us to understand a structure of scientific, humanistic and social theories, showing that science is a collective construction that involves a circulation of ideas between scientific culture, humanistic culture and society. An analysis revealed on the different opinion of didactic books and historical texts of scientific dissemination, Henri Poincaré, almost all the results attributed to Albert Einstein, a proposal of four-dimensional space-time where the advances will be displayed with the following invariable components as Lorentz transformations. In 1905, Poincaré even predicted the presence of gravitational waves, which were recently detected by gravitational interferometers and celebrated as one of Einstein's achievements. All of these results are ostensibly omitted and unknown to academics. During Fleck's analysis, we also detected strong evidence of social influence and other external elements in the manufacture of relativity. In view of the lack of material that addresses Poincaré's contributions and social elements, we elaborated science fiction stories in special relativity, through a Fleckian reading and the use of the Non-Violent Communication (NVC) resource with suggestions for activities and themes, providing subsidies for physics teachers.

Keywords: Sociology of Science, Fleck Epistemology, Special Relativity, Henri Poincaré, Tales.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
Justificativa	17
Questão da Pesquisa e Objetivos da Pesquisa	20
1. A RELATIVIDADE DE ALBERT EINSTEIN: ORIGEM, FUNDAMENTAÇÃO E PROBLEMAS HISTÓRICOS..	21
1.1. A experiência de Michelson-Morley	22
1.2. Influência de Lorentz nos trabalhos de Einstein.....	24
1.3. Influência de Poincaré nos trabalhos de Einstein	27
1.4. A formação epistemológica de Einstein	33
1.5. O Artigo de Einstein: o que são postulados?	36
1.6. A Origem dos Postulados de Einstein	37
1.7. A Fundamentação dos Postulados	39
1.8. Considerações Finais.....	42
2. CAMINHO TEÓRICO-METODOLÓGICO DE INVESTIGAÇÃO ..	45
2.1. Referencial Teórico	45
2.2. Metodologia	53
2.3. Literatura Secundária	62
2.3.1. Contribuições de Poincaré	63
2.3.2. História da Teoria da Relatividade Especial	64
2.3.3. Suplemento de Matemática	66
2.3.4. Suplemento de Física-Matemática	66
2.3.5. Suplemento de Física	67
2.3.6. Livros Textos de Teoria da Relatividade	68
2.4. Historiografia da Ciência: Algumas Observações	69
3. O PAPEL SOCIAL NA FORMAÇÃO E CONSTRUÇÃO DA RELATIVIDADE DE POINCARÉ	71
3.1. O Papel Social sobre a Formação Científica	73
3.2. Coletivos de Pensamento de Pensamento de Poincaré	75
3.3. A Medida do Tempo e a Questão da Simultaneidade.....	81
3.3.1. Síntese Fleckiana sobre a Coordenação do Tempo.....	110
3.4. A Medida da Geodésica e a Questão do Espaço.....	111
3.4.1. Síntese Fleckiana sobre a Medida do Espaço.....	121

4. POINCARÉ E A GÊNESE DO DESENVOLVIMENTO DA TEORIA DA RELATIVIDADE (1895-1904) 125

4.1 O Princípio Da Relatividade..... 125

4.1.1. Síntese Fleckiana sobre o Princípio da Relatividade 139

4.2 Contribuições de Poincaré À Dinâmica Relativística 144

4.2.1. O Estudo da Variação da Massa do Elétron..... 144

4.2.2. A Relação Massa e Energia: Um Breve Histórico 152

4.2.3. O Paradoxo do Princípio da Reação na Teoria de Lorentz 156

4.2.4. Versão Simplificada da Análise de Poincaré 158

4.2.5. O Princípio da Reação na Teoria de Lorentz 161

4.2.6. Poincaré e a Teoria Eletromagnética (1901-1904)..... 172

5. CONSTRUÇÃO DA RELATIVIDADE DE POINCARÉ: ANÁLISE DA TESE DE POINCARÉ: “SUR LA DYNAMIQUE DE L’ÉLECTRON” (1905-06)..... 175

5.1 Construindo a Dinâmica do Elétron 175

5.1.1 Construindo a Dinâmica do Elétron: Análise Fleckiana 179

5.2 A Dinâmica do Elétron: Notação 181

5.3 A Dinâmica do Elétron: Introdução 183

5.4 Transformações de Lorentz..... 188

5.5 O Princípio de Mínima Ação 190

5.6. A Transformação de Lorentz e o Princípio de Mínima Ação 193

5.7. O Grupo de Lorentz 196

5.7.1 Grupo de Lorentz e as Isometrias no Espaço-Tempo 201

5.8. Ondas de Langevin 206

5.9. Contração dos Elétrons 208

5.10. Movimento Quase Estacionário 213

5.11. Movimento Arbitrário..... 215

5.12. A Gravitação e o Princípio da Relatividade..... 219

5.13. Síntese Fleckiana sobre a Dinâmica do Elétron 221

6. AS HIPÓTESES SOBRE A GRAVITAÇÃO DE POINCARÉ 223

6.1. Estado da Arte da Gravitação no Começo do Século XX..... 224

6.2. Hipóteses sobre a Gravitação 229

6.3. Repercussão das Hipóteses sobre a Gravitação de Poincaré..... 239

6.4. Análise Fleckiana das Hipóteses sobre a Gravitação 241

6.5 O Valor das Hipóteses Sobre a Gravitação de Poincaré	245
6.6 Considerações Finais.....	247
6.7 Síntese Fleckiana das Hipóteses Sobre a Gravitação	250
7. UM ESTUDO COMPARADO ENTRE AS INTERPRETAÇÕES DE LORENTZ-POINCARÉ E EINSTEIN SOBRE A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL.....	253
7.1. Equivalência Epistemológica entre a Relatividade de Lorentz- Poincaré e Einstein.....	255
7.2. O Princípio da Relatividade	259
7.3. O Princípio da Relatividade	268
7.4. A Constância da Velocidade da Luz.....	271
7.5. Contração de Objetos em Movimento.....	276
7.6. Mudança do Período dos Relógios.....	278
7.7. Relatividade da Simultaneidade	280
7.8. Transformações de Lorentz	282
7.9. Transformações de Campos Eletromagnéticos	287
7.10. Relação entre Massa e Velocidade.....	289
7.11. Relação entre Massa e Energia ($E = mc^2$)	291
7.12. Outros Desenvolvimentos da Relatividade Especial.....	292
7.13. Quais Foram Percepções de Lorentz, Poincaré e Einstein Sobre a Relatividade?	293
7.14. Algumas Considerações Sobre o Período “Pós Teoria Relatividade Especial”	301
7.15. História da Relatividade Especial como Contra-Argumento à Visão Radicalmente Internalista da Ciência	304
7.16. Explicando as Semelhanças na Abordagem de Poincaré e Einstein pela Perspectiva Fleckiana	305
CONSIDERAÇÕES FINAIS	311
PERSPECTIVAS FUTURAS.....	323
REFERÊNCIAS	327

INTRODUÇÃO

Eu comecei minha jornada acadêmica em 2005, um pouco longe da física, no bacharelado de Comunicação Social, onde optei pela habilitação de Jornalismo. Talvez eu esteja cometendo uma falácia de generalização apressada, mas no meu curso, os meus colegas podiam ser classificados em dois grupos: aqueles que fizeram jornalismo para aparecer na televisão e aqueles que fizeram jornalismo porque gostam de escrever. Eu não fui exceção, eu pertencia ao segundo grupo. Desde o ensino médio, eu gostava de escrever. Comecei com poesia, variando os estilos conforme aprendia sobre uma escola literária nova, depois comecei a escrever contos de terror e mistério, inspirado em Edgar Allan Poe (meu literato favorito) e Stephen King. Sendo filho de Ricardo Sérgio de Menezes Nunes, um professor de Letras e uma das mentes mais brilhantes que tive o prazer de conhecer (tão pouco, infelizmente), fui muito bem orientado. Meu pai era um universalista. Discutíamos de tudo, de poesia concreta e parnasiana a segunda guerra mundial e teoria do Big Bang. Ele era um inventor também. Um mago da eletrônica. Infelizmente, minha falta de coordenação motora me impediu de herdar suas habilidades.

Na escola, aos poucos ganhei a fama de escritor. Óbvio que a maioria dos meus colegas não apreciava poesia ou contos. Por isso eu era mais próximo de meus professores. Há três que eu não poderia esquecer: Edson Roberto, o Bode, professor de história e que hoje é um amigo íntimo meu. Gustavo Sabino, meu professor de física e que depois seria meu veterano na UFMS. E Paulo Pinto, Paulão, que ministrava matemática, e com quem discuto até hoje questões de relatividade, mas cuja proximidade não é maior porque ele mudou-se para Dourados.

A influência do meu pai e de meus professores me tornaram uma pessoa curiosa e com uma tendência a não se limitar em um determinado campo. No Jornalismo, tive a sorte de ter dois mestres que iriam manter viva a curiosidade. No primeiro semestre de Jornalismo (2005), tive um professor chamado Jacir Zanatta. Eu nunca me esqueço de sua pergunta icônica: “qual é o teorema de Pitágoras?”. Sua intenção era nos provocar e quebrar o senso comum de que estudantes de ciências humanas e sociais não precisam saber matemática ou ciências naturais. Talvez, sendo um ex-seminarista, meu professor estivesse se inspirando na parábola bíblica do semeador. Ao lançar uma pergunta, ele sabia que poucas sementes iriam germinar e, menos ainda, chegariam a se tornar uma árvore, mas aquela que se tonasse ia lançar novas sementes e manter o ciclo. Não acho que seria exagero dizer que eu fui uma dessas sementes. Sua provocação me atingiu e eu

comecei a estudar temas científicos. No segundo semestre, eu encontrei meu mecenas no jornalismo e que me incentivou a continuar a ler e escrever sobre ciência: Alexandre Maciel, carinhosamente apelidado pelos amigos de Bahia. Meu plano original era seguir a área de jornalismo científico e escrever sobre temas relacionados na ciência: fossem matérias de comunicação científica ou matérias de divulgação científica. Minha maior motivação era compreender a Teoria da Relatividade. A ideia do espaço e tempo formarem um contínuo com o tempo desempenhando o papel de uma quarta dimensão e que a matéria e a energia poderiam curvar o tempo, fascinava-me. Infelizmente, não tinha acesso fácil a internet e as bibliotecas em Campo Grande (MS), cidade em que nasci e até hoje resido, deixam muito a desejar. A solução era consumir obras de popularização da ciência, torcendo que as informações estivessem corretas e que eu fosse capaz de compreender alguma coisa. Depois de um tempo, as obras populares começaram a me deixar insatisfeito: primeiro que elas eram muito repetitivas, eu sabia que haviam aspectos históricos e científicos que eram postos de lado. Eu me convenci que para poder produzir conteúdo de divulgação científica, eu teria que me aprofundar melhor nas raízes históricas, epistemológicas e matemáticas da Teoria. Foi o momento em que decidi investir na carreira de físico.

Em 2009, ano em que coleí grau no Jornalismo, ingressei no curso de física. Foi durante a graduação que ouvi falar de César Lattes¹, principalmente sobre a sua postura crítica em relação a Einstein e a Teoria da Relatividade. Nessa época eu já tinha acesso à internet e procurei sobre Lattes e Einstein e encontrei uma entrevista onde ele credita a Relatividade ao físico-matemático francês Henri Poincaré. A reação da maioria das pessoas é manter a harmonia das ilusões, para usar um termo fleckiano, ou seja, considerar as alegações de Lattes como produto de inveja acadêmica ou exageros. A verdade é que a controvérsia apontada por Lattes transformou uma conexão passiva, de que Einstein seria a mente genial por trás da criação da relatividade, em uma conexão ativa: Einstein realmente foi um gênio que criou a relatividade? Existem gênios? Como que uma pessoa comum, como eu, pode contribuir para ciência? Nessa época levei estas questões ao meu professor e amigo, Moacir Lacerda. Recordo-me das horas que passávamos em sua sala ou mesmo em sua residência discutindo sobre relatividade e o papel de Poincaré.

¹ Na minha opinião, esse é um sintoma da educação precária em ciências no Brasil. Qualquer disciplina de física na educação básica deveria, no mínimo, abordar a história da ciência brasileira e as contribuições de César Lattes, José Leite Lopes e Mario Schenberg.

Tão logo eu me formei em 2013, eu fui aprovado no concurso para professores do quadro permanente da Secretária de Educação do Mato Grosso do Sul em Física. O ambiente escolar me promoveu uma experiência agradável, por parte dos alunos, e muito desagradável por parte da burocracia (planejamentos que se baseiam em uma grade curricular engessada, preencher papéis explicando porque x alunos foram com notas baixas em provas, explicar porque os alunos vão abaixo da média esperada no ENEM etc.). Continua sendo para mim, extremamente doloroso ver que as teorias de ensino não sobrevivem a política liberal (no sentido sociológico) e positivista de diretores, coordenadores e até mesmo de professores. Desenvolvi uma posição crítica em relação aos livros didáticos e aos programas que nos eram impostos. Optei por abordagens conceituais, projetos de ensino pela pesquisa. Também mantive as minhas pesquisas e motivado a responder as minhas indagações sobre a construção da teoria da relatividade, comecei a fazer um estudo técnico sobre história da ciência e tentar aplica-lo em sala de aula.

Nesse período (de 2014 até 2017) estudei a obra dos historiadores e educadores da ciência, tais como Helge Kragh, David Knight, Ana Maria Alfonso-Goldfarb, Roberto de Andrade Martins, Cibele Celestino Silva, Thaís Cyrino Forato, Ana Paula Bispo, Lilian Martins, Alexandre Bagdonas, Gerald Holton. Também estudei teoria histórica, principalmente os franceses: Marc Bloch, Lucien Lebfvre, Antoine Prost e François Hartog. Estudei também o método histórico marxista² por Eric Hobsbawm e a obra de Maria Amália Andery e colaboradores. Depois empreendi um estudo nas principais correntes epistemológicas por meio do livro *O Que É Ciência Afinal* de Alan Chalmers. Deste livro, dediquei a estudar três autores: Thomas Kuhn, Imre Lakatos e Paul Feyerabend. Confesso que gostei da abordagem de Lakatos, apesar das influências popperianas que Lakatos traz em sua obra. Identifiquei-me plenamente com Feyerabend, principalmente por pertencer a tradição anarquista de Murray Bookchin, embora Feyerabend visse com certa desconfiança o apelido de “anarquista da ciência”, eu me identifico até hoje como um “anarquista da ciência”. Quanto a Thomas Kuhn, eu tinha algumas divergências como seu modelo monoparadigmático e a ideia de “revolução”. Minhas divergências me levariam a Ludwick Fleck. Meu interesse pela sociologia da ciência surgiu do meu contato com *Science Studies*. Eu queria desenvolver uma

² Ainda pretendo, a exemplo do trabalho Freudenthal sobre Newton, realizar uma análise da construção da teoria da relatividade pelo materialismo histórico e dialético de Marx-Engels.

historiografia que deixasse o mais latente possível os fenômenos sociais: cultura, gênero, nacionalismo etc. A princípio pensei no materialismo aplicado a ciência tendo como objeto a relatividade. Eu abandonei esse projeto por duas razões: a primeira é que eu precisaria me aprofundar na literatura marxista e isso poderia demandar mais tempo que eu poderia dedicar. A segunda que queria uma teoria mais geral que a teoria de Marx que é fundamentada nas relações socioeconômicas. Uma possibilidade seria adaptar a sociologia líquida de Bauman, um assunto que eu tinha maior conhecimento. Por fim, minhas pesquisas sobre sociologia da ciência me conduziram ao Estudos Sociais da Ciência e a epistemologia de Fleck.

A epistemologia de Fleck coincidia com a minha visão social da ciência e me permitiria abordar o surgimento da teoria da relatividade a partir de três acontecimentos: a coordenação de relógios e das geodésicas (fato político, social e técnico), a segunda crise da física-matemática (complicação) e a ontologia do espaço (filosofia físico-matemática). Nessa época eu já havia estudado a evolução do conceito de tempo e espaço do ponto de vista histórico e do ponto de vista antropológico. Bastava uma epistemologia social, como a de Fleck, para conectar estes fatos e fazer uma análise sociológica. Eu tentei introduzir a sociologia da ciência em minhas aulas, mas fui acusado de doutrinação. Frente o insurreição do movimento Escola sem Partido e da Onda Conservadora, fui obrigado, sobre ameaças severas, a abandonar minha didática e me ater aquilo que a escola demandava: treinar os alunos para o ENEM e adotar uma postura cívico-militar. Como não posso aceitar esse tipo de ideologia operacionalista, adoeci severamente e fui afastado de sala de aula por problemas de saúde, em 2018, e, por derradeiro, aposentado por invalidez (2019). No mesmo ano do meu afastamento (2018), fui aprovado no mestrado. Aquele foi quase um ano perdido, tive que me esforçar muito para conseguir frequentar as aulas do mestrado, já que tinha que conciliar com a minhas idas ao psiquiatra, a junta médica e torcer para não entrar em crise de pânico. Também não conseguia produzir dentro dos padrões que eu me estipulava³ e tive que fazer ajuste de medicação diversas vezes. Porém, o tratamento passou a surtir mais efeito, e comecei a me dedicar a pesquisa. Comecei pela tradução de fontes primárias dos trabalhos de Poincaré e Einstein. Comecei a realizar conexões ativas sobre o trabalho de Poincaré e o

³ Em tempos que a minha saúde estava em ordem eu dividia a minha produção em ler dois livros a cada duas semanas, quatro artigos a cada duas semanas, estudar um livro ou tópico avançado (sem prazo estipulado) e trabalhar um artigo (técnico ou não) a cada 3 meses. Em 2018, não consegui atingir 25% destas metas.

convencionalismo. Investiguei as semelhanças entre os trabalhos de Poincaré e Einstein. Nesse período soube do mestrado em ensino de ciências e conversei com professor Wellington Queirós e após meu egresso no programa, começamos a desenvolver o trabalho.

A minha experiência como leitor de divulgação científica e professor me mostraram que os livros de divulgação científica contém anacronismos, erros conceituais, invenções históricas e passam uma visão inadequada sobre a natureza da ciência. Os livros didáticos, que devem ser muito mais cuidadosos com o conteúdo pelo seu papel na educação básica, seguem o mesmo caminho. Inúmeras vezes, fui obrigado a corrigir em sala de aula erros dos livros sobre história e conceitos. Como mostrarei nesse estudo, esse é um problema é geral. E o mais grave é: esse problema não é novo e passa despercebido por técnicos do MEC e professores da educação básica.

Por fim, gostaria de comentar a respeito da epígrafe desse trabalho, uma passagem do famoso soneto de Shelley, Ozymandias. O império do rei dos reis, cujas obras deixariam até os deuses desesperados, não sobreviveram ao tempo. Restavam apenas as ruínas e a areia. Nada sobrevive ao império do tempo, tudo rui. Quando penso nisso, penso na própria natureza da ciência: sempre em constante mudança. Penso na educação brasileira positivista, tão estática e em ruínas, Também penso na Teoria da Relatividade, que é uma teoria sobre o espaço e o tempo. Quando leio Ozymandias, eu penso que a natureza é transformação e o que não se transforma perece.

Justificativa

Como aponta Martins (2009), a história da ciência pode não substituir o ensino de ciências, mas pode enriquece-lo de diversas formas. Porém, nem sempre o uso da história da ciência é feita de forma adequada. Como observou Boss, Caluzi, Assis, Filho (2016, p.173): “muitas vezes, os conteúdos históricos disponíveis para os professores em livros didáticos ou paradidáticos, materiais de divulgação ou outro material que não seja proveniente de estudos acadêmicos, é caricata e distorcida.”

Para se ter uma ideia, o problema da aparência visual dos objetos em uma contração de Lorentz (denunciados por Ostermann e Ricci há cerca de 16 anos), está presente em todos os 12 livros didáticos de física aprovados no PNLD-2018⁴.

⁴ Lista completa de obras (BRASIL, 2018): Física 3: Eletricidade, Física Moderna (BISCUOLA, BÔAS, DOCA, 2016); Física: Eletromagnetismo, Física Moderna (GUIMARÃES, PIQUEIRA, CARRON); Física

As obras básicas estudadas no ensino superior como *Física IV - Ótica e Física Moderna* (SEARS, ZEMANSKY, 2016) e *Fundamentos de Física 4* (HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2016) apresentam os três problemas conceituais. Até a consagrada obra *Lições de Física de Feynman* (FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS, 2008) não estão isentas das dificuldades enunciadas. Uma exceção é o livro *Curso de Física Básica - Ótica, Relatividade, Física Quântica - Vol. 4* (NUSSENZVEIG, 2014) que discute corretamente, e com detalhes, a aparência visual dos objetos em uma contração de Lorentz, porém não está imune aos demais equívocos. Até os livros específicos como *Introdução à Relatividade Especial* (RESNICK, 1971), *A Teoria da Relatividade Restrita* (BOHM, 2014), *Teoria da Relatividade* (PERUZZO, 2012), *Einstein's Theory of Relativity* (BORN, 1968), *General Theory of Relativity* (DIRAC, 1996) não são exceções.

Em geral, os livros didáticos e os materiais de estudo exploram os aspectos formais e se limitam em apresentar os principais resultados. Muitos livros fazem uma apresentação e discussão, geralmente incorreta, da relação massa-energia $E = mc^2$. Porém quase nenhum deles discute como se chegou naquela relação e muito menos se discute o contexto em que essas ideias foram desenvolvidas. Esse tipo de ensino promove a construção de uma crença científica, mas crença científica não é conhecimento científico, como observa Martins (2006, p.XXX):

Há uma importante distinção entre conhecimento científico e crença científica. Ter conhecimento científico sobre um assunto significa conhecer os resultados científicos, aceitar esse conhecimento e ter o direito de aceitá-lo, conhecendo de fato (não através de invenções pseudo-históricas) como esse conhecimento é justificado e fundamentado. Crença científica, por outro lado, corresponde ao conhecimento apenas dos resultados científicos e sua aceitação baseada na crença na autoridade do professor ou do “cientista”. A fé científica é simplesmente um tipo moderno de superstição. É muito mais fácil adquiri-la que o conhecimento científico – mas não tem o mesmo valor.

O fato das obras de nível superior, tanto básicas como específicas, apresentarem problemas conceituais e sócio históricos, indica possíveis problemas na formação de professores de física. Corrobora esse fato, os livros de ensino médio, revisado pelas

3: Interação e Tecnologia (GONÇALVES FILHO, TOSCANO, 2016); Física 3: Eletromagnetismo, Física Moderna (BONJORNIO et al, 2016); Compreendendo a Física: Eletromagnetismo e Física Moderna (GASPAR, 2017); Física para o Ensino Médio 3: Eletricidade, Física Moderna (KAMAMOTO, FUKU, 2017); Física em Contextos 3 (PIETROCOLA et al, 2016); Física por Aula 3: Eletromagnetismo – Física Moderna (BARRETO FILHO, SILVA, 2016); Conexões com a Física 3: Eletricidade – Física do Século XXI (MARTINI et al, 2016); Física, Ciência e Tecnologia 3: Eletromagnetismo, Física Moderna (TORRES et al, 2016); Física 3: contexto & aplicações (MÁXIMO, ALVARENGA, GUIMARÃES, 2016); Ser Protagonista – Física 3 (VÁLIO, et al).

editoras, aprovados pelo MEC e selecionados pelos professores, apresentarem quase os mesmos problemas. Diante estes fatos, não é exagero dizer que é necessário mais trabalhos voltados a formação de professores, tendo como tema a teoria da relatividade especial.

Dentre as possibilidades de um curso de formação de professores, indicamos abordagem de aspectos sociais da teoria da relatividade. As potencialidades dos estudos históricos e sociais no ensino de ciências são objeto de vários estudos. Martins (2006), argumenta que estudo adequado de alguns episódios sociais permite compreender as inter-relações entre ciência, tecnologia e sociedade, mostrando que a ciência não é uma coisa isolada de todas as outras mas sim faz parte de um desenvolvimento histórico, de uma cultura, de um mundo humano, sofrendo influências e influenciando por sua vez muitos aspectos da sociedade

Goldfarb (1994) também defende que a compreensão histórica e social do desenvolvimento da ciência pode oferecer discussões que contribuam para a desmistificação do conhecimento científico e para facilitar a sua construção. Outras vantagens uma análise social da ciência pode promover para o ensino a formação de professores são (FORATO; MARTINS; PIETRECOLLA, 2011, p.32-33):

Uma compreensão mais correta e clara da real natureza da ciência se opondo a visão equivocada que a ciência é o resultado da aplicação mecânica de um método científico. A ciência como uma atividade humana e por isso parcial, sendo influenciável por diversos fatores (sociais, políticos, culturais, religiosos, etc) e também sujeito a falhas. Ir além do conteúdo científico, compreendendo os seus pressupostos e limites, estimulando a formação do pensamento crítico e reflexivo. Combater a interpretação empírico-indutivista da ciência, por meio da assimilação do conhecimento metodológico.

As obras que resultam desse “esforço” transmitem não apenas informações históricas erradas, mas deturpam totalmente a própria natureza da ciência. Em vez de ajudar a corrigir a visão popular equivocada a respeito de como se dá o desenvolvimento científico, esses livros e artigos contribuem para reforçar e perpetuar mitos daninhos a respeito dos “grandes gênios”, sobre as descobertas repentinas que ocorrem por acaso, e outros erros graves a respeito da natureza da ciência.

Todos conhecem os nomes de Lavoisier, Newton, Galileu, Darwin. Mas o que estava acontecendo no mundo (e, especialmente, nos lugares onde eles viviam) quando eles desenvolveram suas pesquisas? Não existiu nenhuma relação entre o que eles fizeram e aquilo que estava acontecendo em volta deles? É claro que existiu. Mas não costumamos estudar isso, o que dá a falsa impressão de que a ciência é algo atemporal, que surge de forma mágica e que está à parte de outras atividades humanas. (MARTINS, 2006, p.XXII).

Os elementos sociais e humanísticos na análise fleckiana não são apenas importantes, são uma parte essencial do processo de compreensão e de estabelecimento do conhecimento científico. As breves análises que fizemos nas sessões anteriores corroboram essa afirmação, o contexto europeu em que os pesquisadores estavam incluídos foi substancial para o desenvolvimento da Relatividade. Uma análise detalhada pode revelar conexões e contribuir ao Ensino de Física.

Questão e Objetivos de Pesquisa

Tendo em vista os problemas elencados pela literatura e minha própria experiência como professor e leitor, levantamos a questão principal desta pesquisa: *Quais as contribuições de Henri Poincaré para o desenvolvimento da teoria da relatividade Especial?* Para respondermos essa questão, a pesquisa tem como objetivo geral fazer um estudo Histórico-Social por meio da epistemologia de Ludwik Fleck das contribuições de Henri Poincaré para o desenvolvimento da teoria da relatividade. O intuito deste produto é desconstruir o mito de Einstein e mostrar que a construção de uma teoria é um processo além de lógico, coletivo e social. A acusação séria de César Lattes que Einstein teria plagiado Poincaré, levanta diversas conexões ativas, que exigem exame na literatura e uma comparação das duas abordagens. Não pretendemos dar um veredito a acusação de Lattes, mas fornecer ao público em geral uma visão mais ampla e crítica respeito das teorias, em suma, adotamos a posição de Machado de Assis sobre a infidelidade de Capitu: deixamos que leitor decida por conta própria. Assim, a partir da definição do objetivo Geral definimos os nossos objetivos específicos:

- Enumerar os problemas históricos no processo de construção da Teoria da Relatividade Especial;
- Fazer uma comparação entre as contribuições das abordagens de Lorentz, Poincaré e Einstein na construção da Teoria da Relatividade Especial;
- Construir por meio do estudo histórico da relatividade especial e da epistemologia fleckiana contos de ficção científica que abordem questões históricas, conceituais e sociais da relatividade.

1. A RELATIVIDADE DE ALBERT EINSTEIN: ORIGEM, FUNDAMENTAÇÃO E PROBLEMAS HISTÓRICOS.

Em 1905, o pesquisador alemão, naturalizado suíço, Albert Einstein publicou um artigo chamado *Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento* (*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*) que posteriormente foi chamado como o primeiro artigo de Einstein sobre a Teoria da Relatividade Especial. Embora Lorentz e Poincaré já tivessem construído uma Eletrodinâmica consistente com o Princípio da Relatividade, o trabalho de Einstein apresentava de maneira muito mais clara os resultados obtidos por outros pesquisadores e trazia uma interpretação filosófica diferente baseada na rejeição do conceito de Éter (MARTINS, 2015).

Nessa pesquisa iremos investigar as influências de Einstein na fundamentação de sua teoria da relatividade, desconstruindo as narrativas populares e anacrônicas. Reconhecemos que Einstein não criou a Teoria da Relatividade, mas que esta teoria foi uma construção coletiva (AUFRAY, 1998, KESWANI, KILMISTER, 1983, GALISON, 2003, DARRIGOL, 2003, MARTINS, 2015). Também advertimos ao leitor que, por questões de simplificação, usaremos o termo *relatividade de Einstein* para se referir as contribuições deste pesquisador. Segundo a historiografia da relatividade especial (AUFRAY, 1998; DARRIGOL, 2003; GALISON, 2003; GIANNETTO, 1999; GOLDBERG, 1967, 1969, 1970, 1976, HIROSIGE, 1976; HOLTON, 1967-1968; KESWANI, 1965A, 1965B; KESWANI & KILMISTER, 1983; LOGUNOV, 2004; MARTINS, 1986, 1989, 1998, 2005, 2006, 2010, 2012 2015; MILLER, 1973, 1986, 1997; WHITTAKER, 1987), há cinco eventos de maior destaque no desenvolvimento a relatividade:

- 1) A experiência interferométrica de Michelson-Morley de 1887, considerada, erroneamente, por alguns autores como o experimento crucial da relatividade.
- 2) O desenvolvimento da eletrodinâmica de Lorentz que alcançou seu ápice no famoso *memoir* de 1904.
- 3) As contribuições físicas, matemáticas e filosófica de Henri Poincaré entre 1898 à 1905.
- 4) Os posicionamentos epistemológicos em relação ao éter e ao papel da metafísica, do experimento e das hipóteses na ciência.

5) No caso particular da relatividade de Einstein, ainda incluímos a estruturação de seu artigo feita com a utilização de postulados.

À seguir analisaremos a importância de cada um destes itens para Albert Einstein.

1.1. A experiência de Michelson-Morley

No final do século XIX, foram realizadas novas experiências que tentavam medir a velocidade da Terra em relação ao éter por meio da interferência de ondas eletromagnéticas. É consenso entre os historiadores que o experimento mais importante foi a experiência interferométrica realizada pelo físico Albert Michelson e o químico Edward Morley em 1887. O resultado desta experiência mostrou que era impossível medir a velocidade da Terra em relação ao éter e foi vital no desenvolvimento dos programas de Larmor, Lorentz e Poincaré sobre a relatividade. Mas teria sido fundamental para Einstein?

Ninguém poderia saber melhor a influência que a experiência de Michelson-Morley teve sobre a relatividade de Einstein que o próprio Einstein. Porém, a questão não é tão simples, pois quando era interrogado sobre essa experiência as respostas de Einstein eram dúbias e contraditórias. Vejamos alguns exemplos, a começar por uma descrição de Shankland de entrevistas que realizou com Einstein: “quando lhe perguntei como soubera do experimento de Michelson-Morley, ele me disse que veio a conhece-la por meio dos escritos de H. A. Lorentz, mas só depois de 1905 lhe despertara atenção!” (SHANKLAND, 1963, p. 47). Esta opinião é reforçada em uma carta que Einstein enviou a Davenport, em 9 de fevereiro de 1954:

No meu próprio desenvolvimento, o resultado de Michelson não teve uma influência considerável. Eu nem lembro se eu o conhecia quando escrevi meu primeiro artigo sobre o assunto (1905). A explicação é que eu estava, por razões de ordem geral, firmemente convencido de como isso [a não existência de movimento absoluto] poderia ser conciliado com nosso conhecimento de eletrodinâmica. Pode-se, portanto, entender por que, na minha luta pessoal, o experimento de Michelson não teve nenhum papel ou, pelo menos, nenhum papel decisivo (EINSTEIN *apud* HOLTON, 1969, p. 194).

De fato, não seria surpreendente que o experimento de Michelson-Morley tivesse passado batido por Einstein, pois as obras alemãs sobre eletromagnetismo não davam ênfase aos aspectos experimentais.

Como já mostrei em outro artigo ("Influences on Einstein's Early Work in Relativity Theory") em quase todos os livros dos quais Einstein pode

ter aprendido a teoria de Maxwell, o experimento de Michelson nem sequer era mencionado - tampouco nas palestras sobre Física Teórica de Helmholtz, embora o primeiro experimento de Michelson tivesse sido realizado em seu próprio laboratório, nem nos ensaios de Hertz, nem em *Maxwells Theorie der Elektrizitat*, de August Föppl. De fato, o ponto mais significativo sobre os tratados alemães é que há uma escassez notável de referências a situações experimentais reais, não apenas a de Michelson, mas também a todos os outros experimentos sobre o arrasto do éter. (HOLTON, 1969, p. 170)

Gerald Holton, ainda endossa que, conforme as declarações de Einstein e a deficiência de conteúdo nas obras alemães, de fato a experiência de Michelson-Morley não teria sido decisiva para os primeiros trabalhos de Einstein:

De fato, o papel do experimento de Michelson na gênese da teoria de Einstein parece ter sido tão pequeno e indireto que se pode especular que não teria feito diferença para o trabalho de Einstein se o experimento nunca tivesse sido feito. (HOLTON, 1969, p. 195)

Porém, pode ser a conclusão de Holton esteja equivocada. Em 1982, Yoshimasa A. Ono publicou no *Physics Today*, uma transcrição de uma palestra proferida por Albert Einstein na Universidade de Quioto, em 14 de dezembro de 1922.

Então eu mesmo quis verificar o fluxo do éter em relação à Terra, em outras palavras, o movimento da Terra. Quando pensei pela primeira vez sobre este problema, não duvidei da existência do éter ou do movimento da Terra através dele. Pensei no seguinte experimento usando dois termopares: Configure espelhos de modo que a luz de uma única fonte seja refletida em duas direções diferentes, uma paralela ao movimento da Terra e a outra antiparalela. Se assumirmos que há uma diferença de energia entre os dois feixes refletidos, podemos medir a diferença no calor gerado usando dois termopares. Embora a ideia desta experiência seja muito semelhante à de Michelson, não pus esta experiência à prova. (EINSTEIN. 1983, p. 46)

Em seguida, Einstein escreve:

Enquanto pensava nesse problema em meus anos de estudante, passei a conhecer o estranho resultado do experimento de Michelson. Logo cheguei à conclusão de que nossa ideia sobre o movimento da Terra em relação ao éter é incorreta, se admitirmos o resultado nulo de Michelson como um fato. Este foi o primeiro caminho que me levou à teoria especial da relatividade. Desde então, passei a acreditar que o movimento da Terra não pode ser detectado por nenhum experimento ótico, embora a Terra esteja girando em torno do Sol. (EINSTEIN. 1983, p. 46)

Ou seja, Einstein alega que havia concebido uma experiência para estudar o movimento da Terra em relação ao éter que em muito se assemelhava a experiência de Michelson-Morley. Depois, ainda como estudante na Politécnica de Zurique, ele veio conhecer os resultados a experiência de Michelson-Morley que, como próprio Einstein

admite nessa palestra, levou-o a teoria da relatividade especial. Mesmo que Einstein não houvesse feito tal afirmação, seria difícil admitir que o resultado de uma experiência semelhante a que ele projetou, não tivesse tido qualquer influência no desenvolvimento de suas ideias. Por outro lado, propomos como hipótese que Einstein de fato não conhecia a experiência de Michelson-Morley, como afirma Holton (1969), Einstein posteriormente afirmou que conhecia essa experiência para ter mais um dado empírico, ou, fato pra legitimar a teoria para a comunidade científica da época.

1.2. Influência de Lorentz nos trabalhos de Einstein

Uma característica bastante comum nos trabalhos de Einstein é a ausência de citações ou referências a outros autores, o que torna difícil identificar quais foram os trabalhos que o influenciaram. Infelizmente, *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento*, não é exceção. No decorrer do trabalho Einstein cita apenas dois autores: Maxwell e Lorentz. Sobre Maxwell, não há dúvida que o autor estava discutindo seu famoso *Tratado da Eletricidade e do Magnetismo*. Mas, quanto a Lorentz, qual trabalho Einstein se referia? Assim como no caso da experiência de Michelson-Morley, as declarações de Einstein são confusas. Em uma carta de 19 de fevereiro de 1955, em resposta à Carl Seelig sobre os trabalhos que o haviam influenciado na criação da relatividade, Einstein apresentou o seguinte testemunho:

Não há dúvida de que a teoria da relatividade especial, se considerarmos seu desenvolvimento em retrospecto, estava pronta para ser descoberta em 1905. LORENTZ já havia observado que, para a análise das equações de MAXWELL, as transformações que mais tarde eram conhecidas por seu nome são essenciais, e POINCARÉ até penetrou mais profundamente nessas conexões. Quanto a mim, conhecia apenas o importante trabalho de LORENTZ de 1895 - "*La theorie electromagnetique de MAXWELL*" e "*Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Korpern*" - mas não o trabalho posterior de LORENTZ, nem as investigações consecutivas de POINCARÉ. Nesse sentido, meu trabalho de 1905 foi independente. A novidade disso foi a constatação do fato de que a extensão da transformação LORENTZ transcendeu sua conexão com as equações de MAXWELL e preocupava-se com a natureza do espaço e do tempo em geral. Outro resultado novo foi que a "invariância de Lorentz" é uma condição geral para qualquer teoria física. Isso foi para mim de particular importância, porque eu já havia descoberto anteriormente que a teoria de Maxwell não explicava a microestrutura da radiação e, portanto, não poderia ter validade geral. (EINSTEIN *apud* BORN, 1968, p. 104).

Keswani (1965b) acredita que esta citação tenha sido feita recorrendo a memória, pois Einstein comete um pequeno erro de datas. Embora, *Versuch* tenha sido publicado em 1895, o trabalho *La theorie electromagnetique de Maxwell*, foi publicado em 1892. Em sua palestra de 1922, Einstein reafirma ter lido o trabalho de Lorentz de 1895, e apresenta alguns novos detalhes

Eu tive a chance de ler a monografia de Lorentz de 1895. Ele discutiu e resolveu completamente o problema da eletrodinâmica dentro da primeira [ordem de] aproximação, negligenciando termos de ordem superiores a v/c , onde v é a velocidade de um corpo em movimento e c é a velocidade da luz. Então eu tentei discutir o experimento de Fizeau na suposição de que as equações de Lorentz para elétrons deveriam se manter no quadro de referência do corpo em movimento, bem como no referencial do vácuo, como originalmente discutido por Lorentz. Naquela época, eu acreditava firmemente que as equações eletrodinâmicas de Maxwell e Lorentz estavam corretas. Além disso, a suposição de que essas equações devem se manter no referencial do corpo em movimento leva ao conceito de invariância da velocidade da luz, que, no entanto, contradiz a regra de adição das velocidades usadas na mecânica. (EINSTEIN, 1982, p. 46).

O trabalho mais importante de Lorentz sobre a relatividade foi um *memoir* publicado em 1904, *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*. Neste trabalho Lorentz deduz as transformações que levam seu nome, tenta estabelecer a invariância das equações de Maxwell, apresenta uma explicação para o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley e deriva novas fórmulas para massa transversal e longitudinal do elétron. De acordo com a declaração de Einstein, ele não estava ciente desse importante trabalho quando escreveu seus dois *papers* da relatividade, porém já vimos que as declarações tardias de Einstein não são confiáveis. O que os historiadores tem a dizer? O historiador G. Holton defende a tese que o testemunho de Einstein é verídico e ele apenas conhecia esses dois trabalhos de Lorentz:

Sabemos que tal leitura, de fato, não incluiu o famoso artigo de 1904 de Lorentz, no qual ele deu sua teoria do eletromagnetismo para os corpos em movimentos para grandezas de segunda ordem ($v^2:c^2$), nem provavelmente a maioria dos outros papers que foram escritos sobre este assunto.¹ Temos evidências positivas de que Einstein leu apenas um artigo e um livro de Lorentz - o artigo de 1892 (publicado em francês) e o livro de 1895 (publicado em alemão), em que a teoria dada é à primeira ordem da quantidade ($v:c$). Isso se encaixa inteiramente na observação de Einstein no artigo de 1905, "o que até a primeira ordem de aproximação já está demonstrado..." (HOLTON, 1969, p. 169)

Já Arthur Miller não descarta a possibilidade de que Einstein tivesse tido acesso ao *memoir* de Lorentz, pois:

A natureza do serviço de Einstein no Escritório de Patentes, isto é, avaliar patentes para dínamos, muito provavelmente o conduziu para a biblioteca da Universidade de Bern onde ao mesmo tempo ele pode ter procurado também por literatura para sua pesquisa (MILLER, 1997, p. 81)

Keswani (1965a) defende a tese que Einstein teve acesso a tese de Lorentz. O historiador acredita que a prova se encontra na seguinte frase do *paper* de Einstein (1905, p. 893):

Como - como segue do teorema de adição de velocidades (§ 5) - o vetor (u_ξ, u_η, u_ζ) nada mais é que a velocidade da carga elétrica, medida no sistema k , temos a prova de que, no Com base em nossos princípios cinemáticos, a base eletrodinâmica da teoria da Lorentz sobre a eletrodinâmica de corpos em movimento está de acordo com o princípio da relatividade.

Segundo Keswani (1965a, p 299-300)

Nenhuma das teorias de Lorentz publicadas por ele antes de seu *memoir* de 1904 estavam de acordo com o princípio da relatividade, mas as equações básicas (TLE) de seu *memoir* de 1904 estavam estritamente de acordo com o princípio da relatividade (observações adicionais sobre isso seguirá em documentos subsequentes) Portanto, poderia Einstein ter em mente qualquer outro trabalho de Lorentz senão este proposto um ano antes? Ele estava ciente da teoria da eletrodinâmica de corpos em movimento de Lorentz e também estava apresentando uma nova teoria da eletrodinâmica de corpos em movimento (o título de seu artigo) envolvendo "uma modificação da teoria do espaço e do tempo", como ele disse, em uma carta escrita a Habicht em 6 de março de 1905. É pouco provável que ele estivesse se referindo a uma velha teoria de Lorentz.

Seguindo sua investigação, Keswani chama a atenção a semelhanças no desenvolvimento matemático e nas considerações físicas adotada pelos dois autores. Para o historiador essa similaridade é um indício bastante forte para defender a sua tese. Mehra (2001) ao ponderar sobre essa citação, adota uma posição favorável as conclusões de Keswani:

É possível que Einstein tivesse em mente alguma outra teoria de Lorentz que a proposta por ele em 1904? Parece ser muito estranho. (Aliás, Einstein também conhecia o trabalho de Max Abraham, de 1903, em que Abraham havia introduzido os termos massa "longitudinal" e "transversal", mas também não se referiu a ele). A observação de Einstein, que já citamos, foi exatamente o avanço que Einstein fez sobre o trabalho de Lorentz. Essa união das equações de Lorentz e do princípio da relatividade não era um casamento das ideias de Lorentz e Poincaré? Einstein solenizou esse casamento, mas não sabemos por que, como padre, ele escolheu não torná-lo público? Naturalmente, o trabalho de Einstein não pode ser considerado apenas a junção de dois trabalhos anteriores. Desde que apareceu logo após os dois, e ele atacou em tantas direções novas que é bem provável que ele estivesse apenas

procurando alguma confirmação de suas audaciosas ideias antes de publicá-las. (MEHRA, 2001, p. 228-229)

Infelizmente, parece que a questão não nos permite uma conclusão, como foi o caso da experiência de Michelson-Morley. Tanto a conferência de 1922 como as cartas de Einstein endossam a mesma informação. O argumento de Keswani e Mehra, ainda que bem pautados, podem ser explicados por razões mais simples: Einstein poderia ter ouvido falar dos últimos avanços na eletrodinâmica dos corpos em movimento ou pode ter se inspirado nas citações que Poincaré faz a eletrodinâmica de Lorentz, no livro *A Ciência e a Hipótese*. Podemos afirmar apenas que Einstein foi influenciado por Lorentz, mas não sabemos com certeza qual a amplitude dessa influência.

1.3. Influência de Poincaré nos trabalhos de Einstein

Na década de 1950, E. Whittaker conduziu um estudo historiográfico sobre a eletricidade e o éter. O segundo capítulo, do segundo volume, foi intitulado *The Relativity Theory Of Poincaré And Lorentz* (WHITTAKER, 1953). Diferente da opinião corrente, Whittaker propõe que a teoria da relatividade foi criada por Lorentz e Poincaré, tendo Einstein um papel complementar. A partir dessa tese, acadêmicos e historiadores passaram a resgatar as contribuições de Poincaré para a relatividade. (HOLTON, 1969, GOLDBERG, 1968). O resultado foi surpreendente, entre 1900 e 1904, Poincaré já havia deduzido: a relação massa-energia, a rejeição do espaço e tempo absoluto, a relatividade da simultaneidade, o efeito de contração do espaço e dilatação do tempo e apresentado uma formulação exata do princípio da relatividade.

Em 1905, antes de Einstein publicar seus artigos, Poincaré submeteu duas versões de um mesmo artigo (uma versão resumida e uma versão estendida), *Sur la dynamique de l'électron*. A versão resumida foi publicada no mesmo ano, em Junho no *Comptus Rendus*, mas a versão longa, por um erro editorial (AUFFRAY, 1998), só saiu em janeiro de 1906. Neste artigo, Poincaré corrige alguns erros do *memoir* de Lorentz, obtém a invariância das equações de Maxwell, mostra que as transformadas de Lorentz formam um grupo infinitesimal e calcula seus geradores e a sua álgebra de Lie, destacando a existência do invariante $c^2dt^2 - dr^2$ e que as grandezas físicas deveriam ser escritas em um espaço de 4 dimensões, usando esse grupo ele prova que a única eletrodinâmica em acordo com o princípio da relatividade é a de Lorentz e ainda faz a previsão de ondas gravitacionais (POINCARÉ, 1905g, 1906).

Embora Auffray afirme que a versão resumida desse artigo tenha sido enviada para várias bibliotecas e instituições, incluindo o Escritório de Patentes, é muito pouco provável que Einstein tenha tido acesso a esse trabalho (HOLTON, 1966, 1969, MILLER, 1997). Mas teria Einstein conhecimento sobre os outros trabalhos de Poincaré? Einstein afirmou que não (MEHRA, 2001). Em sua palestra de 1922, em momento algum ele menciona Poincaré. Seríamos tentados a concluir que Einstein desconhecia, até 1905, as contribuições de Poincaré, contudo a pesquisa historiográfica mostrou que ou Einstein estava mentindo ou sofrendo com os prejuízos da memória. Em 1902, Conrad Habicht, Maurice Solovine e Albert Einstein fundaram um grupo de estudos chamado Academia Olympia (PAIS, 1982, ISAACSON, 2007, SOLOVINE, 2011, MARTINS, 2015). O grupo se dedicava a leitura e a discussão de livros de filosofia e divulgação científica. Um dos livros que o trio estudou profundamente, antes de 1905, foi *A Ciência e a Hipótese* de Henri Poincaré, nas palavras de Solovine (2011, s.p.):

O status de nosso material certamente não era invejável, mas compartilhamos uma tendência incomum para estudar e explicar os problemas mais difíceis da ciência e da filosofia. Juntos, lemos, depois de Pearson, *A análise de sensações* e *Mecânica* de Mach, que Einstein tinha estudado anteriormente, *Lógica* de Mill, *Tratado sobre a natureza humana* de Hume, *Ética* de Spinoza, algumas das memórias e palestras de Helmholtz, alguns capítulos do ensaio de André-Marie Ampère sobre *Filosofia*, *Sobre as hipóteses que servem de base para a geometria*, de Riemann, alguns capítulos da *Crítica da Pura Experiência* de Avenarius, *Sobre a natureza das coisas* de Clifford, *Os números* de Dedekind, *A ciência e a hipótese* de Poincaré, que nos absorveu e nos manteve fascinados por semanas e muitos outros trabalhos. (GRIFO NOSSO).

Não há dúvidas que Einstein conhecia os trabalhos de Poincaré antes de 1905, porém essa obra continha alguma informação que poderia influenciar Einstein na produção de seu trabalho? A resposta é um enfático sim. O livro *A Ciência e a Hipótese* foi publicado em 1902, originalmente contendo 13 capítulos (um décimo quarto capítulo foi incluído em edições posteriores), distribuídos em quatro partes: Número e Magnitude, Espaço, Força e Natureza. A palavra *relatividade*, no sentido de *Princípio da Relatividade*, aparece 11 vezes em todo o livro. Na Parte 2 (Espaço), no capítulo IV, *Experimento e Geometria*, encontramos a definição de lei da relatividade de Poincaré e que é justamente o primeiro postulado do *paper* de 1905 de Einstein. Portanto, como Einstein poderia ignorar em suas palestras e em suas memórias a contribuição de Poincaré? Nós não sabemos, mas como já provamos a semelhança é muito mais do que mera coincidência. Nesse mesmo capítulo, Poincaré discute a relação do princípio da

relatividade com o grupo de deslocamentos. Estudos sobre a educação superior de Einstein revelam que ele não estava familiarizado com teoria de grupos (HOLTON, 1967-1968, PYENSON, 1980, MILLER, 1997), mas em seu artigo de 1905 ele afirma que a composição de velocidades na direção longitudinal, forma um grupo como era esperado. É bastante provável que sua influência veio deste capítulo.

Na parte 3 (Força), capítulo VI, Poincaré (1902a, p. 100) faz quatro asserções. A quarta afirmação de Poincaré é justamente a inspiração para o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral. Já as três primeiras asserções são justamente os princípios adotados por Einstein em seu *paper* de 1905: a rejeição do espaço e tempo absoluto e a relatividade da simultaneidade. Poincaré não faz uma discussão detalhada sobre a natureza do tempo e da simultaneidade nesse livro, por essa razão ele indica que seus leitores consultem o seu ensaio, de 1898, “*La Mesure du Temps*” (*A Medida do Tempo*).

Pode ser que Einstein e sua academia tenham corrido para encontrar “A Medida do Tempo” em sua forma original (publicada em um periódico francês de filosofia). Isso parece improvável. Mas há uma reviravolta intrigante. Ao contrário das versões em inglês ou francês, os editores alemães de *A Ciência e A Hipótese* traduziam e incluíam um trecho de bom tamanho da conclusão de “Medida do Tempo” como uma nota de rodapé. Assim, em 1904, na Alemanha, a Academia Olympia teria diante de si a negação explícita de Poincaré de qualquer “intuição direta” sobre simultaneidade, sua insistência em que regras que definem simultaneidade eram escolhidas por conveniência e verdade, e seu pronunciamento final: “Todas essas regras e definições são apenas fruto de um oportunismo inconsciente”. De fato, os tradutores do francês para o alemão foram além, fornecendo referências à longa linha de filósofos, físicos e matemáticos que criticaram o tempo absoluto em favor do tempo relativo, como Locke e d'Alembert liderando o caminho e com um dos criadores da geometria não-euclidiana, Lobashevski, relatando que o tempo era apenas “movimento projetado para medir outros movimentos”. Relógio de pêndulo, relógio de primavera, terra girando: os tradutores alemães de Poincaré insistiram que tínhamos a nossa escolha de qual movimento usar como a unidade de tempo que definiria o tempo “*t*” da física. Mas essa escolha não tinha nada a ver com o tempo absoluto. Em vez disso, a escolha ressaltou mais uma vez o argumento de Poincaré para o “oportunismo” na definição física de simultaneidade e duração. (GALISON, 2007, p. 128)

A. Fölsing, afirma que Einstein teve acesso ao texto completo entre 1904 e 1905 junto com seu amigo e colega de trabalho no escritório de patentes, Michele Besso:

Em suas discussões, Einstein e Besso descobriram alguns aspectos do processo de sincronização de Poincaré que podem ter escapado do próprio Poincaré. Como seria - os dois amigos, céticos sobre o “tempo real”, poderiam ter perguntado - se o tempo definido pelo experimento de Poincaré não era apenas um artifício matemático para o “horário local” de Lorentz, mas de fato tudo que um físico poderia esperar de um conceito significativo? É certo que isso daria um “tempo” diferente para

cada sistema inercial, mas a constância da velocidade da luz para qualquer observador seria, nesse caso, inerente à definição de simultaneidade de Poincaré e não teria, como com Lorentz, que ser trazida à força por um ajustamento laborioso para a teoria. (FÖLSING, 1997, p. 176-177)

Até a rejeição do éter, é discutida por Poincaré (1902a). Um fato curioso é que Poincaré não faz nenhuma referência direta ao experimento de Michelson-Morley, mas faz cita as diversas experiências para tentar detectar a velocidade da Terra em relação ao éter e crítica o grande número de hipóteses que foram apresentadas.

E agora permita-me fazer uma digressão; preciso explicar por que não acredito, a despeito de Lorentz, que observações mais exatas tornem evidente qualquer outra coisa além dos relativos deslocamentos de corpos materiais. Foram feitos experimentos que deveriam ter revelado os termos da primeira ordem; os resultados foram inúteis. Poderia ter sido por acaso? Ninguém admitiu isso; uma explicação geral foi procurada, e Lorentz a encontrou. Ele mostrou que os termos da primeira ordem deveriam se anular, mas não os termos da segunda ordem. Então, mais experimentos exatos foram feitos, que também foram negativos; nem isso poderia ser o resultado do acaso. Uma explicação era necessária e estava próxima; eles sempre são; hipóteses são o que nos falta menos. Mas isto não é o suficiente. Quem está lá quem não acha que isso deixa ao acaso um papel muito importante? Não seria também uma chance que essa singular concordância causasse uma certa circunstância para destruir os termos da primeira ordem, e que uma circunstância totalmente diferente, mas muito oportuna, faria com que os da segunda ordem desaparecessem? Não; a mesma explicação deve ser encontrada para os dois casos, e tudo tende a mostrar que essa explicação serviria igualmente bem para os termos da ordem superior, e que a destruição mútua desses termos seria rigorosa e absoluta. (POINCARÉ, 1902a, p. 135)

A procura de uma teoria satisfatória com a eletrodinâmica e o princípio da relatividade que seja exata, é justamente o objetivo de Einstein. O último capítulo, *Eletrodinâmica*, Poincaré discute o atual estado da eletrodinâmica dos corpos em movimento, dando grande ênfase a teoria de Lorentz. É possível que as citações de Einstein a eletrodinâmica de Lorentz, questionados por Keswani (1965a) e Mehra (2001) tenham sido inspirados nesse capítulo e não na leitura do *memoir* de Lorentz. Seja como for, essas citações são suficientes para mostrar que não podemos negar a influência de Poincaré na formação epistemológica (PATY, 2005) e no trabalho científico de Einstein (KESWANI, 1965a, 1965b, AUFRRAY, 1998, MARTINS, 2015).

Outra obra anterior ao artigo de Einstein e que também traz semelhanças com seu *paper* é o livro *O Valor da Ciência*, de Henri Poincaré, publicado no início de 1905. Einstein conhecia essa obra? A exceção de E. Giannetto (1999), Stachel e Howard (2000) e Stachel (2002), não há nenhuma menção na literatura secundária. Tanto Giannetto quanto

Stachel e Howard mencionam uma carta escrita por Solovine a Carl Seelig, em 14 de Abril 1952, que confirma que Academia Olympia leu *O Valor da Ciência*. A publicação alemã do segundo volume dos *Collected Papers of Albert Einstein* (STACHEL, CASSIDY, RENN, SCHULMANN, 1989) confirma essa informação.⁵

O Valor da Ciência é uma coleção de ensaios escritos por Henri Poincaré, entre 1895 e 1904. O livro contém 11 capítulos, distribuídos em 3 partes: *As ciências matemáticas (I-IV)*, *As ciências físicas (V-IX)*, *O valor objetivo da ciência (X-XI)*. A palavra *relatividade* ocorre dez vezes nesse livro. Destes 11 capítulos, cinco abordam questões sobre a relatividade: *II. A Medida do Tempo*, *IV. O Espaço e suas Três Dimensões*, *VII. A História da Física Matemática*⁶, *VIII. A Crise Atual da Física Matemática*, *IX. O Futuro da Física Matemática*. Vejamos como o conteúdo de cada capítulo pode ter contribuído para o paper de Einstein. *A Medida do Tempo* é um artigo escrito em 1898 onde Poincaré discute o problema da simultaneidade e a noção intuitiva do tempo. Segundo Max Jammer (2006), trata-se do primeiro debate sobre relatividade da simultaneidade e do tempo a aparecer na literatura científica. Como foi exposto esse artigo é brevemente mencionado em *A Ciência e a Hipótese*, e é parcialmente reproduzido na tradução alemã. Esse ensaio contém uma análise epistemológica sobre o tempo. Poincaré não apenas afirma, mas demonstra que a simultaneidade entre dois eventos depende do referencial adotado e não é absoluta, já que ela é equivalente a medida do tempo e essa medida é relativa. O conteúdo desse ensaio aparece de forma sucinta no *paper* de Einstein, no primeiro parágrafo *Definição de Simultaneidade*. Curiosamente, Einstein não faz qualquer menção à Poincaré.

Em *O Espaço e suas Três Dimensões* encontramos novamente uma descrição qualitativa sobre teoria de grupos e os grupos de deslocamento. Como mostrou Pyenson (1980), Einstein não estava familiarizado com os aspectos formais da teoria de grupos em 1905, portanto podemos supor que a enigmática referência ao grupo de deslocamento em seu *paper* pode ter surgido das ponderações de Poincaré que aparecem nesta obra e em *A Ciência e a Hipótese*. Os capítulos *A História da Física Matemática*, *A Crise Atual da Física Matemática*, *O Futuro da Física Matemática*, na verdade constituem o conteúdo de uma conferência dada por Poincaré, em setembro de 1904, no congresso de Artes e

⁵ A carta se encontra na SzZE Bibliothek, com o código Hs 304:1006.

⁶ Física-Matemática é um conceitoêmico, no sentido de Hartog (2013). No começo do século XX, o termo Física Matemática era usado para se referir a Física Teórica e não deve ser confundido com a atual Física-Matemática.

Ciências de St. Louis, intitulada *L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique*. Por se tratar de uma palestra a um público de não especialistas, a exposição de Poincaré é completamente qualitativa, mas isso de forma alguma compromete seu nível de análise e os importantes resultados que expõe. No capítulo VII, *VII. A História da Física Matemática*, encontramos a seguinte definição:

O princípio da relatividade, segundo o qual as leis dos fenômenos físicos devem ser as mesmas, quer para um observador fixo, quer para um observador em movimento de translação uniforme; de modo que não temos, nem podemos ter, nenhum meio de discernir se somos ou não levados num tal movimento. (POINCARÉ, 1905a, p. 176-177).

Agora, vejamos como Einstein introduz o seu Princípio da Relatividade,

As leis segundo as quais se modificam os estados dos sistemas físicos são as mesmas, quer sejam referidas a um determinado sistema de coordenadas, quer o sejam a qualquer outro que tenha movimento de translação uniforme em relação ao primeiro. (EINSTEIN, 1905, p. 895).

É notável a semelhança entre os dois enunciados. É importante salientar que antes de Poincaré, ninguém havia definido o princípio da relatividade desta maneira, nem mesmo Galileo (KESWANI, KILMISTER, 1983). Portanto a semelhança de enunciados não pode ser uma simples coincidência. O historiador S. Goldberg (1967) arguiu que o princípio da relatividade de Einstein é diferente de Poincaré, contudo, como mostra Giannetto (1999), Logunov (2004) e Martins (2015), as duas definições são equivalentes. Ainda neste capítulo Poincaré, em uma sessão chamada, *O Princípio da Relatividade*, volta a discutir a sincronização de relógios:

A ideia mais engenhosa foi a do tempo local. Imaginemos dois observadores que desejem acertar seus relógios por sinais ópticos; eles trocam sinais, mas como sabem que a transmissão da luz não é instantânea, tomam o cuidado de cruzá-los. Quando a estação B percebe o sinal da estação A, seu relógio não deve marcar a mesma hora que a da estação A no momento da emissão do sinal, mas essa hora aumentada de uma constante que representa a duração da transmissão. Suponhamos, por exemplo, que a estação A envie seu sinal quando seu relógio marca a hora zero, e que a estação B o perceba quando seu relógio marca a hora t . Os relógios estão acertados se o atraso igual a t representar a duração da transmissão, e, para verificá-lo, a estação B expede por sua vez um sinal quando seu relógio marca zero; a estação A deve então percebê-lo quando seu relógio marcar t . Então os relógios estão acertados. E, de fato, eles marcam a mesma hora no mesmo instante físico, mas com a condição de estarem fixas as duas estações. Caso contrário, a duração da transmissão não será a mesma nos dois sentidos, já que a estação A, por exemplo, vai ao encontro da perturbação óptica emanada de B, enquanto a estação B foge diante da perturbação emanada de A. Portanto, os relógios acertados desse modo não marcarão o tempo verdadeiro; marcarão o que podemos chamar de tempo local, de modo que um deles se atrasará em relação ao outro.

Pouco importa, já que não temos nenhum meio de perceber isso. Todos os fenômenos que se produzirem em A, por exemplo, estarão atrasados, mas todos terão o mesmo atraso, e o observador não perceberá, já que seu relógio atrasa; assim, como manda o princípio de relatividade, ele não terá nenhum meio de saber se está em repouso ou em movimento absoluto. (POINCARÉ, 1905a, p. 187)

O processo de sincronização e quebra de sincronia para observadores em movimento, é o mesmo que Einstein descreve no parágrafo 1, *A definição de simultaneidade*. A interpretação de diferentes medidas de tempo aparece no parágrafo 2, *A relatividade de comprimentos e tempos*. O processo descrito por Poincaré é exatamente o mesmo adotado por Einstein. Nos capítulos VIII e IX, Poincaré continua a abordar as consequências e a importância do princípio da relatividade. Diferente de *A Ciência e a Hipótese*, a experiência de Michelson-Morley é discutida forma bastante detalhada em *O Valor da Ciência*. Poincaré mostra como essa experiência é um importante resultado a favor do Princípio da Relatividade. O reforça a tese que o experimento de Michelson-Morley teve um papel importante na construção da relatividade, diferente do que afirma Holton (1969). Por fim, mas não menos importante, os capítulos VII, VIII e IX, dão grande ênfase a teoria de Lorentz, principalmente ao *memoir* de 1904, sempre estabelecendo uma conexão com princípio da relatividade. É possível que a suspeita de Keswani (1965a, 1965b) e Mehra (2001) de que Einstein conhecia o ensaio de Lorentz de 1904, possa ser explicada como resultado de um conhecimento indireto do trabalho de Lorentz devido a leitura desse livro por Einstein e seus colegas.

Em síntese, está claro que Einstein conhecia os trabalhos de Poincaré, e o conteúdo desses trabalhos estava intimamente ligado ao seu *paper* de 1905. Não há como negar que estes trabalhos do de Poincaré não tenham influenciado Einstein. Como vimos, há muita similaridade nas ideias e arguições dos dois pesquisadores. O que não está claro é o porquê de Einstein nunca fazer menção a Poincaré e de ter negado enfaticamente ter tido contato com seus trabalhos antes da publicação do seu paper.

1.4. A Formação Epistemológica de Einstein

Vimos que a experiência de Michelson-Morley e os trabalhos de Lorentz e Poincaré continham elementos substanciais para a construção da relatividade de Einstein. Pode-se dizer que estes compuseram a formação científica de Einstein. Porém, um elemento bastante importante da relatividade de Einstein foi seu hibridismo epistemológico: que variava do convencionalismo de Poincaré ao operacionalismo positivista de Mach,

Pearson e Ostwald. Quais elementos o levaram a essa concepção? Para responder essa pergunta devemos estudar a sua formação inicial.

De acordo com sua irmã Maja Einstein-Winteler (BECK, HAVAS, 1987), Einstein sempre mostrou bastante predileção pela matemática, sendo incentivado muito por seu tio Jakob Einstein que era engenheiro eletricitista. Posteriormente, Einstein conheceu Max Talmud (que escreveu uma biografia de Einstein sobre o pseudônimo de Talmey), que também o incentivou no estudo da matemática e na leitura de filosofia, principalmente Kant. (TALMEY, 1932, BECK, HAVAS, 1987). No verão 1895, Einstein tentou ingressar na Politécnica de Zurique, mas reprovou no exame. Einstein optou por ficar em Aarau e fazer o colegial para que pudesse ingressar na Politécnica. Nessa época ele residia com a família Winteler, e passou a namorar a filha de seus anfitriões: Marie Winteler. (ISAACSON, 2007, MARTINS, 2015). Em 18 de setembro de 1896, Einstein escreveu um pequeno ensaio intitulado *Meus planos futuros*, que transcrevemos abaixo:

Um homem feliz está muito satisfeito com o presente para ponderar demais sobre o futuro. Mas, por outro lado, os jovens gostam especialmente de contemplar projetos ousados. Além disso, é natural que um jovem sério visualize seus objetivos desejados com a maior precisão possível. Se eu tiver sorte e passar com sucesso nos meus exames, vou me inscrever na escola politécnica de Zurique. Ficarei lá quatro anos para estudar matemática e física. Suponho que me tornarei professor desses ramos da ciência natural, optando pela parte teórica dessas ciências. Aqui estão as razões que me induziram a esse plano. Primeiramente, e acima de tudo, minha inclinação individual para o pensamento abstrato e matemático, falta de imaginação e talento prático. Meus desejos também trouxeram o mesmo objetivo me levou à mesma decisão profissional. Isso é bem natural; todo mundo gosta de fazer aquilo pelo qual ele tem talento. Além disso, também sou muito atraído por uma certa independência oferecida pela profissão científica. (EINSTEIN, 1896, p. 15-16)

Esse pequeno ensaio já mostra uma inclinação de Einstein para a física teórica e a matemática. Na Politécnica de Zurique, Einstein tentaria se dedicar a física experimental, mas acabaria se frustrando e retornando ao seu plano original (ISAACSON, 2007). Einstein também parecia animado em ampliar seus conhecimentos em matemática e por isso se matriculou em um curso de matemática avançada de Minkowski (PYENSON, 1980), contudo, assim como na física experimental, Einstein se frustrou. “A experiência de Einstein com a exposição de Minkowski da matemática pura teria reforçado sua opinião de que era de pouca utilidade para o físico.” (PYENSON, 1980, p. 422) Einstein manteria essa opinião até 1912, quando ele admitiu que a construção de uma teoria da relatividade geral exigiria um ferramental matemático mais elaborado (MEHRA, 1974,

PYENSON, 1980, ISAACSON, 2007, MARTINS, 2015). Nessa época Einstein também começou a ler Boltzmann e ficou impressionado com a sua simplicidade e intuição física (EINSTEIN, 1901). Nesse período Einstein começou a sua formação, um físico teórico que dava grande ênfase a simplicidade e a intuição e usava somente o necessário da matemática (EINSTEIN, p. 1982). Einstein também salienta ter sido influenciado pelo filósofo da ciência Ernst Mach:

Foi Ernst Mach quem, com sua *History of Mechanics*, revolucionou essa crença dogmática. Esse livro exerceu em mim uma influência profunda quando era ainda estudante. Vejo a grandeza de Mach no seu ceticismo e incorruptível independência; contudo, na minha juventude, a posição epistemológica de Mach influenciou-me acentuadamente (EINSTEIN, 1982, p. 29).

Porém, Paul Feyerabend em um estudo comparado⁷ sobre a posição epistemológica de Mach e de Einstein, conclui que Einstein se afasta de Mach, pois enquanto este adota uma posição epistemológica racionalista dialética, Einstein se ateve a um positivismo irracional. “Planck e Einstein não só usaram partes do positivismo que Mach criticava, não só se opuseram a Mach nas áreas onde não existia nenhum conflito real, mas ocasionalmente se opunham um ao outro ou pelo menos faziam declarações sugerindo essa oposição” (FEYERABEND, 2010, p. 250). Essa posição positivista também é defendida por Martins (2015, p. 255) que declara: “Einstein, em 1905, adotou a posição de que aquilo que não pode ser detectado deveria ser excluído da física. Essa é uma postura epistemológica *empirista*, ou *positivista*.”

Outra contribuição na formação epistemológica de Einstein se daria após formado, graças a Academia Olympia, fundada em 1902. Como vimos, na academia, Einstein discutiu Mach, Pearson, Hume, que pertenciam ao empirismo (SOLOVINE, 2011) e Henri Poincaré, que defendia uma posição epistemológica conhecida como convencionalismo: que os experimentos são parte essenciais da ciência, porém só fazem sentido dentro um conjunto de convenções e afirmações que não podem ser provadas. Einstein também conhecia os trabalhos do químico e empirista radical Wilhelm Ostwald, tendo inclusive intencionado trabalhar junto dele. (MARTINS, 2015). Segundo Miller (1997) e Paty (2001), em 1905, Einstein não tinha uma posição epistemológica muito clara. Einstein apresentava um hibridismo epistemológico: algumas vezes, Einstein adotava uma posição empirista, mais precisamente, o operacionalismo positivista, outras vezes se baseava em algumas perspectivas do convencionalismo de Poincaré, outras se

⁷ Conferir *Adeus à Razão* (FEYERABEND, 2010, p. 231-262).

baseava no racionalismo e no realismo. A concepção do operacionalismo defende que somente aquilo que pode ser medido em laboratório deve ser levado em consideração em uma teoria física, qualquer conceito metafísico, por mais útil que seja, deve ser rejeitado, inclusive o próprio éter. (MARTINS, 2015). A influência dessa epistemologia pode ser visto nos ensaios de 1905 de Einstein, ao observarmos que ele apenas se propunha em descrever os fenômenos físicos, isto é, apenas mostrava *como* eles deveriam ocorrer, sem fazer hipóteses sobre as suas causas (MARTINS, 2015).

1.5. O Artigo de Einstein: o que são postulados?

Depois de termos feito uma breve investigação das influências científicas e epistemológicas, vamos analisar a forma como Einstein estruturou seu artigo. O trabalho de Einstein foi alicerçado em dois postulados (Einstein, 1905):

I) O Princípio da Relatividade

II) A Constância da Velocidade da Luz

Por que Einstein optou em apresentar seu trabalho na forma de postulados? Para responder essa pergunta, inicialmente, devemos entender o que são postulados. Postulados são afirmações tomadas como verdades que não podem ser demonstradas ou testadas pela própria teoria. (PIRES, 2011). Aqui devemos ter um certo cuidado: o fato de um postulado ser uma verdade que não pode ser provada na teoria, não indica que ele não possa ser testado, apenas implica que a teoria não irá fornecer resultados experimentais que permitam validar o postulado (MARTINS, 2015). Ao longo do desenvolvimento da física e da matemática muitos autores adotavam o tratamento axiomático. Um dos primeiros registros do método axiomático se encontra na coleção *Os Elementos* de Euclides de Alexandria (~300 a.C), que embora não fosse uma obra original apresentava todo conhecimento de geometria sabido pelos helênicos daquela época (COURANT, ROBINS, 2000). O método adotado por Euclides é chamado de método axiomático e pode ser descrito do seguinte modo:

[...] Provar um teorema em um sistema dedutivo consiste em demonstrar que o teorema é uma consequência lógica necessária de algumas proposições anteriormente provadas; estas, por sua vez, devem ser elas próprias provadas; e assim por diante. O processo de demonstração matemática seria portanto a tarefa impossível de uma regressão infinita a menos que, nesta regressão, fosse permitido parar em algum ponto. Assim deve haver uma série de afirmativas, chamadas de postulados ou axiomas, aceitos como verdadeiros e para os quais não se exige prova. A partir destes, podemos tentar deduzir todos os outros

teoremas por meio de raciocínios puramente lógicos. Se os fatos de um campo científico são colocados em uma ordem lógica tal que se possa mostrar que todos decorrem de um certo número de enunciados escolhidos, então diz-se que o campo é apresentado de forma axiomática. (*Ibid*, p. 262).

Euclides em seus *Elementos* realizava a construção de toda geometria plana usando um conjunto de cinco postulados e três noções primitivas. O trabalho de Euclides foi considerado como uma referência para demonstração rigorosa e inspirou outras áreas do conhecimento. Isaac Newton em seu *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) adotou o método axiomático para construção de uma mecânica. Dez anos antes, o filósofo Baruch Espinoza também adotava o método axiomático para compor sua obra *Ethica, ordine geometrico demonstrata* (1677). Apesar de ter inspirado obras dentro e fora da matemática, “o método axiomático traz poucos benefícios, a não ser que os postulados sejam simples e poucos numerosos.” (COURANT, ROBINS, p.262, 2000). Devido a essa desvantagem e a expansão do método baconiano, o método axiomático começou a perder força ainda no século XVII.

1.6. A Origem dos Postulados de Einstein

Quando Einstein publicou seu artigo (1905), era muito raro publicações de natureza axiomática. Fora isso, este era um método empregado pelos racionalistas e como vimos a postura epistemológica de Albert Einstein era híbrida de várias correntes filosóficas, visto que nesta época ele estava sobre forte influência de Hume, Mach, Pearson, Ostwald, Poincaré (MARTINS, 2015), assim surge uma pergunta muito relevante: por que Einstein estruturou seu trabalho de 1905 em dois postulados? *As Notas Autobiográficas* de Einstein contém algumas indicações interessantes, porém advertidos por Martins (2015, p.275) fizemos uma leitura cautelosa, expondo fatos que são corroborados por alguns biógrafos próximos como Talmey (1932) e Pais (1982). Vejamos a primeira indicação:

Aos doze anos experimentei minha segunda sensação de espanto, de natureza completamente diversa da primeira, provocada por um livrinho de geometria plana de Euclides, que veio ter às minhas mãos no início do ano escolar. Ali estavam afirmações como, por exemplo, a intersecção das três alturas do triângulo num determinado ponto que - embora não fosse evidente - podia ser provada com tal certeza que qualquer dúvida estava fora de cogitação. Esta certeza lúcida impressionou-me profundamente. O fato de os axiomas serem aceitos sem prova não me perturbou. De qualquer forma, era bastante poder basear as provas em proposições cuja validade me parecia livre de qualquer dúvida. (EINSTEIN, 1982, p. 13).

Este relato permiti assumir que Einstein sofreu influência de Euclides e seu método axiomático. Contudo, essa impressão poderia não ser suficiente para influenciar a estruturação de seu artigo. Outro motivo que pode ter levado Einstein a escolha de axiomas está na própria utilidade do mesmo era a simplicidade parece ter sido um requisito para construção do artigo, como vemos na seguinte frase: “Quanto maior a simplicidade das premissas, mais impressionante é a teoria, maior o número de coisas diferentes com as quais se relaciona e mais extensa sua área de aplicação”. (EINSTEIN, 1982, p.25).

Considerando que o princípio da inércia e a forma invariante da equação da onda eram pressupostos aceitos em teorias que adotavam o éter e referenciais em repouso absoluto, Einstein não tinha o direito de usar o princípio da razão suficiente. Eles deveriam ser assumidos como postulados, já que não podem ser deduzidos dos outros dois axiomas. Outra obra que pode ter influenciado a estruturação do artigo é o livro *Ethica, ordine geometrico demonstrata* de Espinoza que também aplicava o método axiomático. Solovine (2011) recorda que a academia Olympia estudou os racionalistas Hume e Espinoza, além disso é bem sabido que Einstein admirava Espinoza. Quanto a escolha dos postulados, quais foram os critérios adotados por Einstein?

Devo abordar algumas generalidades sobre o ponto de vista crítico que pode ser aplicado às teorias físicas. O primeiro é óbvio: a teoria não deve contradizer os fatos empíricos. Por mais evidente que seja essa exigência, sua aplicação é bastante complexa. Pois é possível, muitas vezes, talvez até sempre, conservar um fundamento teórico geral adaptando-o aos fatos, adicionando-se pressupostos artificiais. Entretanto, em qualquer caso, este primeiro ponto de vista refere-se à confirmação do fundamento teórico por meio dos fatos empíricos disponíveis. (EINSTEIN, 1982, p. 19).

Este primeiro critério contém alguns pontos interessantes sobre a abordagem de Einstein. Na época em que Einstein escreveu estas notas ele já havia abandonado uma posição empirista radical, pode-se dizer que em 1905, Einstein julgava necessário que os seus postulados apresentassem mais do que concordância entre a teoria e os dados empíricos, mas fossem considerações obtidas puramente por dados empíricos.

O segundo ponto de vista não diz respeito ao relacionamento com a observação, mas com as premissas da própria teoria, ou aquilo que pode ser descrito como a “naturalidade” ou “simplicidade lógica” das premissas (os conceitos básicos e sua relação mútua). Este ponto de vista, cuja formulação exata apresenta grandes dificuldades, desempenhou papel importante na seleção e avaliação das teorias desde tempos imemoriais. O problema não se restringe a uma espécie de enumeração das premissas logicamente independentes (se isso fosse

possível sem ambiguidade), mas a um tipo de avaliação recíproca das qualidades incomensuráveis. Além disso, entre as teorias com bases igualmente “simples”, deve ser considerada superior àquela que delimita de modo mais definido as qualidades dos sistemas, que, de outro modo, seriam impraticáveis isto é, contêm afirmações mais específicas). (EINSTEIN, 1982, p. 19-20).

Como enfatiza Martins (2015, p. 226): “não há dúvidas que a nova forma de apresentar a teoria e fazer as deduções foi uma importante contribuição. Note-se, no entanto, que a mesma coisa ocorre, normalmente, quando se elabora uma versão didática de uma teoria científica.”. Em outras palavras, a abordagem de Einstein tinha a vantagem de ser mais simples que a desenvolvida por Lorentz e Poincaré (LAUE, 1911).

1.7. A Fundamentação dos Postulados

Como discutimos na sessão 5, quando Albert Einstein redigiu seu primeiro trabalho sobre a relatividade, no ano de 1905, ele estava sobre forte influência dos positivistas como Mach e Ostwald, e adotou uma postura radicalmente empirista, admitindo que o levou a propor a rejeição do éter (MARTINS, 2015). De acordo com a postura epistemológica adotada por Einstein, o desenvolvimento de seu programa deveria ser rigorosamente justificado por experimentos, incluindo os seus dois postulados, a saber:

I) O Princípio da Relatividade: “As leis segundo as quais se modificam os estados dos sistemas físicos são as mesmas, quer sejam referidas a um determinado sistema de coordenadas, quer o sejam a qualquer outro que tenha movimento de translação uniforme em relação ao primeiro.” (EINSTEIN, 1905, p.895).

II) A Constância da Velocidade da Luz: “Qualquer raio de luz move-se no sistema de coordenadas <<em repouso>> com uma velocidade determinada V , que é a mesma, quer esse raio seja emitido por um corpo em repouso, quer o seja por um corpo em movimento.” (EINSTEIN, 1905, p.895).

A nossa análise histórica mostrou que o primeiro postulado foi enunciado por Henri Poincaré, Como vimos, esse postulado apareceu na primeira vez no livro *A Ciência e a Hipótese*, com o nome de *lei da relatividade*, e, posteriormente, em *O Valor da Ciência*, como *princípio da relatividade*. Também sabemos que Einstein estudou a obra de Poincaré, por isso não há dúvidas que o primeiro postulado foi uma influência direta das ideias de Poincaré.

Outro autor que discutiu o princípio da relatividade, foi Föpl em seu livro “*Introdução à teoria da eletricidade de Maxwell*”. Sabe-se que Einstein se dedicou a

leitura desse livro (HOLTON, 1966). Um fato particularmente interessante é que as discussões sobre a relatividade do movimento, são discutidas por Föpl no capítulo 5, intitulado “*A eletrodinâmica de condutores em movimento*” (HOLTON, 1966, MARTINS, 2015), nome semelhante ao adotado por Einstein em seu primeiro artigo sobre a relatividade “*A eletrodinâmica dos corpos em movimento*”. É seguro afirmar que para a escolha do seu primeiro postulado, Einstein não apenas levou em consideração seu conteúdo empírico, mas também considerações levantadas por Poincaré e Föpl (MARTINS, 2015). Se o primeiro postulado era justificado pela experiência, o mesmo não podia ser dito sobre o segundo postulado.

Em 1900 não existiam experimentos terrestres sobre a constância de c , estudando fontes luminosas de alta velocidade. Foi apenas em 1919 que o físico italiano Quirino Majorana (1871-1957) publicou as primeiras evidências de laboratório desse tipo. (MARTINS, 2015, p. 250).

Portanto, qual foi a justificativa empregada por Einstein adoção deste postulado? Curiosamente, nenhuma, embora a atitude epistemológica adotada por Einstein exigisse tal justificativa, como observa Martins (2015, p.250):

Pode-se dizer que o postulado da constância da velocidade da luz era o menos revolucionário dos pressupostos de Einstein, pois seria aceitável à maioria dos físicos que aceitavam o éter e a teoria ondulatória da luz, a partir de meados do século XIX. No entanto, quando se pensa que Einstein simultaneamente estava negando o éter, torna-se difícil compreender como ele poderia justificar esse postulado.

Uma das razões para Einstein escolher seu segundo postulado como o princípio da constância da velocidade da luz pode ter sido a influência da obra do físico Woldemar Voigt. Em 1901, Einstein escreveu a Mileva Maric: “o tempo livre que me sobra, consagro-o ao estudo da física teórica de Voigt. Já aprendi muitas coisas lendo o seu livro (EINSTEIN, 1993, p. 117). Em 1887, Voigt escreveu um trabalho intitulado “*Sobre o Princípio Doppler*” e que trazia quatro resultados que se tornaram fundamentais na física moderna (ERNSTY, HSU, 2001, p.311):

- a) o conceito de universalidade da velocidade da luz;
- b) a invariância da equação da onda para um meio elástico incompressível (éter) e que ele usa para derivar o efeito Doppler da luz;
- c) que a mudança de frequência Doppler é incompatível com o conceito de tempo absoluto newtoniano, exigindo a existência de um tempo relativo (ou local);
- d) obteve um conjunto de transformações de coordenadas que podem ser consideradas ancestrais históricas ou protoideias das transformações de Lorentz.

Voigt retoma esses tópicos em seu livro de física teórica, anteriormente citado por Einstein (AUFFRAY, 1998). É possível perceber semelhanças entre a abordagem de Einstein e Voigt, no que diz respeito ao emprego da constância da velocidade da luz para dedução dos fenômenos relativísticos, por isso é razoável assumir que o trabalho de Voigt tenha sido importante influência para Einstein, inclusive na escolha de seu segundo postulado. Como já mostramos, Martins (2015) considera esse postulado o menos revolucionário, pois se tratava apenas de uma propriedade aceita por todos partidários da teoria ondulatória da luz e da eletrodinâmica de Maxwell. Logunov (2004) criticou o segundo postulado defendendo que ele era uma consequência do princípio da relatividade.

É necessário enfatizar especialmente que o princípio da constância da velocidade da luz, sugerido por A. Einstein como o segundo postulado independente, é realmente uma consequência especial das exigências do princípio da relatividade de H. Poincaré. Este princípio foi estendido por ele para todos os fenômenos físicos. Para se convencer disso, basta considerar os requisitos do princípio da relatividade para um processo elementar - a propagação da onda esférica eletromagnética. (LOGUNOV, 2004, p. 40).

Outra possibilidade foi a experiência de Einstein com as teorias da emissão. Nesse modelo, a velocidade da luz depende da velocidade da fonte emissora (DARRIGOL, 1996). Einstein realizou pesquisas nesse campo, mas a dependência da velocidade da luz com a velocidade da fonte, conduziu Einstein a equações complicadas que o levaram a abandonar sua pesquisa (DARRIGOL, 1996). Podemos conjecturar que Einstein escolheu seu segundo postulado como uma forma de contornar as complicações que ele teve durante sua pesquisa na teoria da emissão. Nesse caso, a justificativa para o segundo postulado era o oportunismo epistemológico.

Por fim, é importante salientar que os dois postulados adotados por Einstein não são suficientes para garantir a consistência da Teoria. Em 1922, Painléve mostrou que era necessário introduzir o princípio da inércia para garantir a unicidade das transformações de Lorentz (PAINLÉVE, 1922, DUGAS, 1988). Fock (1959), demonstrou que a unicidade da Transformação de Lorentz também é garantida se enunciarmos junto ao princípio da relatividade, dois postulados: *a forma invariante da equação da onda e o princípio da inércia*. Portanto, o trabalho de Einstein sobre a relatividade reflete que as suas ideias e concepções epistemológicas ainda não estavam bem formadas. Einstein sugere em seu ensaio estar adotando uma posição operacionalista, porém exceção do primeiro postulado, que era justificado por inúmeras experiências, o segundo postulado e os postulados não enunciados eram todos concepções *a priori*, incompatíveis com

operacionalismo. Por outro lado, Einstein demonstra em sua eletrodinâmica posições realistas, ao tentar estabelecer conexões entre os princípios relativísticos com objetos reais. Ao mesmo que algumas inconsistências de sua eletrodinâmica surgem de uma aplicação equivocada do convencionalismo de Poincaré.

1.8. Considerações Finais

Nessa pequena análise, identificamos alguns elementos essenciais na construção da relatividade de Einstein. Diferente das versões populares, essa teoria não surgiu de um *insight* súbito, mas foi o resultado da colaboração de diversos pesquisadores e do amadurecimento de ideias de Einstein. Talvez o próprio Einstein tenha uma parcela de culpa na propagação desse mito já que seu *paper* não traz nenhuma referência, citações breves a Lorentz e Maxwell, e as declarações posteriores de Einstein omitem e negam a influência de Poincaré e o experimento de Michelson-Morley. Por que Einstein tomou essa atitude? Essa é uma questão que pode ser esclarecida estudando alguns aspectos pessoais da vida de Einstein, mas que está fora do âmbito desse texto.

Do ponto de vista epistemológico, Einstein adotou uma posição epistemológica híbrida: ora como um positivista operacional, semelhante à de André Marie Ampère (1887), que propunha apresentar apenas os processos, sem indagar sobre as suas causas. Ora como convencionalista, propondo que escolhas de quadros de referência deveria ser feita conforme a comodidade do pesquisador. Ora como realista buscando corresponder as propriedades da energia como momento e a inércia como propriedades ponderáveis, diferente de Poincaré que associava essas características da energia a um fluido fictício abstrato. Ora como um racionalista, utilizando o pequeno conjunto de axiomas (princípios assumidos como verdadeiros) e obtendo teoremas e outras consequências lógicas.

As declarações de Einstein são extremamente dúbias. Nunca mencionava a influência de Poincaré e quando indagado se conhecia seus trabalhos antes de 1905, Einstein era enfático ao dizer que não. Porém, documentos e declarações de pessoas próximas o contradizem. Sobre a experiência de Michelson-Morley, Einstein ora declarava que conhecia, ora declarava que não conhecia. As contradições na declaração de Einstein se tornaram tão famosas que são abordadas no curso de historiografia de Kragh (2010). A inexistência de um manuscrito original e de rascunhos ou cartas mais detalhadas sobre seus ensaios de 1905, torna a questão de compreender a origem de seus trabalhos ainda mais difícil. A nossa análise sobre os fundamentos da teoria da

relatividade força-nos a concordar com Feyerabend (2011), que muitas vezes o progresso de um trabalho científico exige a ruptura das regras impostas, um hibridismo ou oportunismo epistemológico e metodológico. Como mostrou Keswani (1965b) diversas vezes Einstein entra em contradição com o seu segundo postulado, a constância da velocidade da luz, e opta em desrespeita-la para conseguir obter os resultados desejados. Se ele fosse estritamente fiel ao segundo postulado, ele não teria progredido em seu exame. A nossa análise histórica da fundamentação da relatividade de Einstein converge à epistemologia L. Fleck (1986) que afirma que gênese e a formação de um fato científico é um produto, não apenas da lógica interna da ciência, mas uma construção social. Como vimos, diversas foram as influências sofridas por Einstein e todas elas estão, de alguma forma, presentes no *paper* da relatividade de 1905.

Portanto, se em 1905, quando Einstein publicou seu primeiro ensaio, a relatividade já estava em um grau avançado de desenvolvimento, quais foram os problemas científicos, sociais e humanísticos que levaram a sua emergência por Lorentz e, principalmente Poincaré? Quais as contribuições que estes autores deram para Teoria da Relatividade antes de Einstein? Quais eram as diferenças entre abordagem de Poincaré e Einstein? Por que a abordagem de Einstein triunfou enquanto a abordagem de Poincaré foi obscurecida? Existe alguma diferença epistemológica que justifique a superioridade da abordagem de Einstein? Para respondermos a essas questões, precisamos realizar uma leitura histórica das contribuições de Lorentz e Poincaré. Essa é a leitura que faremos nos próximos capítulos. Registre-se que essa análise exige uma circulação de ideias entre a cultura científica e a cultura social e humanística, por isso, para fazê-la, utilizaremos a epistemologia de Fleck.

2. CAMINHO TEÓRICO-METODOLÓGICO DE INVESTIGAÇÃO

2.1. Referencial Teórico

O referencial adotado para esse projeto é a epistemologia de Ludwik Fleck (1896-1961). Uma vez que a epistemologia de Fleck também enfatiza os aspectos sociais e o contexto histórico do desenvolvimento do conhecimento científico, é relevante conhecer sobre quais condições Fleck desenvolveu sua epistemologia. A apresentação da vida e obra de Fleck que faremos é baseado no texto de Schäfer e Schnelle (2001) que compõe a *Introdução* da edição brasileira da obra de Fleck, *Gênese e Desenvolvimento de um Fato Científico*.

Ludwik Fleck nasceu no dia 11 de julho de 1896, em Lwów, Polônia. Filho de judeus-poloneses, Fleck cresceu em um ambiente cultural plural, em grande parte pelas guerras com o império austro-húngaro que promoveram o movimento de imigrantes, com isso uma circulação cultural. Em 1914, Fleck concluiu o ginásio polonês, era fluente em alemão e matriculou-se no curso de medicina da Universidade Jan Kazimierz. Fleck demonstrava grande interesse problemas de pesquisa microbiológica, por isso em 1920, se tornou assistente de Rudolf Weigl, especialista em tifo, no Laboratório de Pesquisa para Doenças Infecciosas, em Przemyśl. Fleck permaneceu até 1923 como assistente de Weigl, inclusive acompanhando-o quando Weigl assumiu a cátedra de biologia da Faculdade de Medicina da Universidade de Lwów. Devido ao período de instabilidade em que a Europa se encontrava, agravado pelas duas grandes guerras mundiais, Fleck não voltaria aos quadros acadêmicos antes de 1939 e a sua obra epistemológica *Gênese e Desenvolvimento de um Fato Científico*, publicada em 1935, não conseguiu se expandir para o restante da Europa, até ser redescoberta na década de 60 por Thomas Kuhn.

Iremos focar as atividades profissionais e intelectuais que ele exerceu entre 1924 até 1935. Como vimos, entre 1920 e 1923, Fleck havia assistido Rudolf Weigl. Durante esse período, Fleck e Weigl desenvolveram o procedimento de reação cutânea para o diagnóstico de tifo (Reação de Xantina). Em 1923, Fleck fundou seu próprio laboratório bacteriológico, porém continuou trabalhando para outros laboratórios alemães, até 1935, quando resolveu se dedicar exclusivamente ao seu laboratório.

Fleck deixou o cargo de assistente para dirigir o Laboratório Químico-Bacteriológico do Departamento de Medicina Interna do Hospital Geral de Lwów, até 1925, e, em seguida, o Laboratório Bacteriológico do Departamento de Doenças

Dermatológicas e Venéreas do mesmo hospital, até em 1927. Considerando que a epistemologia de Fleck usa como tema gerador a evolução do conceito de sífilis, pode-se considerar que este período foi essencial para o desenvolvimento de suas ideias. No estudo da sífilis, Fleck usou a sua experiência com Weigl para desenvolver diagnósticos aprimorados de sífilis, lúbulos e tuberculose.

Em 1927, Fleck realizou um período de estudos no Instituto Governamental de Soroterapia, em Viena, sobre a supervisão do professor R. Krauss. Retornando a Lwów no ano seguinte (1928), Fleck dirigiu o Laboratório de Bacteriológico do Seguro de Saúde até 1935, quando passou a trabalhar exclusivamente em seu laboratório bacteriológico particular. Analisando a produção científica de Fleck entre 1922 e 1935, constatamos que seu principal interesse era a sorologia. Entre 1922 e 1939, Fleck publicou um total de 37 trabalhos, a maioria sobre sorologia.

A contribuição de Fleck para a epistemologia, antes de 1935, foi bastante modesta. Em 1926, ele conduziu uma palestra sobre o pensamento médico, que foi publicada em forma de artigo em 1927. Em 1929, Fleck publicou um artigo em alemão intitulado *Sobre a Crise da Realidade*. Nesse artigo, Fleck começa a estabelecer uma epistemologia da ciência que não se esgota na Medicina, mas pode ser usada para compreender as ciências naturais e tem um caráter bastante sociológico. Nesse sentido, é correto afirmar que Fleck é um dos precursores da sociologia da ciência (e de certa maneira, até dos estudos sociais da ciência).

Como Fleck, médico e pesquisador em sorologia, acabaria se interessando para a epistemologia? Seguindo a sua própria concepção de que o contexto é um dos fatores cruciais na formação intelectual, podemos citar que a atmosfera intelectual em que Fleck cresceu foi de grande importância. Como expusemos no começo, as guerras e instabilidades com império austro-húngaro, forneceram um ambiente plural e multidisciplinar. A proximidade e a hostilidade da Polônia com a Áustria, permitiu que Fleck entrasse em contato com as ideias dos filósofos do círculo Viena. Mesmo que Fleck viesse a contestar a epistemologia austríaca, é inegável que o círculo de Viena era uma inspiração para os intelectuais. Karl Popper, um dos vienenses, havia alcançado grande prestígio com a publicação de sua obra *Lógica da Pesquisa Científica*. Outro vienense cujas obras também impactaram o ambiente intelectual, mas que se opunha ao círculo de Viena, foi Ludwig Wittgenstein que defendeu a importância da semiótica e da Gestalt nos processos de pensamento e construção do conhecimento.

Nos laboratórios que Fleck dirigiu, o ambiente intelectual não era restrito às técnicas, mas incentivava o pensamento interdisciplinar. Isso fica claro na palestra de 1926 de Fleck sobre o pensamento médico, onde ele reflete a práxis médica e sintetiza as ideias humanísticas que circulavam entre seus colegas da saúde. Em 1928, como vimos, Fleck foi para Viena fazer um estágio com Krauss, em Viena. Estando na *alma matter* do círculo de Viena, Fleck pode se aproximar ainda mais do ambiente intelectual e das discussões entre os vienenses, da tendência de Popper e seus críticos, como Wittgenstein. A formação de Fleck em um ambiente multidisciplinar e seu contato com o círculo de Viena parecem estar entre as principais razões pelo seu interesse na epistemologia, em paralelo com a sorologia e a medicina. Também não podemos deixar de mencionar, apesar das controvérsias, sobre a influência da Escola Polonesa de Medicina na formação de Fleck.

Mas, de acordo com Da Ros (2000), apesar de não ser corroborada por muitos biógrafos de Fleck, a Escola Polonesa de Filosofia da Medicina teve grande influência na epistemologia fleckiana defendida por Ilana Lowy. Ainda de acordo com o autor, o motivo por muitos discordarem deve ser porque a escola de filosofia da medicina estava na periferia do mundo, portanto, a elite intelectual do mundo não tinha muito conhecimento e que quando procuramos entender os originais de Fleck e os referenciais da escola, na qual ele estudou e conviveu, pode-se concluir que Ilana Lowy tinha razão. (QUEIRÓS, 2012, p. 80).

Agora que compreendemos o contexto em que Fleck se encontrava, vamos apresentar a epistemologia de Fleck. Para isso precisamos estudar as suas categorias epistemológicas (FLECK, 2001): *estilo de pensamento; coletivo de pensamento; circulação intercoletiva e intracoletiva de ideias e prática; conexões passivas e ativas; harmonia das ilusões; instauração, extensão e transformação de estilos de pensamento*. Fleck adota uma perspectiva realista crítica, por isso para ele um fato científico não se esgota em sua lógica interna, mas também é um produto social. Esse produto é condicionado por fatores externos de naturezas humanas, sociais e psíquicas. O conjunto de normas, termos técnicos, práticas e a própria linguagem empregada pela ciência em um determinado período forma o que se chama de *estilo de pensamento*, que Fleck define como sendo

[...] um perceber dirigido com a correspondente elaboração intelectual e objetiva do percebido. Fica caracterizado pelos traços comuns dos problemas que interessam ao coletivo de pensamento, pelos juízos que o pensamento coletivo considera evidentes e pelos métodos que emprega como meio de conhecer. O estilo de pensamento também pode existir acompanhado pelo estilo técnico literário do sistema de saber (FLECK, 1986, p.145).

A epistemologia fleckiana vai além da visão internalista, pois também admite que a relação sujeito-objeto é condicionada por elementos sociais. Para Fleck os pressupostos sociais, históricos, apriorísticos, lógicos, racionais, místicos e congêneres são intrínsecos ao EP e formam as *conexões ativas*, enquanto as leituras, estudos e congêneres que são assimilados pelo sujeito no estudo do objeto representam as *conexões passivas*. Fleck defende que o conhecimento científico é um fenômeno dialético dos elementos históricos e sociais e os fatores lógicos e não uma concepção espontânea e aleatória.

[...] Quando se leva em conta essas relações gerais da história cultural e as particulares da história do conhecimento, limita-se significativamente o convencionalismo. No lugar da escolha livre e racionalista, surgem condições específicas. Mesmo assim, encontram-se sempre no conteúdo do conhecimento outras relações que não se explicam psicologicamente (seja no plano individual, seja no coletivo), nem historicamente. Por isso, elas passam a impressão de serem relações “reais”, “objetivas” ou “efetivas”. Nós as denominamos de relações passivas, em oposição àquelas outras, que denominamos ativas. Assim, na nossa história da sífilis, a união de todas as doenças venéreas sob o conceito da “epidemia venérea” representava um acoplamento ativo dos fenômenos, que se explica pela história cultural. Ao contrário disso, a descrição do efeito do mercúrio na frase citada acima, “em alguns casos, o mercúrio não cura a doença venérea, mas chega a piorá-la”, representa, em relação ao ato do conhecimento, um acoplamento passivo. É claro, ainda, que esse acoplamento passivo sozinho, sem o conceito da epidemia venérea, nem poderia ter sido formulado, assim como o próprio conceito “epidemia venérea”, ao lado dos elementos ativos, também contém elementos passivos (FLECK, 2010, p. 50).

Fleck defende que o conhecimento parte de uma protoideia, um conjunto de ideias iniciais. Nessa fase é que se inicia o estabelecimento de um EP que, em geral, se dá de forma confusa, mas que gradativamente vai se organizando e tomando uma forma mais estilizada, permitindo a construção de um fato científico, que aos poucos se consolida. Durante o processo de instauração de um novo EP, há uma tentativa de corrigir ou adaptar o antigo EP, isto é, há uma tentativa de se manter a *harmonia das ilusões*:

[...] caráter fechado dos sistemas, assim como as interações entre o conhecido, o que está por conhecer e o cognoscente garantem a harmonia dentro do sistema. Mas, ao mesmo tempo, também asseguram a harmonia das ilusões, que precisamente por isto, não podem desmascarar-se nunca dentro do estilo de pensamento (FLECK, 1986, p. 85).

No entanto à medida que as ideias do novo EP se mostram valiosas, ele começa a se instaurar e se estabelece um período de nova harmonia, até que surjam novos problemas que exijam a transição para um novo EP, trata-se de um processo cíclico. Um

exemplo da instauração de um novo EP foi o desenvolvimento da relatividade no final do século XIX na Europa, em relação ao paradigma newtoniano.

Para manter a *harmonia das ilusões*, em 1890, Lorentz e Fitzgerald propuseram que os braços do interferômetro sofreria uma contração na direção do movimento e esse efeito cancelaria as interferências esperadas, sendo assim impossível medir a velocidade da Terra em relação ao Éter. Lorentz ainda tentou argumentar que a hipótese era plausível e tentou dar uma explicação que as moléculas ao interagirem com éter estariam sujeitas a forças que modificariam a sua organização. Poincaré criticou a abordagem de Lorentz e Fitzgerald por se tratar de uma hipótese *ad hoc*. Poincaré sugeriu a instauração de um novo EP: as leis do eletromagnetismo deveriam ser conciliadas com o Princípio (ou Lei) da Relatividade dos movimentos. Poincaré batizou esse processo de desequilíbrio como “crise da Física-Matemática”. Em 1904 Lorentz publicou o seu trabalho mais importante sobre o assunto: “*Fenômenos electromagnéticos num sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz*”. Esse trabalho representou a expansão do novo EP, a inclusão do Princípio da Relatividade no eletromagnetismo.

Ainda em 1904, Poincaré deu algumas palestras em Saint Louis, uma delas intitulado: “O estado atual e o futuro da Física-Matemática”. Nesta palestra Poincaré discutiu o trabalho de Lorentz e declarou que era necessário construir uma dinâmica geral, aplicada a todos os corpos e que as leis da física deveriam ser revistas e conciliadas com o princípio da Relatividade e com o princípio de que nenhum corpo pode ser acelerado até ou além da velocidade da luz no vácuo (POINCARÉ, 1904a). O resultado dessas investigações por diversos pesquisadores, e não somente Einstein, foi em uma leitura fleckiana à expansão e a transformação de estilos de pensamentos que levaram a teoria da relatividade especial. É importante frisar que essa mudança de estilo de pensamento foi altamente condicionada pela situação social da Europa no século XIX. Nessa época com o fortalecimento da indústria houve um grande interesse nos estudos sobre eletricidade e magnetismo, pois tudo indicava que esses fenômenos poderiam ser uma fonte de energia mais eficiente que o calor. Outro fator importante foi o surgimento e a proliferação do telégrafo que facilitava as comunicações (GALISON, 2003, MARTINS, 2015).

A descoberta das ondas eletromagnéticas por Hertz e a sua confirmação por outros pesquisadores europeus consolidava a eletrodinâmica de Maxwell e abria a possibilidade de criar telégrafos sem fio. O salto tecnológico das comunicações possibilitava otimizar o tráfego de trens, para isso era necessário melhorar as medidas de longitude e fuso

horário e desenvolver técnicas de sincronização de relógios por meio de pulsos eletromagnéticos. Na França, Henri Poincaré foi um dos coordenadores do Bureau des Longitudes e tinha que lidar com essas questões (GALISON, 2003). Albert Einstein, na Suíça, era um analista de patentes e muito dos projetos que ele precisava avaliar tratavam do problema de sincronização de relógios (GALISON, 2003).

Essas experiências fizeram Poincaré escrever, em 1898, um artigo chamado “Sobre a medida do tempo”. Na palestra de 1904, Poincaré voltou a discutir o problema de sincronização de relógios. Einstein faz o mesmo em seu trabalho de 1905. Em síntese, os problemas de comunicação, de medida de longitude e sincronização de relógios foram essenciais para a instauração da teoria da relatividade especial. Inicialmente houve uma tentativa de se preservar o antigo estilo de pensamento, i.e, de se manter a harmonia das ilusões, porém à medida que novas evidências surgiram, o novo estilo de pensamento, defendido por Poincaré, foi se instaurando até se tornar o novo estilo de pensamento, a teoria da relatividade, que frente a novas evidências poderá entrar em crise, iniciando um novo processo de transformação de estilo de pensamento.

Para Fleck o *coletivo de pensamento* é o portador comunitário dos fatores sociais e humanísticos que caracterizam o EP, cuja fertilidade, segundo Fleck,

[...] se mostra precisamente na possibilidade que nos proporciona para comparar e investigar de forma uniforme o pensar primitivo, arcaico, ingênuo e psicológico também pode ser aplicado ao pensamento de um povo, de uma classe ou de um grupo. Considero o postulado da experiência máxima como a lei suprema do pensar científico, pois uma vez que surgiu a possibilidade de uma epistemologia comparativa, este postulado se converte em uma obrigação (FLECK, 1986, p.98)

Um conjunto de diferentes CP é condicionado pelo EP e formam círculos concêntricos denominados de *círculos esotéricos* que podem interagir com outros círculos externos, chamados de *círculos exotéricos*. A definição de círculos esotéricos e exotéricos é relativa, por exemplo, a interação dos diversos coletivos de físicos do século XIX que estudavam a eletrodinâmica de Maxwell forma um círculo esotérico. O grupo de geógrafos e engenheiros do século XIX que tentavam estabelecer medidas precisas de longitude e sincronização de relógios constitui entre eles um círculo esotérico, mas esse círculo é exotérico em relação ao círculo dos físicos.

A comunicação entre sujeitos de um mesmo círculo esotérico é denominada de *circulação intracoletiva de ideias e práticas*⁸. As cartas trocadas por Poincaré e Lorentz,

⁸ Observe que é possível que ocorra a circulação intracoletiva de ideias e práticas entre um círculo esotérico e exotérico, desde que compartilhem os mesmos princípios e ideias de determinado conhecimento. Por

as comunicações feitas em congressos e revistas científicas, as críticas de outros pesquisadores e as respostas a essas críticas, as reuniões da Academia Olympia de Einstein e seus colegas, são exemplos de circulação intracoletiva de ideias e práticas. Quando a comunicação ocorre entre círculos exotéricos e há a transmissão e apropriação de ideias e práticas por elementos dos diferentes círculos, então temos uma *circulação intercoletiva de ideias e práticas*. Quanto maior a diferença de estilos de pensamento, menor será a circulação intercoletiva. O contato desses coletivos diferentes tende a criar certa tensão. Segundo Fleck, as circulações intercoletivas podem criar pequenas alterações que vão crescendo e podem transformar um estilo de pensamento. Vejamos brevemente como esse fato se deu no desenvolvimento da relatividade. Lorentz sempre manifestou interesse pela matemática e a física teórica, evitando trabalhar em campos que exigiam habilidades manuais ou experimentação. Por essa razão, podemos dizer que as circulações de Lorentz eram majoritariamente intracoletivas. Por outro lado, Henri Poincaré se formou engenheiro de minas, pretendia seguir a carreira de engenheiro. Poincaré acabou seguindo carreira acadêmica em matemática e em física. Entre 1889 e 1899, foi professor de eletromagnetismo em diversas instituições, incluindo a Escola de Correios e Telégrafos, cujas aulas foram publicadas em um livro chamado “*La dynamique de l’électron*”.

Além de aulas, Poincaré participou de diversas comissões oficiais. Poincaré Coordenou uma comissão geográfica da Academia de Ciências que pretendia estabelecer novas medidas da Terra e melhorar as medidas de longitude e fuso horário. Poincaré também presidiu o projeto de desenvolvimento do telégrafo sem fio. As comissões em que Poincaré participou representavam círculos exotéricos as suas práticas, mas a necessidade de coordená-los promoveu uma circulação intercoletiva que seria fundamental para suas contribuições para a relatividade. Albert Einstein teve uma experiência semelhante com a de Poincaré. Einstein era licenciado em física e matemática e pretendia seguir carreira acadêmica, inicialmente não teve sucesso. Acabou por se tornar analista em um escritório de patentes na Suíça. Esse trabalho fez com que Einstein realizasse uma circulação intercoletiva com outros círculos exotéricos. Propostas de

exemplo o Físico (doutor) pesquisador de Teoria da Relatividade com o professor de física do Ensino médio. O segundo em relação ao primeiro é exotérico, mas quando compartilham os princípios básicos da Física ocorre a circulação intracoletiva. Se os professores compartilham suas experiências e conhecimentos teóricos de Ensino com os Físicos pesquisadores em Teoria da Relatividade, nesse caso a circulação é intercoletiva, pois os relativistas (que, a priori, não possuem conhecimentos de Ensino) pertenceriam a um outro coletivo de pensamento tendo o conhecimento de Teoria da Relatividade como a única referência. O mesmo ocorre para o professor de Física.

medida de comprimento e sincronização de relógios apareciam com frequência e Einstein devia analisar, com base em seus conhecimentos de físico-matemática, essas tecnologias.

Quando Lorentz propôs as transformações que mais tarde levariam seu nome, ele foi incapaz de apresentar seu significado físico, para Lorentz as transformações eram apenas um truque matemático que tornava as equações de Maxwell covariantes e permitia deduzir propriedades importantes da dinâmica do elétron. O significado das transformações de Lorentz foi dado por Henri Poincaré e Albert Einstein. As circulações intercoletivas de ideias e práticas que estes dois pesquisadores participaram levaram a refletir sobre os problemas de medidas de espaço, sincronização de relógios e da simultaneidade dos eventos. Poincaré, em 1904, e Einstein, em 1905, perceberam que a transformada de Lorentz do tempo representavam as medidas realizadas em relógios sincronizados por sinais luminosos, e que caso esses relógios estivessem em movimento relativo incorreriam em uma quebra de simultaneidade e, por conseguinte, perderiam a sincronia.

Como foi dito, as circulações de Lorentz eram majoritariamente intracoletivas, essas circulações não motivavam as mudanças em seu estilo de pensamento. Por outro lado, observamos que assim como Poincaré, Einstein também mantinha circulações intercoletivas com diversos círculos exotéricos para resolver medidas do espaço e tempo e essas circulações fizeram que ele refletisse e adquirisse consciência sobre o caráter ontológico e os problemas acerca da definição do espaço e do tempo (LANGEVIN, 1913, 1922). Essa reflexão culminou no abandono do estilo de pensamento do espaço e tempos absolutos da mecânica clássica, e instauraram um no EP onde a velocidade da luz no vácuo é um valor absoluto e o espaço e tempo são relativos. Outro exemplo de como as circulações intercoletivas favoreceram numa mudança de EP está na concepção do espaço-tempo quadridimensional. Embora o círculo da matemática seja exotérico ao círculo da física há uma grande proximidade entre dois, tanto que os físicos teóricos eram chamados de físicos matemáticos. As diferenças desses círculos aumentam quando no tratamento de problemas ou conceitos muito específicos de cada círculo. Na época em que a teoria da relatividade especial estava sendo desenvolvida, a teoria de grupos era um assunto pouco difundido no coletivo dos físicos. Porém, tanto Poincaré como Minkowski, matemáticos de excelência, mantinham circulações intercoletivas com a física, em especial, a teoria da relatividade.

Poincaré, em 1905, e Minkowski, em 1908, verificaram que as transformações de Lorentz formavam um grupo infinitesimal. A análise desse grupo levou os dois

pesquisadores a achar um invariante relativístico, posteriormente chamado de métrica de Minkowski, e interpretar o tempo como uma quarta dimensão. A mudança do estilo de pensamento de um espaço tridimensional para um espaço quadrimensional, aceito até hoje, foi possível devido à circulação intercoletiva.

2.2. Metodologia

Diferentes das outras vertentes da história, a história da ciência se desenvolveu de maneira quase autônoma, pois, embora adote conceitos básicos de historiografia, ela estabeleceu suas próprias perspectivas cognitivas e conceitos-chaves, e não seguindo as perspectivas históricas e historiográficas tradicionais (KRAGH, 2001, 2003). Segundo Darrigol (2004), a história e a historiografia da ciência podem ser classificadas em quatro categorias (ou tendências):

Alguns historiadores tendem a maximizar as conexões mútuas entre as ideias expressas entre os atores que trabalham em um determinado campo em um determinado momento. Eles fazem isso para minimizar as diferenças entre uma ideia e a próxima e, assim, fazer a sequência de inovações parecer mais natural. Isso pode ser chamado de *tendência gradualista*. Outros historiadores buscam maximizar o papel das condições ou eventos externos. Na sua opinião, os principais passos inovadores ocorrem frequentemente na fronteira entre campos de atividade distintos. A conjuntura é ainda mais favorável quando três campos estão envolvidos, como Galison habilmente sugere no caso da redefinição do tempo. Isso pode ser chamado de *tendência transculturalista*. Ainda outros historiadores acreditam que os movimentos de um ator são determinados principalmente pela rede sócio-intelectual na qual ele está evoluindo. Isso pode ser chamado de *tendência construtivista*. Um último grupo de historiadores enfatiza a capacidade do descobridor de realizar saltos cognitivos ou mudanças de gestalt quando confrontado com um estado confuso de coisas. Isso pode ser chamado de *tendência cognitivista* (DARRIGOL, 2004, p. 625, *itálico nosso*).

Darrigol (2004) exemplifica estas tendências ao analisar a tese de que Einstein teria feito um “empréstimo direto” das ideias de Poincaré:

O historiador *gradualista* favorecerá a tese do empréstimo direto, porque ela torna a interpretação de Poincaré do tempo local um passo intermediário entre as teorias de Lorentz e Einstein. Os demais preferirão enfatizar as circunstâncias comuns. O *transculturalista* enfatizará a ideia de que a tecnologia [da medida] do tempo daquela época inspirou Poincaré e Einstein. O *construtivista* acolherá referências sobre a intensidade dos debates daquela época sobre a eletrodinâmica de corpos em movimento e a tendência de examinar as bases [da física]. O *cognitivista* assumirá prontamente que Poincaré e Einstein foram capazes de se afastar das intenções originais de Lorentz

porque ambos ignoraram amplamente essas intenções e raciocinaram de uma perspectiva diferente. (DARRIGOL, 2004, p. 625, *itálico* nosso).

Darrigol (2004, p. 625) ainda enfatiza que:

A maioria dos historiadores não pode ser rotulada de forma tão decisiva. Eles podem combinar várias dessas atitudes e podem ajustar sua abordagem a um tópico com o tempo. Em meus próprios estudos da história da relatividade, combinei as abordagens construtivista e gradualista. (DARRIGOL, 2004, p. 625).

Assim como Darrigol, nessa pesquisa, combinei três abordagens, a saber: *transculturalista*, *construtivista* e *cognitivista*. Como o ecletismo de perspectivas cognitivas é uma característica predominante da *Micro-História* (LEVY, 1992), adotei essa prática historiográfica para o desenvolvimento da dimensão histórica da pesquisa.

A micro-história foi proposta pelo historiador italiano Carlo Ginzburg e, devido a sua natureza eclética, a micro-história não pode ser conceituada de maneira unívoca (LEVY, 1992), só podemos destacar algumas das características fundamentais que diferenciam a micro-história das outras práticas historiográficas. Antes de tudo é preciso compreender que o adjetivo *micro* se refere a natureza analítica da micro-história que se contrapõe ao caráter holístico da historiografia tradicional.

A micro-história como uma prática é essencialmente baseada na redução da escala da observação, em uma análise microscópica e em um estudo intensivo do material documental. [...] Para a micro-história, a redução da escala é um procedimento analítico, que pode ser aplicado em qualquer lugar, independentemente das dimensões do objeto analisado (LEVY, 1992, p. 136-137).

Outra característica importante da micro-história é que ela também favorece interfaces com os estudos sociais⁹:

Na verdade, muitos historiadores que aderem à micro-história têm-se envolvido em contínuos intercâmbios com as ciências sociais e estabelecido teorias historiográficas sem, contudo, sentir qualquer necessidade de se referirem a qualquer sistema coerente de conceitos ou princípios próprios.

Em nosso caso, entretanto, optamos nos referir ao sistema de conceitos sociais propostos por Fleck e, em alguns tópicos, as abordagens sociológicas de Bauman e May. Os conceitos elementares de historiografia e historiografia da ciência tiveram como base a obra de Helge Kragh, Os conceitos elementares de historiografia *Introdução à*

⁹ Que foi uma perspectiva cognitiva adotada para esta pesquisa antes mesmo da escolha da prática historiográfica.

Historiografia da Ciência (KRAGH, 2001, 2003)¹⁰. Para fazermos o delineamento geográfico e temporal e estabelecer a historicidade dos conceitos¹¹ utilizamos a obra *Regimes de Historicidade* (HARTOG, 2015).

Como a pesquisa micro-histórica exige acesso as fontes primárias e a literatura secundária. Atualmente os documentos e biografias sobre Albert Einstein são abundantes e de fácil acesso, a página virtual da Universidade de Princeton disponibiliza para consulta os *Collected Papers* que consiste em todos os documentos científicos e pessoais que foram produzidos por Einstein. Esse material está tanto na língua original como em inglês. Os documentos produzidos por Poincaré foram todos digitalizados e disponibilizados para consulta na página “*Henri Poincaré Papers*” sobre a tutela do historiador Scott Walter. Toda obra de Poincaré e as correspondências científicas também estão disponíveis nos “*Oeuvres de Henri Poincaré*”, em onze tomos. A correspondência de Poincaré com outros pesquisadores foi compilada em seis livros, e também está disponível na página “*Henri Poincaré Papers*”.

Outros pesquisadores como J. Maxwell (1925) e J. Larmor (1900, 1925) deram contribuições pontuais e as suas obras originais estão disponibilizadas em diversos sítios acadêmicos. As fontes primárias consultadas foram: documentais, impressas, biográficas, cartas e discursos. O tratamento desse material seguiu os critérios de análise de fontes compilados nos manuais Fontes Históricas (PINSKY, 2006) e o Historiador e suas Fontes (PINSKY, LUCA, 2011). Quanto às biografias optamos por trabalhos de pessoas ligadas diretamente a Einstein. Os documentos originais que usamos neste trabalho estão listados na tabela 1:

Tabela 1: Fontes Primárias Consultadas

AUTOR	TÍTULO	FONTE	ANO
A. S. Eddington	The propagation of gravitational waves.	Impressa	1922
A. Einstein	Mes Projets d’Avenir	Documental	1896
A. Einstein	Para Mileva Maric	Carta	1901

¹⁰ Sempre que surgiu alguma ambiguidade ou dubiedade nos trechos da tradução portuguesa (KRAGH, 2001), recorremos a versão inglesa (KRAGH, 2003).

¹¹ Por exemplo, como veremos a palavra *relatividade* empregada pelos alemães e pelos franceses tinham diferentes significados. Da mesma forma que a relatividade imaginada por Galileu é diferente daquela pensada por Einstein e Poincaré. Conceitos que variam geograficamente (espaço) e temporalmente são chamados de conceitos êmicos, pois são munidos de historicidade (HARTOG, 2015).

A. Einstein	Zur Elektrodynamik Bewegter Körper	Impressa	1905
A. Einstein	Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?	Impressa	1905
A. Einstein	Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie	Impressa	1906
A. Einstein	Eine Methode zur Bestimmung des Verhältnisses der transversalen und longitudinalen Masse des Elektrons	Impressa	1906
A. Einstein	Möglichkeit einer neuen Prüfung des Relativitätsprinzips	Impressa	1907
A. Einstein	Bemerkung zur Notiz des Herrn P. Ehrenfest: Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz	Impressa	1907
A. Einstein	Die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie	Impressa	1907
A. Einstein	Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen	Impressa	1907
A. Einstein	Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes	Impressa	1911
A. Einstein	Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes	Impressa	1912
A. Einstein	Zur Theorie des statischen Gravitationsfeldes	Impressa	1912
A. Einstein	Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie	Impressa	1914
A. Einstein	Zur allgemeinen Relativitätstheorie	Impressa	1915
A. Einstein	Zur allgemeinen Relativitätstheorie (Nachtrag)	Impressa	1915
A. Einstein	Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie	Impressa	1915
A. Einstein	Die Feldgleichungen der Gravitation	Impressa	1915

A. Einstein	Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie	Impressa	1916
A. Einstein	Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.	Impressa	1916
A. Einstein	Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie	Impressa	1917
A. Einstein	Über Gravitationswellen	Impressa	1918
A. Einstein	How I Created The Theory of Relativity	Discurso	1982
A. Einstein	Notas Autobiográficas	Biográfica	1984
A. Einstein M. Grossmann	Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation	Impressa	1913
A. Einstein M. Grossmann	Kovarianzeigenschaften der Feldgleichungen der auf die verallgemeinerte Relativitätstheorie gegründeten Gravitationstheorie'	Impressa	1914
E. Mach	Die Mechanik in ihrer Entwicklung: historisch-kritisch dargestellt	Impressa	1883
H. Lorentz	Para Poincaré	Carta	1901
H. Lorentz	Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light	Impressa	1904
H. Lorentz	Alte und neue Fragen der Physik	Impressa	1910
H. Lorentz	La Gravitation	Impressa	1914
H. Lorentz	Deux Mémoires de Henri Poincaré sur la Physique Mathématique	Impressa	1915 1921
H. Poincaré	Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique	Impressa	1890
H. Poincaré	Sur le problème des trois corps	Impressa	1891
H. Poincaré	Les Methodes Nouvelles de la Mécaniques Céleste Vol. 1.	Impressa	1892

H. Poincaré	Les Methodes Nouvelles de la Mécaniques Céleste, vol. 2	Impressa	1893
H. Poincaré	Mécanisme et expérience	Impressa	1893
H. Poincaré	A propos de la théorie de M. Larmor	Impressa	1895
H. Poincaré	Sur la stabilité du système solaire	Impressa	1898
H. Poincaré	Les Methodes Nouvelles de la Mécaniques Céleste 2 vols.	Impressa	1899
H. Poincaré	Sur l'équilibre d'un fluide en rotation	Impressa	1899
H. Poincaré	Des fondements de la géométrie; à propos d'un livre de M. Russell	Impressa	1899
H. Poincaré	Sur les rapports de la physique expérimentale et de la physique mathématique	Discurso	1900
H. Poincaré	La théorie de Lorentz et le principe de réaction	Impressa	1900
H. Poincaré	La mesure de la terre et la géodésie française	Impressa	1900
H. Poincaré	La géodésie française	Discurso	1900
H. Poincaré	Rapport sur le projet de révision de l'arc méridien de Quito	Discurso	1900
H. Poincaré	Sur les principes de la géométrie; réponse à M. Russell	Impressa	1900
H. Poincaré	Les relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique	Impressa	1900
H. Poincaré	Para J. Larmor	Carta	1901
H. Poincaré	Para T. Levi-Civita	Carta	1901
H. Poincaré	Sur les principes de la mécanique	Impressa	1901
H. Poincaré	La Science et l'Hypothèse	Impressa	1902
H. Poincaré	Notice sur la télégraphie sans fil	Impressa	1902
H. Poincaré	La télégraphie sans fil	Impressa	1902

H. Poincaré	Rapport présenté au nom de la Commission chargée du contrôle scientifique des opérations géodésiques de l'Equateur	Discurso	1903
H. Poincaré	L'état et l'avenir de la Physique mathématique	Discurso	1904
H. Poincaré	Maxwell's Theory and Wireless Telegraphy	Impressa	1904
H. Poincaré	Cours d'électricité théorique: étude de la propagation du courant en période variable, sur une ligne munie de récepteur	Impressa	1904
H. Poincaré	La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes; La télégraphie sans fil	Impressa	1904
H. Poincaré	Para Lorentz	Carta	1905
H. Poincaré	Para Lorentz	Carta	1905
H. Poincaré	Para Lorentz	Carta	1905
H. Poincaré	Para Lorentz	Carta	1905
H. Poincaré	La Valeur de la Science	Impressa	1905
H. Poincaré	Sur la dynamique de l'électron	Impressa	1905
H. Poincaré	Sur la dynamique de l'électron	Impressa	1906
H. Poincaré	La dynamique de l'électron	Impressa	1908
H. Poincaré	La Science et le Méthode	Impressa	1908
H. Poincaré	La mécanique nouvelle	Impressa	1909
H. Poincaré	La mécanique nouvelle	Impressa	1910
H. Poincaré	La mécanique nouvelle	Impressa	1912
H. Poincaré	Dernières pensées	Impressa	1913
H. Poincaré	Les Limites de la Loi de Newton	Impressa	1953
H. Poincaré, G. Mittag-Leffler.	Correspondance entre Henri Poincaré et Gösta Mittag-Leffler.	Impressa	1998

H. Poincaré et al.	La correspondance entre Henri Poincaré et les physiciens, chimistes et ingénieurs	Impressa	2007
H. Poincaré et al.	La correspondance entre Henri Poincaré, les astronomes, et les géodésiens	Impressa	2016
H. Poincaré et al.	La correspondance de jeunesse d'Henri Poincaré: Les années de formation. De l'École polytechnique à l'École des Mines (1873-1878)	Impressa	2017
É. Mascart	Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur (deuxième partie)	Impressa	1874
A. Sommerfeld	Zur Relativitätstheorie II: Vierdimensionales Vektoranalysis	Impressa	1910
G. Mie	Grundlagen einer Theorie der Materie (Dritte Mitteilung)	Impressa	1913
G. Searle	Problems in Electric Convection	Impressa	1886
G. Searle	On the steady motion of an electrified ellipsoid	Impressa	1887
H. Minkowski	Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern. Nachrichten	Impressa	1908
H. Minkowski	Das Relativitätsprinzip. Jahresbericht der deutschen Mathematiker	Impressa	1916
J. Larmor	A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous	Impressa	1893
J. Larmor	Aether and Matter	Impressa	1900
J. Maxwell	Matter and Motion	Impressa	1925
J. Maxwell	Treatise on Electricity and Magnetism. 2 vols	Impressa	1954
M. Abraham	Die Grundhypothesen der Elektronentheorie. Physikalische Zeitschrift	Impressa	1904

M. Abraham	Neuere Gravitationstheorien. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik	Impressa	1915
M. Laue	Das Relativitätsprinzip	Impressa	1911
M. Planck	Das Prinzip der Relativität und die Grundgleichungen der Mechanik	Impressa	1906
M. Planck	Zur Dynamik bewegter Systeme, Sitzungsberichte der Königlich	Impressa	1907
P. Langevin	Henri Poincaré, le physicien	Impressa	1913
P. Langevin	L'inertie de l'énergie et ses conséquences	Impressa	1913
P. Langevin	Le Principe de relativité	Impressa	1922
P. Langevin	La Physique depuis vingt ans	Impressa	1923
P. S. Laplace	Traité de mécanique céleste	Impressa	1799- 1825
T. Levi-Civita	Sulla espressione analitica spettante al tensore gravitazionale nella teoria di Einstein.	Impressa	1917
W. De Sitter	On the Bearing of the Principle of Relativity on Gravitational Astronomy	Impressa	1911
W. De Sitter	The Secular Variations of the Elements of the Four Inner Planets	Impressa	1913
W. Voigt	Ueber das Doppler'sche Princip	Impressa	1887

Além das fontes primárias, foi feita uma ampla revisão na literatura, em fontes secundárias. Os relatos de sua irmã, Maja (Einstein) Winteler estão parcialmente disponíveis nos *Collected Papers*. A obra de Talmey (1932) traz um relato de Max Talmud, que foi amigo e tutor de Einstein durante a sua juventude. Fölsing (1997) apresenta evidências importantes sobre a influência de Poincaré sobre Einstein. Abraham Pais (1982), também foi consultado com certo cuidado, pois não considerava outros documentos sobre o trabalho de Einstein (MARTINS, 2015, p.275). A biografia mais completa atualmente é o trabalho Isaacson (2007) que também foi consultada.

Ginoux & Gerini (2013) e de Roberto de Andrade Martins (2015) apresentam uma boa síntese da biografia e as contribuições de Poincaré. Gostaríamos de enfatizar o livro *“Einstein's Clocks and Poincare's Maps: Empires of Time”* (GALISON, 2003) que busca expor os acontecimentos sociais e humanísticos que influenciaram Einstein e Poincaré a chegarem à relatividade. Sobre a narrativa histórica que estamos apresentando, optamos pela micro-história social (LEVY, 1992, PROST, 2008), orientada pela epistemologia de Fleck. Diferente da história tradicional que tem uma tendência holística, a micro-história apresenta uma ênfase maior nos detalhes históricos, em particular, a micro-história social, enfatiza os detalhes contidos nas relações entre o evento histórico, seus atores e o contexto social-político. Por isso tanto a leitura quanto a narrativa, histórica e do material de divulgação científica, foi feita enfatizando a influência dos aspectos sociais, políticos, culturais, econômicos e geográficos que influenciaram os pesquisadores citados para o desenvolvimento da relatividade, na perspectiva fleckiana.

2.3. Literatura Secundária

A realização dessa pesquisa exigiu também uma ampla pesquisa na literatura secundária. Pelo caráter micro-histórico dessa dissertação, consultamos um número extenso de trabalhos produzidos por historiadores da ciência sobre Henri Poincaré e a Teoria da Relatividade Especial. Esse levantamento histórico foi dividido em duas categorias, a saber: (1) contribuições de Poincaré e (2) história da Teoria da Relatividade Especial.

Como a compreensão da construção do conhecimento exige também domínio da estrutura física e matemática, também consultamos obras específicas. Essa etapa da pesquisa foi distribuída categorias: (1) suplemento de Matemática, que contém a bibliografia consultada que abrange os aspectos da matemática pura. (2) suplemento de Física-Matemática, contém métodos matemáticos aplicados a estruturação à física teórica, em particular na construção da teoria da relatividade. (3) suplemento de Física, discute temas da física geral que servem de base e pré-requisito no estudo da Relatividade. (4) Suplemento de Teoria da Relatividade, contém livros técnicos, em geral avançados, que abordam apenas Teoria da Relatividade.

2.3.1. Contribuições de Poincaré

É um fato que Poincaré teve um papel fundamental no desenvolvimento da teoria da relatividade, porém os historiadores divergem sobre o tamanho desse papel e se Poincaré teria antecipado a criação da teoria da relatividade. Portanto há três tendências historiográficas: os que atribuem o mérito a Poincaré, os que atribuem o mérito à Einstein e os que defendem que teorias são construções coletivas.

O principais defensores da prioridade de Poincaré são E. Whittaker que no segundo volume de *A History of Theories of Aether and Electricity*, credita a teoria à Lorentz e Poincaré, e o físico russo A. Logunov (2005), sua obra *Henry Poincaré and Relativity Theory*, desenvolve as principais ideias de Poincaré e tenta provar que elas são suficientes para se atribuir o mérito a Poincaré. O historiador H. Ives (1952) mostrou em um importante ensaio que Einstein não deduziu a relação massa-energia, pois cometeu uma petição de princípio. Keswani (1965a, 1965b) e Mehra (2001) avaliaram os programas de Einstein e Poincaré e, apesar de ser mais comedido, sugere que Poincaré antecipou a relatividade. Enrico Giannetto (1999) fez uma extensa revisão de literatura mostrando que a relatividade de Einstein foi influência direta da relatividade de Poincaré. Mais recentemente Damour (2017) apontou diversos aspectos da Teoria da Relatividade que foram antecipados por H. Poincaré.

Outros historiadores como S. Goldberg (1967, 1969, 1970a), G. Holton (1960, 1964, 1967-1968, 1969) e A. Miller (1986) defendem que, embora Poincaré tenha desenvolvido diversos elementos que depois foram absorvidos pela relatividade de Einstein, Poincaré estava desenvolvendo um programa para o elétron e uma covariância mais restrita para as leis da física. A visão relativística de uma covariância das leis da física para os referenciais inerciais, só foi obtida por Albert Einstein.

Uma linha recente de historiografia da relatividade é aquela que defende que teorias não podem ser creditadas a um único autor, mas são construções coletivas e sociais. P. Galison (2003) desenvolveu uma extensa pesquisa revelando como o problema das longitudes levaram Poincaré a compreender o processo de sincronização de relógios. O. Darrigol (1995, 1996, 2004, 2005), um dos responsáveis pelo seminário Henri Poincaré, produziu estudos à partir da história da eletrodinâmica, sobre as influências filosóficas, sociais e históricas que culminaram na relatividade. Damour (2004, 2012, 2017), também responsável pelo seminário Henri Poincaré, atende uma perspectiva semelhante à de Darrigol. Atualmente o maior especialista em Henri Poincaré e com maior número de

obras a respeito de suas contribuições para relatividade é o historiador Scott Walter (1996, 1999, 2007, 2008a, 2008b, 2011, 2014, 2019), responsável pelo acervo de documentos oficiais de Henri Poincaré. Walter tem analisado criticamente a produção acadêmica de Poincaré e seus cadernos pessoais, apresentando uma perspectiva única do pensamento do físico-matemático francês. S. Katzir (2005a, 2005b) apresentou de maneira detalhada a origem da relatividade de Poincaré e um estudo sobre seu programa gravitacional. O historiador J. P. Auffray (1998) escreveu um pequeno livro, traduzido para português de Portugal, que sintetiza a história da relatividade e apresenta de maneira equilibrada a contribuição de Einstein e Poincaré. Auffray defende que a prioridade da relatividade é tanto de Poincaré quanto de Einstein. A. Miller (1986) fez uma análise detalhada do ensaio de 1905-1906 de Poincaré, exceto pelo programa gravitacional de Poincaré. Registre, que a tendência de Miller é favorecer o trabalho de Einstein.

2.3.2. História da Teoria da Relatividade Especial

O desenvolvimento da Teoria da Relatividade e o papel de Einstein foi detalhado pela primeira na obra de Whittaker (1954). Embora apresenta alguns problemas historiográficos. Keswani (1965a, 1965b, 1966), Keswani e Kilmister (1983) e Mehra (2001) abordam de forma sucinta e clara a gênese da Teoria da Relatividade Especial. G. Holton (1960, 1964, 1967-1968, 1969) estudou as influências de Einstein e o papel das experiências sobre o éter na sua criação. A. Miller (1997) discute em detalhes cada passagem do ensaio de 1905 de Einstein, além de trazer uma tradução do ensaio para o inglês. Auffray (1998) discute de forma sucinta, mas satisfatória a história da teoria da relatividade. Capria (2007) discute a física antes e depois de Einstein. As contribuições de Planck são sintetizadas por Goldberg (1976) e Field (2014). Sobre Minkowski e o desenvolvimento do formalismo tensorial o leitor consulte Scott (1999, 2007, 2008a).

Hirosige (1969), Goldberg (1969, 1970b) e Cormmach, (1970) fizeram um importante estudo sobre a teoria dos elétrons que irá originar a dinâmica relativística. O historiador japonês Hirosige (1976) fez um estudo sobre a concepção diacrônica do éter no século XIX e o papel das teorias e experimentos relacionados ao éter, mostrando que os experimentos visavam compreender melhor a estrutura da matéria. A resistência britânica a teoria de Einstein é discutida em um ensaio de Goldberg (1970c) e sua penetração na França, por Scott (2011). O historiador francês, Dugas (1988) aborda o desenvolvimento da mecânica e dedica alguns capítulos para discutir o ensaio de Lorentz e de Einstein. Darrigol (1994, 1995, 1996, 2002, 2003, 2004, 2005) fez o estudo mais

detalhado sobre a origem da relatividade na eletrodinâmica. O livro *Beyond Einstein* (ROWE, SAUER, WALTER, 2018) contém uma vasta coletânea de ensaios históricos sobre a relatividade.

Thomas Kuhn (2017), exemplifica seu conceito de Crise-Revolução a partir da Teoria da Relatividade. Lakatos (1979) aplica seus programas de pesquisa ao estudo da experiência de Michelson-Morley. E. Zahar (1973a, 1973b, 1978), pupilo de Lakatos, aplicou a metodologia dos programas de pesquisa ao estudo da relatividade e pôs em dúvida a questão da superioridade do programa de Einstein. Feyerabend (1974, 1980, 2010, 2011a 2011b) analisou de forma cirúrgica a questão epistemológica da relatividade. Max Jammer (2006, 2009, 2010, 2011) desenvolveu quatro obras que analisam o desenvolvimento histórico e epistemológico dos conceitos de massa, força, espaço e simultaneidade, os dois últimos, em especial, tem grande ênfase na relatividade. Sobre a historiografia da relatividade, há dois importantes ensaios cujos autores são Schaffner (1982) e Earman, Glymour, Rynasiewicz (1983). O livro *Introdução à Historiografia* de H. Kragh (2001) traz uma importante discussão sobre a história e a memória à partir de declarações contraditórias de Einstein sobre a o papel da experiência de Michelson-Morley na sua concepção da relatividade. G. Whitrow (1993) escreveu um importante livro sobre a história do tempo. E. P. Thompson (2016), apresenta um capítulo discutindo como o capitalismo e a revolução industrial forçaram a uma reinterpretação do conceito de tempo, que é fundamental para o desenvolvimento da relatividade, como mostrou o historiador P. Galison (2003). A relação massa-energia e suas controvérsias são apresentadas por Ives (1952), Stachel (1982), Fadner (1988) e Field (2014). Cullwick (1981) escreveu um ensaio capital sobre as inconsistências na eletrodinâmica de Einstein. Logunov (2005) também apresenta algumas na cinemática.

Há uma importante coletânea de artigos e estudos que foram publicados em forma de livro e abordam temas diversos associados a Relatividade: *The Genesis of General Relativity*, 4 Volumes, (RENN, 2007); *Einstein and the History of General Relativity* (HOWARD, STACHEL, 2005a), *The Universe of General Relativity* (KOX, EISENSTAEDT, 2005), *Einstein: The Formative Years, 1879–1909* (HOWARD, STACHEL, 2005b); *Einstein from 'B' to 'Z'* (STACHEL, 2005), *Lorentz & Poincare Invariance - 100 Years of Relativity* (HSU, ZHANG, 2005) e *General Implications of Lorentz And Poincare Invariance* (HSU, HSU; 2006).

2.3.3. Suplemento de Matemática

O conhecimento de análise tensorial é imprescindível para compreender as diferenças conceituais entre a visão de Poincaré e a visão de Minkowski sobre o espaço tempo. Em nosso estudo consultamos as obras: *Matemática para Físicos* (NETO, 2010) *Cálculo Tensorial* (SANCHEZ, 2011), *Tensors Made Easy* (BERNACCHI, 2017), *Tensor Calculus* (KAY, 2015) e *Cálculo Exterior* (BASSALO, CATTANI, 2012). Também abordamos alguns elementos álgebras de Lie e teoria de Grupos, que tiveram como fontes os livros *Cálculo Exterior* (BASSALO, CATTANI, 2012), *Teoria de Grupos para Físicos* (BASSALO, CATTANI 2010), *Matemática para Físicos* (NETO, 2010), *Lie Groups, Lie Algebras, and Representations - An Elementary Introduction* (HALL, 2015), *Álgebra Linear e Multilinear* (ROCHA JR., 2017a), *Álgebras de Clifford* (VAZ JR, ROCHA JR., 2017) e *Understanding Geometric Algebra* (KANATANI, 2015). Também foi necessário alguma familiaridade com *Geometria Diferencial*, que obtivemos a partir do estudo dos livros *Introdução à Geometria Diferencial* (TENENBLAT, 2014) e *Differential Geometry* (KREYSZIG, 1991) e *Geometria Diferencial de Curvas e Superfície* (CARMO, 2012).

2.3.4. Suplemento de Física-Matemática

Para compreender o papel do coletivo de pensamento dos matemáticos sobre Poincaré, foi necessário estudar três importantes tópicos da matemática avançada: teoria dos anéis, topologia de baixa de dimensão e geometria hiperbólica. O estudo sobre anéis foi feito por meio do livro *Álgebra Moderna* (IEZZI, DOMINGUES, 1982). Duas leituras indispensáveis foram os livros *Linear Algebra* (HOFFMAN, KUNZE, 1971), que aborda de forma concisa e rigorosa o anel de Grassmann e o fantástico livro *On Manifolds with an Affine Connection and the Theory of General Relativity* do próprio Cartan (1986). Sobre topologia geométrica, o conteúdo se encontra formalizado na obra de G. E. Bredon (1993), *Geometry and Topology* e detalhado em *Geometry and Topology* (REID, SZENDRÓI, 2005). Para aplicações da topologia na física relativística, consultamos *Gravitation* (MISNER, THORNE, WHEELER, 2016) e *Space-Time Physics* (TAYLOR, WHEELER, 2000).

Sobre geometria hiperbólica há pouco material, porém as obras são bastante completas e inteligíveis. Para uma abordagem concisa sobre os números perplexos (números hiperbólicos) lemos ensaios *Fundamental Theorems of Algebra for the Perplexes* (POODIACK, LECLAIR, 2009), *Uma Abordagem Física dos Números*

Perplexos (AMORIM, et al 2018), *Cauchy-Like Integral Formula for Functions of a Hyperbolic Variable* (CATONI, ZAMPETTI, 2011), *Space-time trigonometry and formalization of the “Twin Paradox” for uniform and accelerated motions* (BOCCALETTI, CATONI, CATONI, 2018) *f-Algebra Structure on Hyperbolic Numbers* (GARGOUBI, KOSENTINI, 2018), *Induced Representations and Hypercomplex Numbers* (KISIL, 2012). A maior parte dos estudos envolve números hipercomplexos aplicado a física aparecem em livros-textos de caracterização topológica do espaço-tempo, dos quais foi imprescindível a leitura: *Geometry of Minkowski Space-Time* (CATONI, BOCCALETTI, CANNATA, CATONI, ZAMPETTI, 2011) *The Mathematics of Minkowski Space-Time With an Introduction to Commutative Hypercomplex Numbers* (CATONI, BOCCALETTI, CANNATA, CATONI, NICHELATTI, ZAMPETTI, 2008). *Minkowski Space: The Spacetime of Special Relativity* (SCHRÖTER, 2017). *The Geometry of Minkowski Spacetime: An Introduction to the Mathematics of the Special Theory of Relativity* (NABER, 2012), *A Álgebra Geométrica do Espaço-tempo e a Teoria da Relatividade* (VAZ JR, 2000) e *Geometric Multiplication of Vectors* (JOSIPOVIC, 2019).

Para compreendermos melhor as características do espaço de Galileu e suas diferenças em relação ao espaço de Poincaré, foi necessário estudar alguns tópicos de números parabólicos ou duais. Consultamos a obra *Dual-Number Methods in Kinematics, Statics and Dynamics* (FISCHER, 1998) *Dual Numbers* (KANDASAMY, SMARANDACHE, 2012) e *Introduction to Hybrid Numbers* (ÖZDEMIR, 2018).

2.3.5. Suplemento de Física

O conhecimento físico para este ensaio corresponde ao curso de Física Básica, em geral dividido em 4 volumes. Nessa pesquisa damos grande ênfase aos problemas eletromagnéticos que originaram a relatividade. Por isso consultamos: *Eletrodinâmica Clássica* (BASSALO, 2012), *Eletromagnetismo*, 3 Volumes, (MACHADO, 2012), *Teoria do Campo* (LANDAU, LIFCHITZ, 2002), *Electrodynamics* (SOMMERFELD, 1952). Uma obra que merece destaque é o livro *Classical Electromagnetism via Relativity: An Alternative Approach to Maxwell’s Equations* (ROSSER, 1968). Como indica o título da obra, o autor utiliza a formulação relativística para obter as equações de Maxwell, no que poderia ser chamado de uma “engenharia reversa”. O primeiro capítulo de *Eletrodinâmica Quântica* (BASSALO, 2002) também foi consultado.

2.3.6. Suplemento de Teoria da Relatividade

O melhor livro-texto sobre Relatividade em língua portuguesa é a obra *Teoria da Relatividade Especial*, escrita por Roberto de Andrade Martins (2012). O autor aborda com rigor abordagens da relatividade especial que preenchem campos menos conhecidos como a termodinâmica, corpos extensos, teoria quântica e gravidade. As três melhores obras em teoria da relatividade especial já escritas são: *Special Relativity in General Frames From Particles to Astrophysics* (GOURGOULHON, 2013), *Special Relativity An Introduction with 200 Problems and Solutions* (TSAMPARLIS, 2010) e *Reflections on Relativity* (BROWN, 2017). Os dois primeiros livros abordam *todo*, exatamente, *todo* o conteúdo de relatividade especial. Trazem tanto abordagem física e quanto a matemática e discute exercícios que raramente aparecem em outros livros. O livro de Brown aborda a relatividade usando questões históricas e epistemológica pouco discutidas e é citado frequentemente nessa pesquisa.

O livro *Teoria da Relatividade* (PERUZZO, 2012) aborda os conceitos mais comuns de forma bastante simples e detalhada, mas a parte histórica é bastante anacrônica. O livro *Teoria da Relatividade* (LESCHE, 2005) faz uma abordagem geométrica a partir da introdução de 4-vetores e a geometria do espaço-tempo. O livro *Introdução à Teoria da Relatividade* (COSTA, 1995), originalmente publicada na década de 1920, foi o primeiro livro-texto sobre relatividade geral em língua portuguesa e aborda de forma objetiva os principais conceitos associados a teoria.

Embora não seja um livro-texto, *O Que é Teoria da Relatividade?* (LANDAU, RUMER, 2004) é uma obra essencial para qualquer estudante, pois apresenta de maneira simplificada e rigorosa os conceitos relativísticos, pois não é raro que um aluno que esteja familiarizado com aspectos operacionais da teoria, não tenha compreendido os aspectos conceituais. O livro *A Teoria da Relatividade Restrita* de David Bohm (2015) apresenta uma formulação alternativa, porém interessante da relatividade. Deve-se tomar algum cuidado, entretanto, pois Bohm privilegia apenas a contribuição de seu amigo, Albert Einstein, e comete alguns anacronismos. Em geral adota-se o livro *Introdução à Relatividade Especial* (RESNICK, 1965) foi adotado como texto-básico, porém o livro comete vários anacronismos e alguns erros conceituais. O leitor poderá consulta-lo, mas com certo cuidado e tendo em mente que as outras obras citadas são mais adequadas.

The Theory of Relativity do prêmio Nobel, W. Pauli (1921) constrói a teoria da relatividade a partir do formalismo 4-vetorial e de rotações esféricas em um espaço-tempo

com um eixo imaginário temporal. O livro também aborda a termodinâmica relativística de Planck. Deve-se tomar apenas algum cuidado com algumas modificações que surgiram em décadas posteriores. *Einstein's Theory of Relativity* do prêmio Nobel, M. Born (1962) faz uma apresentação bastante detalhada, com ênfase aos problemas eletrodinâmicos. O livro *The Theory of Space Time and Gravitation* de V. Fock (1959) faz uma importante revisão do trabalho original de Einstein, provando que os dois postulados não permitem estabelecer a covariância de Lorentz. *Henry Poincaré and Theory of Relativity* de A. Logunov (2005) é uma das obras mais importantes, pois constrói rigorosamente a teoria da relatividade a partir dos ensaios originais de Poincaré e Einstein.

2.4. Historiografia da Ciência: Algumas Observações

Construir uma narrativa histórica é um processo delicado e complexo, pois exige o domínio de uma metodologia bastante específica, a historiografia. Ao historiador não basta enumerar a sucessão de eventos e datas em ordem cronológica, é necessário reconhecer as diversas interfaces entre o episódio histórico e as questões sociais, políticas, epistemológicas, científicas e até as percepções pessoais dos atores envolvidos. Além disso, qualquer narrativa histórica deve evitar o anacronismo, que segundo o historiador francês Lucien Fèbvre é: “o pecado dos pecados, o mais imperdoável dos pecados” (FÈBVRE, 2013, p. 43)¹².

De acordo com a visão anacrônica, a ciência do passado devia ser estudada à luz do conhecimento que temos hoje, e na intenção de compreendermos este último desenvolvimento, particularmente quanto ao modo como conduz ao presente. Considera-se legítimo, senão mesmo necessário, que o historiador “intervenha” no passado) com o conhecimento que possui em virtude da sua localização posterior no tempo. (KRAGH, 2003, p. 89)

A história anacrônica da ciência é cognominada de história *whig* (KRAGH, 2003) ou a história não-histórica. Segundo Henry (2002, p. 152) trata-se de “um ponto de vista historiográfico, em geral, lamentável”. Hall (1983) considera o *whiggismo* uma ameaça a própria história da ciência. Para o historiador, o ideal é uma história diacrônica, que

[...] consiste em estudar a ciência do passado à luz da situação e das opiniões que verdadeiramente existiam no passado; por outras palavras, não considerar quaisquer ocorrências posteriores que não podiam ter

¹² “Le péché des péchés, le péché entre tous irrémissible”

tido influência no período em questão. Ocorrências que se deram antes, mas que na realidade eram desconhecidas na altura, têm de ser igualmente encaradas como inexistentes. Por conseguinte, idealmente, na perspectiva diacrónica imaginamo-nos como observadores no passado, e não simplesmente do passado. Como resultado desta viagem fictícia no tempo, a memória do historiador-observador é expurgada de todo o conhecimento vindo de períodos posteriores. O historiador diacrónico não está, por conseguinte, interessado em avaliar em que medida os agentes históricos se comportaram racionalmente ou se produziram verdadeiro conhecimento num sentido moderno ou absoluto. A única coisa que interessa é saber até que ponto as ações do agente foram consideradas racionais e verdadeiras na época do próprio agente. (KRAGH, 2003, p. 89)

Portanto, é dever do historiador “ver o passado com os olhos do passado”. Essa perspectiva cognitiva da história da ciência muitas vezes é responsável pelas celeumas entre historiadores e educadores (e divulgadores) científicos (MARTINS, 1998a, 1998b, 2001, 2014), pois a didática exige uma certa dose de anacronismo (KRAGH, 2003). A dificuldade em reconciliar a história da ciência com a educação e a divulgação científica está em acertar qual dose de anacronismo pode ser tolerada. Infelizmente, a essa questão ainda não há uma resposta objetiva ou um consenso.

3. O PAPEL SOCIAL NA FORMAÇÃO E CONSTRUÇÃO DA RELATIVIDADE DE POINCARÉ

Jules Henri Poincaré (Nancy, 29 de abril de 1854 — Paris, 17 de julho de 1912) foi um dos maiores matemáticos de sua época. Bertrand Russell definiu como sendo um dos maiores intelectuais franceses (RUSSELL, 2014). Martins (2015, p. 123) aponta que

É difícil dar uma ideia das honras que Henri Poincaré acumulou ao final de sua carreira. A amplitude de suas pesquisas fez com que ele fosse a única pessoa jamais eleita para todas as cinco sessões de ciências exatas da Academia de Ciências de Paris: geometria, mecânica, física, geografia e navegação. Além disso, Henri Poincaré tornou-se Presidente da Academia de Ciências em 1906. Em 1908, foi eleito membro da Academia Francesa, que congregava principalmente pessoas das áreas de humanidades, mas que incluía também alguns cientistas. Nessa época já era membro de 35 outras academias, de muitos outros países. Ganhou enorme número de prêmios, medalhas e condecorações em todo mundo.

O Dicionário de Biografias Científicas (BENJAMIN, 2007), sintetiza suas principais contribuições para conhecimento foram na área de teoria das funções, teoria dos números, álgebra, funções abelianas, geometria algébrica, equações diferenciais, mecânica celeste, equações diferenciais parciais, física-matemática, topologia algébrica e fundamentos da matemática. Ainda no dicionário de biografias científicas, no tópico *Equações Diferenciais Parciais e Física Matemática*, encontramos a seguinte frase:

Por outro lado, Poincaré foi ativo desde 1899 nas discussões sobre a teoria do elétron de **Lorentz**. Foi o primeiro a observar que as transformações de Lorentz formavam um grupo, isomorfo ao grupo que deixa invariante a forma quadrática $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$. Muitos físicos consideram que Poincaré divide com Lorentz e **Einstein** o crédito pela criação da teoria da relatividade especial. (DIEUDONNÉ, 2007, p. 2279).

Sobre essa afirmação vaga surgem algumas perguntas: (1) quais foram essas contribuições de Poincaré para teoria da relatividade especial? (2) Elas são suficientes para garantir o crédito de criação dessa teoria? (3) Qual foi o impacto destas contribuições na academia? (4) Quais são as principais diferenças entre o programa de Poincaré, Lorentz e Einstein? Infelizmente o Dicionário de Biografia Científicas não fornece qualquer pista. Esta pesquisa busca responder estas questões intrigantes e ainda pouco abordadas na literatura historiográfica brasileira.

Para responder a primeira pergunta, qual a contribuição de Poincaré para relatividade, faremos quatro análises: (a) os conceitos de espaço, tempo e simultaneidade;

(b) a formulação do princípio da relatividade; (c) o estudo da inércia e da energia e suas interconexões; (d) um estudo do artigo *Sur La Dynamique de l'électron* (1905, 1906). Após esta apresentação, estaremos preparados para responder a segunda pergunta, se Poincaré deve ser também creditado pela criação da relatividade. Com auxílio das fontes primárias, em particular relatos de Kauffmann, Laue e Lorentz, e estudos da literatura secundária, tentaremos esclarecer a recepção das contribuições de Poincaré. Por fim, iremos comparar a estrutura científica e epistemológica do programa de Poincaré com o de Lorentz e Einstein, tentando estabelecer as distinções. Também mostraremos a interpretação de alguns historiadores que se dispuseram a essa questão. Com esse artigo não almejamos estabelecer de quem é a prioridade da relatividade, mas esclarecer o papel de Poincaré para o desenvolvimento da física moderna e trazer a luz suas contribuições esquecidas, pois como observa Logunov (2004, p. 145-146):

A omissão dos artigos de Poincaré de 1905 e 1906 continuou por todo o século XX. O senso comum estabelecido é de que a teoria da relatividade especial foi criada somente por A. Einstein. Isto está escrito em livros didáticos, incluindo aqueles usados na escola, em monografias, em livros de divulgação científica, em enciclopédias. Os físicos alemães, diferente dos físicos franceses, fizeram muitos esforços para organizar a situação quando A. Einstein, por si só, foi considerado o criador da teoria da relatividade especial, e essa realização científica como um fruto da ciência alemã. Mas, felizmente, "os manuscritos não mentem". Artigos "*Sur la dynamique de l'électron*" demonstram claramente a contribuição fundamental de Poincaré para a descoberta da teoria da relatividade especial. Tudo o que veio depois nessa direção foram aplicações e desenvolvimentos de suas ideias e métodos.

Quanto a ponderação das fontes, seguimos as orientações de Logunov (2004, p. 131-132):

Na avaliação das obras de 1905 e 1906, bem como nos primeiros trabalhos de H. Poincaré em física, é necessário proceder apenas a partir do seu conteúdo, comparando-o com as ideias contemporâneas, e não para ser guiado por afirmações externas sobre o assunto, mesmo que feita por cientistas de renome, contemporâneos de Poincaré, já que o nível de muitos deles era insuficiente para apreender plenamente o que Poincaré escreveu. Na época, sua personalidade era especialmente manifesta na medida em que, para ele, os problemas físicos e sua formulação matemática adequada se uniam naturalmente e compunham um único todo. Justamente por esse motivo, suas criações são exatas e modernas mesmo depois de cem anos. H. Poincaré foi um daqueles pesquisadores raros, para quem as ciências naturais e a matemática são o meio que as rodeia. Os jovens de hoje, diplomados em física teórica, podem facilmente perceber isso, se pelo menos eles lerem as obras de Poincaré de 1905 e 1906.

É necessário cometer esse pequeno anacronismo para avaliarmos o que Poincaré de fato propôs e se suas ideias foram compreendidas pelos seus contemporâneos e como isso afetou a recepção de seus trabalhos. Para aumentarmos a compreensão das ideias de Poincaré também consultamos a correspondência dele no período de 1887, ano em que foi realizada a experiência de Michelson-Morley para detectar o movimento da Terra em relação ao éter, até 1905, quando Poincaré escreveu seu artigo mais importante sobre o assunto: *Sur la dynamique de l'électron*. Esta importante documentação se encontra organizada por Scott Walter no livro *La Correspondance Entre Henri Poincaré et les Physiciens, Chimistes et Ingénieurs* (2007).

Por fim, gostaríamos de registrar que, a prioridade nesse estudo são aos conceitos. Em alguns momentos introduzimos as equações e alguns detalhamentos matemáticos para ilustrar as principais ideias de Poincaré. Por uma questão de sincronismo, as equações foram apresentadas na notação empregada por Poincaré, que é bastante diferente das convenções modernas. Para facilitar a leitura, introduzimos nestas seções um pequeno dicionário de símbolos e sempre que achamos necessário, apresentamos a sua correspondente moderna. Começaremos nosso estudo discutindo o papel da sociologia na produção científica de Poincaré, inicialmente revisando alguns conceitos elementares da sociologia geral.

3.1. O Papel Social sobre a Formação Científica

Segundo os sociólogos Zygmunt Bauman e Tim May (2010) “consideramos a sociologia uma prática disciplinada, dotada de um conjunto próprio de questões com as quais aborda o estudo da sociedade e das relações sociais.” A essa breve definição, Bauman e May (2010, p. 17) acrescentam:

Poderíamos dizer que a questão central da sociologia é: como os tipos de relações sociais e de sociedades em que vivemos têm a ver com as imagens que formamos uns dos outros, de nós mesmos e de nosso conhecimento, nossas ações e suas consequências? São questões desse tipo – partes das realidades práticas da vida cotidiana – que constituem a área própria da discussão sociológica e definem a sociologia como ramo relativamente autônomo das ciências humanas e sociais. Logo, podemos concluir que aprender a pensar com a sociologia é uma forma de compreender o mundo dos homens que também abre a possibilidade de pensá-lo de diferentes maneiras.

Sendo a ciência uma prática humana que impacta a sociedade e depende de fatores pessoais e da própria sociedade, como o investimento do governo em programas de

pesquisa ou as exigências de laboratórios particulares, então não podemos desvincular a prática da ciência a sociologia. Esse relacionamento torna-se mais clara quando compreendemos as diferenças entre natureza e cultura.

Consideremos, por exemplo, as distinções que estabelecemos entre o que supostamente está submetido ao “poder humano” a fim de alterá-lo de acordo com nossos desejos, ideais e objetivos. Elas são conformadas pela existência de algum padrão ou norma a que esse “algo” deva submeter-se. Há, portanto, o que pode ser mudado pela intervenção humana e ser formado de acordo com expectativas particulares. Essas coisas devem ser tratadas de modo diferente de outras, que permanecem além do poder humano. As primeiras denominamos cultura, as outras, natureza. Assim, quando pensamos que algo é uma questão de cultura mais que de natureza, estamos inferindo que se trata de algo manipulável e, além disso, que há um fim desejável, “apropriado”, para tal manipulação. Cultura diz respeito a modificar coisas, tornando-as diferentes do que são e do que, de outra maneira, poderiam ser, e mantê-las dessa forma inventada, artificial. A cultura tem a ver com a introdução e a manutenção de determinada ordem e com o combate a tudo que dela se afaste, como indicativo de descida ao caos. Tem a ver, então, com a substituição ou complementação da “ordem natural” (o estado das coisas sem interferência humana) por outra, artificial, projetada. E a cultura não só promove, mas também avalia e ordena. (BAUMAN, MAY, 2010, p. 203).

A relação entre ciência e cultura fica mais clara quando observamos que quanto maior for nosso conhecimento científico, maior será nosso controle sobre os fenômenos naturais e portanto maior a expansão da cultura. Assim ciência e cultura se retroalimentam de forma que não separa-las sem oblitera-las. Esse argumento por si só justifica a conexão entre a ciência e a sociologia. Se por um lado é claro como a ciência contribui para a sociologia, precisamos esclarecer o processo contrário: como que questões da sociologia contribuem para a ampliação da ciência? Para isso precisamos entender como se pensa sociologicamente.

Se alguém nos perguntar “o que é um leão?”, podemos pegar um livro sobre animais e indicar uma imagem específica. Nesse sentido, estamos apontando para a ligação entre palavras e objetos. Assim, portanto, palavras referem-se a objetos, que se tornam referentes para essas palavras, e, então, estabelecemos conexões entre uns e outras em condições específicas. Sem essa capacidade comum de compreensão, seria impossível a comunicação mais banal, aquela que não costumamos sequer questionar. Isso, entretanto, não é suficiente para um entendimento de maior profundidade, mais sociológico, dessas conexões. Esse processo, contudo, não nos possibilita conhecer o objeto em si. Temos então de acrescentar algumas perguntas, por exemplo: de que maneira esse objeto é peculiar? De que forma ele se diferencia de outros, para que se justifique o fato de podermos a ele nos referir por um nome diferente? Se chamar um animal de leão é correto mas chamá-lo de tigre não, deve haver algo que leões tenham e tigres não, deve

haver distinções entre eles. Só descobrindo essas diferenças podemos saber o que caracteriza um leão – o que é bem diferente de apenas saber a que objeto corresponde a palavra “leão”. (BAUMAN, MAY, 2010, p. 12)

Toda ciência apresenta aquilo com que podemos identificar como seu próprio “leão”. Se considerarmos o caso da Teoria da Relatividade, haviam vários “leões”: a questão do éter, a velocidade da luz, o princípio da relatividade. Sobre estes leões, Poincaré e Einstein realizaram perguntas sociológicas (GALISON, 2003). Tanto Poincaré quanto Einstein ao se esbarrarem no “leão” chamado de tempo precisaram estabelecer, em uma leitura fleckiana, conexões ativas que iam além da relação semiótica descrita por Bauman e May, mais precisamente eles precisavam saber “de que maneira esse objeto é peculiar? De que forma ele se diferencia de outros, para que se justifique o fato de podermos a ele nos referir por um nome diferente?” Como veremos, foi por meio da circulação de ideias entre diferentes coletivos de pensamentos que Poincaré conseguiu propor soluções a esses problemas. Portanto, questão que nos surge é: quais eram os coletivos de pensamento que Poincaré pertencia e como eles proporcionaram respostas as conexões ativas?

3.2. Coletivos de Pensamento de Pensamento de Poincaré

Como já abordamos, no segundo capítulo, na epistemologia de Fleck, o “portador comunitário [de um estilo de pensamento] é chamado de coletivo de pensamento” (FLECK, 1986, p.149). Assim, os estilos de pensamento são

[...] um perceber dirigido com a correspondente elaboração intelectual e objetiva do percebido. Fica caracterizado pelos traços comuns dos problemas que interessam ao coletivo de pensamento, pelos juízos que o pensamento coletivo considera evidentes e pelos métodos que emprega como meio de conhecer. O estilo de pensamento também pode existir acompanhado pelo estilo técnico literário do sistema de saber (FLECK, 1986, p.145).

Sendo o conhecimento uma “atividade mais condicionada socialmente da pessoa e o conhecimento é a criação social por excelência” (FLECK, 1986, p. 89), a compreensão da natureza do conhecimento exige analisar como os sujeitos interagem com diferentes coletivos de pensamento. Segundo Fleck (1986) quando as informações são comunicadas dentro de um mesmo coletivo de pensamento, há uma circulação intracoletiva de ideias. Porém quando há trocas de informação entre diferentes coletivos de pensamento, há uma circulação intercoletiva. Para Fleck (1986) a construção do conhecimento apresenta maior

potencial quando há circulações intercoletivas. Quando estudamos as contribuições de Poincaré para o desenvolvimento histórico da teoria da relatividade, podemos destacar que as circulações intercoletivas desempenharam um papel fundamental no trabalho científico de Poincaré. Nessa seção iremos destacar os diferentes coletivos de pensamento que Poincaré pertencia para que ao longo do texto, mostrarmos como ocorreu esses diálogos com esses membros de coletivos.

Poincaré foi educado em casa pela própria mãe até o seis anos de idade, quando a família contratou um professor particular, o amigo da família Jacques Alphonse Hinzelin (1834-1911), autor de livros sobre geografia, história e matemática (MARTINS, 2015). Segundo Martins,

Esse preceptor de Henri conversava com ele sobre todos os assuntos, transmitindo um ensinamento enciclopédico. Essa foi uma importante influência em sua educação, estimulando muito sua curiosidade e autonomia, sem sobrecarregá-lo com tarefas repetitivas. Pode-se dizer que, desde a infância, a família de Henri lhe proporcionou um ambiente intelectual adequado e que durante toda a sua formação lhe deu apoio financeiro para seus estudos. Esses foram dois aspectos que contribuíram muito para sua formação (MARTINS, 2015, p. 108).

Portanto, vemos que na infância Poincaré encontrou uma formação multidisciplinar que o incentivava a dialogar com vários coletivos de pensamento e não apenas manter o foco em uma única disciplina. Esse é um traço, como veremos mais adiante, que fez com que Poincaré se tornasse um homem letrado em diversos coletivos e recebesse o título de Universalista, uma qualidade que mesmo no século XIX havia se tornado rara (GINOUX, GERINI, 2014). O contato de Poincaré com o coletivo de pensamento da ciência ocorreu ainda na infância:

Depois que aprendeu a ler, em vez de se dedicar à leitura de contos de fadas (como era comum na época), leu obras de divulgação científica e, mais tarde, livros mais sérios. Gostava muito de ler e tinha uma memória notável, sendo capaz de recordar de quase tudo o que lia (MARTINS, 2015, p. 108-109).

Quando Henri Poincaré, tinha entre 11 ou 12 anos, ele começou a integrar a escola básica, dois novos coletivos de pensamento: da geometria e da matemática.¹³ Segundo Martins (2015), nessa época Poincaré abriu pela primeira vez um tratado da geometria, tendo ficado fascinado e iniciando estudos em obras mais avançadas. Nas aulas de matemática, Poincaré desenvolvia suas próprias soluções para os problemas propostos.

¹³ No século XIX e começo do século XX, a geometria era considerado como um campo a parte da matemática, pois enquanto a análise e álgebra trabalhavam com a razão pura do número, a geometria seria uma área semi-empírica (JAMMER, 2013).

“Nessa época, um professor de Henri disse à sua mãe: ‘Senhora seu filho será um matemático’” (MARTINS, 2015, p. 109). Aos treze anos, Poincaré passou também integrar o círculo esotérico dos literatos, tendo escrito sua primeira obra: uma tragédia em versos sobre Joana d’Arc (MARTINS, 2015). Ao final do colegial, Poincaré foi considerado o segundo melhor aluno. Sua posição foi prejudicada devido a falta de habilidades manuais, que o fez tirar notas baixas em disciplinas práticas como laboratório e desenho. Poincaré também tentou aprender piano, mas a sua falta de coordenação não o permitiu que ele conseguisse prosperar nesse empreendimento. Poincaré estava em dúvidas sobre qual curso superior faria: licenciatura em matemática ou engenharia (MARTINS, 2015). Possivelmente pela influência familiar (o tio de Poincaré era um renomado engenheiro de pontes), Poincaré optou pelo curso de engenharia na Escola Politécnica, considerada um dos melhores centros de matemática e física e do mundo (MARTINS, 2015).

Ao optar pela engenharia, Poincaré passou a integrar o coletivo de pensamento dos engenheiros. Mesmo Poincaré tendo, posteriormente, abandonado a engenharia, ele continuou a manter comunicação com engenheiros, como mostra sua correspondência pessoal (POINCARÉ, 2007). Na Politécnica, Poincaré também entrou em contato com outros coletivos: física, química, geometria, análise, mecânica e astronomia (MARTINS, 2015). Como revelam os documentos desse período, Poincaré foi aluno do matemático Charles Hermite, que ocupava a cátedra de análise, e Marie-Alfred Cornu, professor da cátedra de física, foram os que mais influenciaram Poincaré (MARTINS, 2015). Paralelo ao coletivo de pensamento dos engenheiros, Poincaré continuou a se comunicar com o coletivo de pensamento dos matemáticos. Foi durante sua graduação em engenharia que Poincaré desenvolveu seu famoso tratado sobre as funções fuchsianas.

Poincaré também interagiu com os coletivos de pensamento associado as culturas humanísticas: como a história, política e filosofia. O curso de engenharia exigia que os alunos viajassem constantemente. Nessa época Poincaré visitou a Áustria e a Suécia. Martins (2015, p. 112) relata que “antes de viajar estudava sobre a história, a estatística e os hábitos dos povos que ia encontrar, para poder aproveitar mais suas vivências”. Em uma leitura fleckiana, esse hábito corresponde a uma circulação intercoletiva de ideias. Nesse período, Poincaré costumava a frequentar cafés e restaurantes com seu primo Raymond Poincaré (MARTINS, 2015). Raymond Poincaré, cursava direito e se tornaria primeiro-ministro da França e, posteriormente, presidente da França. Em seus encontros, os primos Poincaré costumavam a discutir assuntos de interesse mútuo como questões

sociais, políticas e de filosofia, que incluía Kant, os racionalistas (como Descartes), os empiristas (como Hume), iluministas (Rousseau, Voltaire, Montesquieu) entre outros (GINOUX, GERINI, 2014, MARTINS, 2015). Por motivos desconhecidos, Poincaré escolheu se especializar em Engenharia de Minas. Segundo Galison (2003), a experiência de Poincaré com a engenharia de minas em carvão tiveram um impacto negativo sobre ele. Como dissemos, Poincaré nunca deixou de lado seus estudos em matemática, por isso, enquanto servia como engenheiro, ele desenvolveu sozinho uma tese de doutorado em equações diferenciais que foi aprovada, sobre a supervisão de Charles Hermite, em 1879. Logo após seu doutoramento, Poincaré começou a ministrar na Faculdade de Ciências de Caen a disciplina de Análise Matemática. (MARTINS, 2015).

Em 1881, Poincaré foi convidado para ser conferencista em Análise Matemática na Escola de Sorbonne. A partir de 1885, Poincaré assumiu novas cátedras, dessa vez em mecânica física (1885), física-matemática¹⁴ (1886), cálculo das probabilidades e mecânica celeste, que ampliou ainda mais o número de coletivos de pensamento que Poincaré pertencia. Porém, é importante frisar que Poincaré não tinha apenas uma relação passiva, mas uma relação muito ativa. Poincaré deu contribuições importantes ao campo da probabilidade, desenvolveu análises profundas sobre a mecânica (que foram publicadas em *A Ciência e a Hipótese*) e contribuições físico-matemáticas que depois foram compiladas no livro *Nouvelles Mécaniques*. Na mecânica celeste Poincaré escreveu um dos livros mais importantes sobre o assunto *Leçons de mécanique céleste* e *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*. A análise dessa obra e de seu *Sur La Dynamique de L'Électron*, mostram que Poincaré estudou profundamente a obra de Lagrange sobre mecânica celeste. Sobre a cátedra de física-matemática, Martins (2015, p. 115) enfatiza que:

Embora pudesse se dedicar apenas a um campo, preferia em cada ano ministrar cursos sobre assuntos diferentes da física teórica. Como professor de Física-Matemática na Universidade de Paris, variava sempre o tema de seus cursos. Posteriormente publicou 14 volumes com suas aulas sobre óptica, eletricidade, termodinâmica, propagação do calor e muitos outros assuntos.

Além disso, Poincaré mantinha comunicação por cartas com os mais renomados pesquisadores das áreas de física, engenharia, matemática, geometria, geociências e química. Os documentos que não foram perdidos, deram origem a quatro livros: *La*

¹⁴ Física matemática era o nome da cátedra de física teórica e que envolvia os campos do eletromagnetismo, termodinâmica, óptica, entre outros.

*Correspondance Entre Henri Poincaré Et Gösta Mittag-Leffler*¹⁵ (1998), *La Correspondance Entre Henri Poincaré Et Les Physiciens, Chimistes Et Ingénieurs* (2007), *La Correspondance Entre Henri Poincaré, Les Astronomes Et Les Géodésiens* (2016) e *La Correspondance De Jeunesse D'henri Poincaré* (2017).

Em 1886, Poincaré já tinha 103 publicações nos campos da física, matemática, geometria, filosofia, engenharia e astronomia. Em 31 de Janeiro de 1887, aos 32 anos, Poincaré foi aceito como membro permanente da Academia Francesa de Ciências, principalmente pelo seus trabalhos sobre funções fuchsianas e as formas de equilíbrio de fluídos em rotação (MARTINS, 2015).

Ensinou eletromagnetismo de 1889 a 1899 na Sorbonne, na Escola Politécnica e na Escola de Correios e Telégrafos desenvolvendo análises detalhadas dos trabalhos de Maxwell, Hertz, Larmor, Lorentz e outros pesquisadores importantes da época. Henri teve importante papel na divulgação da teoria de Maxwell na França (e na Europa Continental), redigindo um livro sobre o assunto que era muito mais claro e completo do que o tratado do próprio Maxwell. Envolvia-se também com relações práticas das teorias, como a aplicação das ondas de Hertz a telegrafia (MARTINS, 2015, p. 120-121).

Em 1893, Poincaré foi admitido no Bureau das Longitudes, onde precisava desempenhar atividades burocráticas, técnicas e científicas. No Bureau das Longitudes, Poincaré trabalhou com a coordenação de observatórios astronômicos, ampliando ainda mais sua circulação de ideias com o coletivo de pensamento dos astrônomos, porém, a principal tarefa de Poincaré no Bureau estava relacionada ao coletivo de pensamento das geociências: a coordenação de relógios para o cálculo da longitude e a medida da geodésica francesa (GALISON, 2003, GINOUX, GERINI, 2014, MARTINS, 2015). Portanto, em 1895, Poincaré quando propôs a primeira protoideia a respeito da Relatividade, ele pertencia a diversos coletivos de pensamento e realizava um processo constante de circulação intercoletiva entre eles. A imagem abaixo apresenta os coletivos de pensamento com maior influência sobre Poincaré ao desenvolvimento da relatividade.

Uma das características de Henri Poincaré que mais impressionava seus contemporâneos era sua capacidade de se dedicar a muito temas completamente diferentes [circulação intercoletiva] e produzir resultados excelentes em todos eles. Era um “espírito vasto”. Como já foi mencionado, o interesse inicial de Henri era a matemática, mas ele foi se envolvendo gradualmente com vários ramos da física, em sua atividade docente. Embora estivesse ministrando aulas para alunos de graduação, abordava os assuntos de modo profundo, como se estivesse realizando seminários para um grupo de pesquisa. Ao preparar seus cursos, não seguia nenhum livro didático existente: pesquisa trabalhos mais recentes sobre cada assunto, que apresentava de modo crítico aos

¹⁵ Mittag-Leffler foi um matemático sueco com quem Poincaré desenvolveu uma forte amizade. As cartas variam de banalidades até problemas fundamentais da análise, álgebra e geometria.

seus alunos, apontando pontos fracos, indicando as diversas hipóteses [conexões ativas] e teorias conflitantes sobre cada tema [diferentes estilos de pensamento], explorando novos pontos de vista que poderiam ser adotados [conexões ativas], corrigindo falhas e completando lacunas dos trabalhos que descrevia [conexões ativas]. Nesses cursos não demonstrava apenas seu conhecimento vastíssimo, mas também um forte espírito crítico. Tudo pode ser colocado em dúvida, não há certezas intocáveis (MARTINS, 2015, p. 120).

A figura abaixo sintetiza os principais coletivos de pensamento que Poincaré pertencia e participaram de sua síntese da teoria da relatividade.

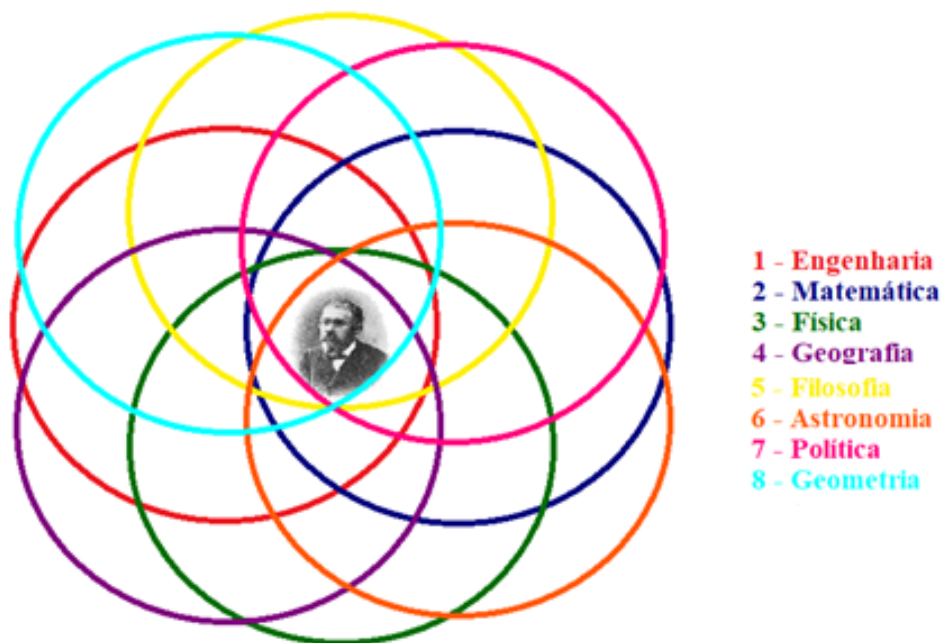


Figura 1. Coletivos de Pensamento que auxiliariam Poincaré na Relatividade

Em uma leitura fleckiana, as questões que Poincaré levantaria a partir de 1895 são conexões ativas que viriam ao a se tornarem conexões passivas, à medida que Poincaré construía a sua interpretação da relatividade. Na epistemologia de Fleck, o fato de Poincaré pertencer a vários coletivos de pensamento e realizar circulações intercoletivas de ideias entre esses círculos foi um fator fundamental para a construção da relatividade. Adiante, iremos detalhar essas circulações intercoletivas que forneceram as bases para Poincaré reformular a questões do espaço e do tempo e, a partir dessa reformulação, construir o princípio da relatividade.

3.3 A Medida do Tempo e a Questão da Simultaneidade

O desenvolvimento das concepções de espaço, tempo e simultaneidade como fenômenos relativos por Poincaré está intimamente ligado a sua experiência no Bureau des Longitudes. Como mostrou Peter Galison (2003), é bastante improvável que Poincaré tivesse desenvolvido suas ideias sem essa experiência. Portanto para se compreender como Poincaré lidou com estes conceitos, precisamos compreender a evolução histórica desses conceitos e sua importância social.

Os conceitos de espaço, tempo e simultaneidade sofreram alterações no decorrer da história. A noção atual que temos de tempo em muito se deve a cultura judaica-cristã que passou a predominar na Europa a partir do século IV d.C. (WHITROW, 1993, JAMMER, 2006). Porém, essa herança foi evoluindo com decorrer dos séculos. A nossa concepção de espaço, tempo e simultaneidade foi também uma construção histórica e social. Para ilustrarmos essa situação, vejamos a análise do conceito *anacronismo* para diferentes culturas, proposta por Whitrow (1993, p. 178):

Na Antiguidade, só os romanos parecem ter tido uma apreensão dele. Em Israel, o conceito linear de história como o cumprimento de uma promessa feita por Deus não envolvia esse sentido; e entre os gregos, poucos escritores, afora Heródoto, mostraram alguma consciência de *desenvolvimento histórico*. Voltando aos romanos, verificamos que os personagens de Virgílio, ao contrário de Homero, tinham um sentido do passado e do futuro.

As nossas noções modernas de tempo não surgiram antes do século XVIII. Embora o relógio mecânico tivesse surgido no final do século XIII (WHITROW, 1993), ele foi se tornar um aspecto fundamental da sociedade a partir do século XVIII com a Revolução Industrial (WHITROW, 1993). Enquanto na sociedade rural o tempo era medido em intervalos longos, na sociedade industrial a medida era feita minuto à minuto:

Os operários de fábrica, porém, tinham que trabalhar sempre que a máquina a vapor estivesse funcionando. Isto obrigou as pessoas a serem pontuais, com relação não apenas à hora, mas também ao minuto. O resultado é que, diferentemente, de seus ancestrais, tenderam a se tornar escravos do relógio (WHITROW, 1993, p. 180).

As expressões “escravos do relógio” ou “a ditadura do tempo” não são de forma nenhuma exageros. A importância que do tempo na sociedade industrial, moldou a nova sociedade europeia. Para este trabalho, basta compreendermos que o tempo cronológico, passou a desempenhar o papel dominante a partir do século XVIII. A análise de como a sociedade se curvou ao reinado do relógio é apresentada no livro *Costumes em Comum*

(THOMPSON, 2016). Outro evento importante que dominou o século XVIII, era desenvolver alguma forma de se calcular as longitudes durante as navegações marítimas (WHITROW, 1993). A necessidade de expansão comercial e desenvolvimento de novas rotas de navegação criou uma corrida para se desenvolver métodos de cálculo da longitude.

Em 8 de julho de 1714, a rainha Ana deu o assentimento real a um *Projeto de Lei para Fornecer uma Recompensa Pública para a Pessoa ou Pessoas que Descobrirem a Longitude no Mar*. Um prêmio de 20.000 libras, o equivalente a mais de um milhão de libras hoje, foi oferecido por um método de determinar a longitude no mar com precisão de pelo menos 30 milhas marítimas ao final de uma viagem as Índias Orientais. (WHITROW, 1993, p. 160)

Vários candidatos tentaram, sem êxito, realizar esta medida. O primeiro a solucionar esse problema foi John Harrison (1693-1776) que inventou, em 1735, o cronômetro marítimo. Seus primeiros cronômetros não eram tão precisos, mas permitiam um cálculo razoável das longitudes (WHITROW, 1993). Em 1757, Harrison aperfeiçoou sua invenção, e conseguiu um novo cronômetro que quando testado, em 1762, forneceu um erro menor que 1 milha (WHITROW, 1993). Embora o cronômetro de Harrison fosse bastante satisfatório, a nova sociedade, cada vez mais tecnológica e exigente, queria melhorar ainda mais a precisão, e a questão das longitudes ainda era assunto recorrente no século XIX. Em 1883, E. Mach publicou sua obra *Die Mechanik* onde criticou as concepções newtonianas de espaço e tempo (JAMMER, 2006). E no ano seguinte, foi a vez de J. Thomson discutir o problema da Simultaneidade em um artigo intitulado “*On the law of inertia, the principle of chronometry and the principle of absolute clinural rest, and of absolute rotation*”.

Thomson obviamente percebeu que o estabelecimento da simultaneidade distante representa um problema por causa do tempo de transmissão do sinal empregado. Ele parece mesmo ter percebido que a medição desse tempo de transmissão requer conhecimento de simultaneidade. Se ele tivesse perseguido ainda mais esse conjunto de ideias, ele teria facilmente antecipado a circularidade envolvida com a qual Poincaré lidou quatorze anos depois. (JAMMER, 2006, p. 98)

Por essa breve exposição está claro que o problema das longitudes está conectada ao problema da medida do tempo, sincronização de relógios e a simultaneidade dos eventos. Assim, uma forma de se compreender o problema da longitude seria compreender a natureza da medida do tempo e da simultaneidade. Embora sua medida tenha sido parcialmente resolvida na segunda metade do século XVIII, o problema ainda era tema intrigante no século XIX. Para ser ter uma ideia de como a questão das longitudes

era importante havia uma “guerra das longitudes” para se estabelecer qual seria o meridiano oficial (GINOUX, GERINI, 2014). Entre 01 de outubro e 01 de novembro de 1884, 25 países se reuniram em Washington para decidir onde seria a localização do meridiano oficial (GINOUX, GERINI, 2014). Os principais candidatos eram a França e a Grã-Bretanha. Segundo Ginoux e Gerini, haviam três propostas:

- O meridiano "internacional", localizado na ilha de Ferro nas Canárias
- O meridiano do Observatório de Paris
- O Meridiano de Greenwich nos arredores de Londres.

Durante a sétima sessão, que ocorreu no dia 22 de outubro de 1884, a assembleia decidiu pelo meridiano de Greenwich. Apesar da decisão, a França só adotaria a nova convenção cerca de 17 anos depois, em fevereiro de 1911. Em 1893, Poincaré passou a integrar o *bureau das longitudes*. Entre as atribuições dele, estava o desenvolvimento de métodos e medidas sobre as geodésicas terrestres e determinação de longitudes, tendo como referência o meridiano do observatório de Paris. Enquanto o problema das geodésicas era um problema de física e geometria esférica, o problema das longitudes era um problema de sincronização de relógios, bastante complexo.

Encontrar latitude é simples. Se a estrela norte estiver em uma linha reta, você está no Polo Norte; se estiver a meio caminho do horizonte, você estará na latitude de Bordeaux; se estiver no horizonte, você está na latitude do Equador, no equador. Não importa em que momento você faz medições de latitude - em qualquer localização particular, o ângulo da estrela polar é sempre o mesmo. Encontrar a diferença de longitude entre dois pontos é notoriamente mais difícil: requer dois observadores distantes para fazer medições astronômicas ao mesmo tempo. Se a Terra não girasse, não haveria problema: você e eu procurávamos e checávamos quais estrelas estavam diretamente sob a Estrela do Norte (por exemplo). Ao verificar um mapa das estrelas, poderíamos facilmente encontrar nossas longitudes relativas. Mas é claro que a Terra gira, então para corrigir as diferenças de longitude com precisão, devemos ter certeza de que estamos medindo a posição das estrelas aéreas (ou sol ou planetas) ao mesmo tempo. Por exemplo, suponha que uma equipe de criação de mapas na América do Norte soubesse a hora em Paris e viu que, no local da equipe, o sol nasceu exatamente seis horas depois do que na Cidade da Luz. Como a Terra leva 24 horas para girar, a equipe saberia que estava em algum lugar ao longo de uma linha de longitude 6/24 (um quarto ou 90 graus equivalentes) do caminho ao redor do mundo a oeste de Paris. Mas como os exploradores poderiam saber que horas eram em Paris? (GALISON, 2003, p. 34-35)

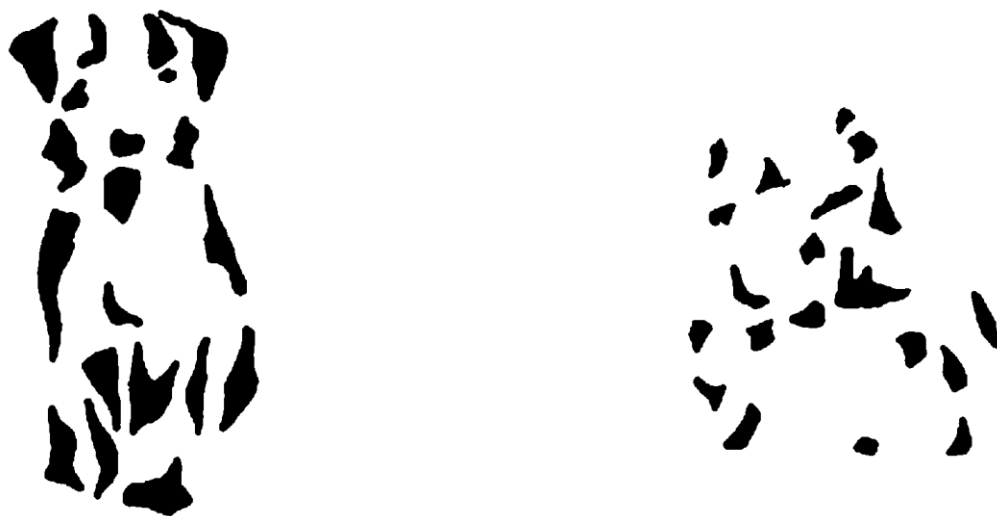
A natureza do trabalho no Bureau das Longitudes exigia conexões passivas burocráticas e práticas. As questões ontológicas e metafísicas da medida do espaço e do tempo soavam mais como elucubrações filosóficas, mas que pouco tinham a acrescentar ao desenvolvimento e coordenação de técnicas entre os operadores, em outras palavras,

o círculo esotérico do Bureau des Longitudes presava mais por circulações intracoletivas do que pelas circulações intercoletivas. Poincaré, no entanto, tinha uma perspectiva diferente. Segundo Galison (2003), o curso de engenharia da Politécnica de Sorbonne enfatizava tanto os aspectos teóricos das ciências naturais e da matemática quanto a intuição prática. O que diferenciava os engenheiros da Sorbonne era sua capacidade de avaliar um problema em diversos coletivos, levantando em uma leitura fleckiana as possíveis conexões ativas. Essa era uma qualidade que Poincaré preservou em toda a sua trajetória acadêmica. Com o surgimento do telégrafo sem fio, surgia uma possibilidade de se sincronizar relógios e fazer medidas geográficas com a essa nova tecnologia. Esses métodos envolvendo pulsos eletromagnéticos foram estudados por Poincaré no Bureau des Longitudes. Em 1898, Poincaré foi encarregado de realizar novas medidas sobre a forma e o raio da Terra.

No final do século XIX, a questão da forma da Terra ainda era relevante e consistia no cálculo das dimensões médias do elipsóide, incluindo o valor do achatamento, usando instrumentos altamente sofisticados. Assim, em 1898, os membros da Associação Internacional de Geodésia decidiram retomar as operações de medir um arco de meridiano sob duas latitudes extremas. Depois de enviar os capitães Maurain e Lacombe para realizar uma missão de reconhecimento em 16 de maio de 1898, o projeto “científico-militar”, que viu a luz do dia sob o nome de “revisão do meridiano de Quito”, foi revisado por uma comissão acadêmica do meridiano cujo relator não era outro senão Poincaré. Em 25 de outubro, Poincaré fez um discurso sobre a Geodésia Francesa durante a sessão pública das cinco Academias. (GINOUX, GERINI 2014, p. 73)

Neste mesmo ano, Poincaré publica na *Revue de métaphysique et de morale* um ensaio de 13 páginas intitulado *La mesure du temps* (A medida do Tempo). Como veremos logo adiante, esse ensaio surgiu das experiências de Poincaré com diferentes métodos para medir a longitude de Paris. Nesse ensaio Poincaré, em uma leitura fleckiana, apresenta novas conexões ativas ao propor a seguinte pergunta: o que se entende por simultaneidade? Isto é, o que de fato é simultaneidade? Para responder essa pergunta, Poincaré inicia seu ensaio discutindo a percepção do tempo e a medida dos intervalos de tempo. Após essa apresentação, Poincaré (1898, p. 02) novamente, em uma leitura fleckiana, apresenta mais conexões ativas sobre a natureza do tempo, ao fazer duas perguntas: “1º – Podemos nós transformar o tempo psicológico, que é qualitativo, em tempo quantitativo? 2º – Podemos nós reduzir à mesma medida fatos que se passam em mundos diferentes?”

As perguntas lançadas por Poincaré, há mais de 130 anos, sobre a natureza do tempo, sua medida e sua relação com a simultaneidade, continua em aberto. É verdade que muitos avanços sobre a física do tempo foram feitos no último século, porém os estudos indicam que ainda estamos mais perto do começo do que da conclusão (WHITROW, 1993). Uma pergunta que inevitavelmente surge as nossas mentes é: por que a natureza do tempo só ganhou a atenção dos cientistas naturais a pouco mais de um século? A resposta derivada dos estudos históricos e sociais (WHITROW, 1993, GALISON, 2003, JAMMER, 2006, THOMSON, 2016) é o fato do tempo ser absorvido pelo nosso senso comum. Por exemplo, façamos a pergunta, que a princípio pode parecer desprovida de sentido ou importância: “o que faz um cachorro ser um cachorro?” Se mostrarmos a uma pessoa fotos de gatos, porcos e cachorros de várias raças e pelagens, até aquelas que ele nunca tenha visto na vida, ele provavelmente saberá separar estes animais. Do ponto de vista psicológico, em sua ontogênese, o indivíduo experimenta diversos tipos de animais e seu cérebro, inconscientemente, aprende a diferenciar um cachorro de um gato. O cérebro aprende a detectar os traços fundamentais de um cachorro. Observe a figura abaixo:



(ALVES, 1993, p. 154)

Nenhuma delas é um cachorro, elas são apenas um amontoado de manchas. Porém, nosso cérebro consegue perceber uma semelhança entre a primeira imagem com um cachorro, devido ao padrão comum, em um processo que é conhecido como Gestalt (ALVES, 1993). Observe que se mostrarmos essa imagem para uma pessoa, que por alguma razão que não nos interessa, nunca viu um cachorro, as duas imagens serão apenas amontoados de manchas. O mesmo processo acontece com a nossa intuição sobre o tempo. Desde o nascimento somos condicionados a uma lógica do tempo e do relógio.

Usamos calendários, temos dias de descanso, feriados, uma hora padrão para acordar, para realizar nossas refeições e assim por diante. Nossa rotina é condicionada pelo tempo e esse condicionamento cria uma certa familiaridade com tempo. Santo Agostinho (1964) confessou: “o que é, pois, o tempo? Se ninguém me pergunta, eu o sei; mas se me perguntam, e quero explicar, não sei mais nada.” Essa é a mesma confissão que fazemos quando nos perguntamos: “o que é, pois, um cachorro?” Sabemos pela experiência diferenciar cães de gatos, mas de onde vem esse conhecimento se não de nosso inconsciente e das experiências que construímos em longo processo?

Ao questionar o Tempo, algo que parecia evidente e claramente manifesto ao espírito científico, Poincaré expõe a fragilidade desse conceito. Acreditamos intuir o que é o tempo, mas não temos consciência do porquê. Do ponto de vista histórico, Santo Agostinho havia antecipado a questão no século IV d.C. então, por que uma nova reflexão, empreendida por Poincaré se mostrou tão frutífera? Defendemos que a principal razão foi social. No século I.V. d.C. a intuição do tempo era diferente, não existiam relógios que fragmentavam os dias em horas, minutos e segundos, os cristãos tinham uma tendência voltado ao presentismo por acreditarem em um apocalipse iminente (WHITROW, 1993, GRANT, 2005). No século XIX, a situação era bastante diferente: o relógio era uma realidade. Empresas cobravam a hora trabalhada, controlavam rigidamente o tempo e a produção (WHITROW, 1993, GALISON, 2003, THOMPSON, 2016). O controle do tempo se tornou uma questão política que tomou grandes proporções, a Inglaterra e a França empreenderam uma espécie de “guerra da longitude zero”, qual observatório seria o ponto de partida de todas as longitudes: francês ou inglês? (WHITROW, 1993, GALISON, 2003, GINOUX, GERINI, 2013). Em outras palavras, o século XIX apresentou um campo fecundo para que questões sobre a ontologia do tempo pudessem ser desenvolvidas e aplicadas às ciências. Essa condição social propícia que torna a emergência de ideias possíveis pode ser vista no confronto entre os modelos cosmológico geocêntrico e heliocêntrico. Como mostrou A. Koestler (1980) os dados empíricos que Copérnico empregou eram os mesmos usados por C. Ptolomeu. Uma condição importante para emergência do heliocentrismo se deu pelas condições políticas da Europa. No caso de Poincaré, era justamente o problema da coordenação de relógios e a compreensão da simultaneidade, para elevar a França na guerra pela prioridade das longitudes, que exigiu que Poincaré levantasse, em uma leitura fleckiana, conexões ativas sobre o tempo.

Enquanto não se sai do domínio da consciência, a noção de tempo é relativamente clara. Não só distinguimos sem dificuldade a sensação

presente da lembrança das sensações passadas ou da previsão das sensações futuras, como também sabemos perfeitamente o que queremos dizer quando afirmamos que, de dois fenômenos conscientes dos quais conservamos a lembrança, um foi anterior ao outro; ou então que, de dois fenômenos conscientes previstos, um será anterior ao outro. Quando dizemos que dois fatos conscientes são simultâneos, queremos dizer que eles se interpenetram profundamente, de tal modo que a análise não pode separá-los sem mutilá-los. A ordem na qual dispomos os fenômenos conscientes não comporta qualquer arbitrariedade. Ela nos é imposta e não podemos mudá-la. Só tenho uma observação a acrescentar. Para que um conjunto de sensações se torne uma lembrança suscetível de ser classificada no tempo, é preciso que tenha cessado de ser atual, que tenhamos perdido o sentido de sua infinita complexidade, sem o que teria permanecido atual. É preciso que ele tenha, por assim dizer, cristalizado em torno de um centro de associações de ideias que será como uma espécie de etiqueta. Só poderemos classificar nossas lembranças no tempo quando estas tiverem, assim, perdido toda vida — do mesmo modo que um botânico arruma em seu herbário as flores dessecadas. Mas essas etiquetas só podem ser em número finito. Assim sendo, o tempo psicológico seria descontínuo. De onde vem a sensação de que entre dois instantes quaisquer há outros instantes? Classificamos nossas lembranças no tempo, mas sabemos que restam compartimentos vazios. Como isso seria possível, se o tempo não fosse uma forma preexistente em nosso espírito? Como saberíamos que existem compartimentos vazios, se esses compartimentos só nos fossem revelados por seu conteúdo? (POINCARÉ, 1898, p. 01).

Ao questionar sobre a consciência do tempo se inata, Poincaré antecipa uma pergunta feita pela psicologia cognitivista. O psicólogo francês J. Piaget (1969) mostrou que, embora o tempo faça parte da história natural e da evolução humana, a noção do tempo não é inata e nem automaticamente aprendidas, mas construtos cognitivos que nascem da experiência e ação. Piaget, em partes inspirado pelas ideias relativísticas de espaço e tempo, realizou experiências sistemáticas com crianças em diversas etapas do desenvolvimento cognitivo e observou a aquisição da intuição do tempo.

Segundo Jammer (2006) a origem das dificuldades com o conceito de tempo e a sua medida surgem da sua natureza abstrata. Por exemplo, embora o conceito de espaço possa ser abstraído a metafísica ou a matemática abstrata, podemos nos referir a sua medida a objetos de nosso cotidiano: polegadas, pés, botas. Existe uma relação direta entre objeto e o conceito. Mas com o tempo, não temos como estabelecer essa conexão direta. Por exemplo, os gregos acreditavam que dias e noites tinham a mesma duração, mesmo durante os solstícios (WHITROW, 1993). Outras civilizações buscaram em seus objetos cotidianos criar uma forma de medir e definir o tempo. R. Evans-Pritchard (1996) estudou a concepção do tempo entre os Nuer. Para essa tribo o referencial de tempo é o gado e a sucessão do tempo está relacionada as tarefas pastorais. E. P. Thompson (2016) registra

as diversas formas que os povos desenvolveram para medir o tempo: em Madagascar utiliza-se o cozimento do arroz (cerca de 30 minutos) ou a fritura de grilos (um instante) como padrões de tempo. Os nativos de Cross-River se referem ao cozimento do milho (cerca de 15 minutos). No Chile do século XVII o tempo era medido em função de orações como Credo e Ave-Maria. Há registros de terremotos que duraram dois Credos e que para cozinhar um ovo seria necessário o tempo de uma Ave-Maria. Outras civilizações simplesmente rejeitam a ideia de medir o tempo. Segundo Thompson (2016), Pierre Bourdieu também investigou as diferenças percepções na tribo dos Cabilas na Argélia. Bourdieu registrou a completa indiferença dessa civilização ao tempo e que seus habitantes se referem ao relógio como “oficina do diabo” Os cabilas não tem nada como hora marca, segundo Bourdieu, eles apenas combinam de se encontrar em algum local. Synge (1941, p. 251) apresenta um relato muito interessante sobre a percepção do tempo dos habitantes da Ilha Aran:

Na ilha, o conhecimento geral do tempo depende, bastante curiosamente, da direção do vento. Quase todas as cabanas são construídas com duas portas em frente da outra, e a mais abrigada das duas fica aberta durante todo o dia para deixar entrar luz no interior. Se o vento é norte, a porta do sul fica aberta, e o movimento da sombra do umbral sobre o chão da cozinha indica a hora; porém assim que o vento muda para o sul, a outra porta é aberta, e as pessoas, que jamais pensam em fazer um relógio de sol primitivo, ficam perdidas. Quando o vento é do norte, a velha senhora prepara minhas refeições com bastante regularidade; mas nos outros dias, ela frequentemente prepara meu chá às três horas em vez das seis.

Thompson (2016) mostra que na Inglaterra pré-revolução industrial, a passagem do tempo não diferia das tribos citadas. O trabalho era feito por dia e não pela hora. A revolução industrial e a popularização do relógio forçou a sociedade inglesa se adaptar a ditadura do tempo. O dia agora era fragmentado em horas e por hora o operário era remunerado. No século XIX, o controle do tempo se tornou uma necessidade política e social (GALISON, 2003). Redes de relógio controladas por telégrafos se expandiam. Poincaré, empregado no Bureau das Longitudes, coordenava esse projeto para o governo francês (GALISON, 2003, GINOUX, GERINI, 2014). Portanto, dessas experiências retiradas da história, sociologia e da antropologia, concluímos que a noção de tempo não pode ser tida como inata e que as formas de se medir o tempo variam de sociedade a sociedade. Essa é a mesma conclusão que chega Poincaré olhando a ontologia do tempo.

Enunciando que a definição comum do tempo se resume a máxima “*a duração de dois fenômenos idênticos é a mesma*”, Poincaré inicia uma reflexão para mostrar que dois

eventos iguais podem não ter duração igual. Aqui está um detalhe importante. Atualmente, muitos divulgadores e livros de ciência explicam que não há fenômenos instantâneos, pois os fenômenos não podem exceder a velocidade da luz. Por exemplo, se por alguma causa desconhecida o Sol desaparecesse, a Terra levaria em média 8 minutos para sentir a ausência do Sol, pois esse é o tempo necessário para que a luz solar e as perturbações gravitacionais do Sol cheguem até a Terra.

Em 1898 a situação era diferente. Havia uma considerável parcela de pesquisadores que defendiam que as interações a distância eram instantâneas, pois, do contrário, haveria uma violação do princípio da ação e reação (DARRIGOL, 1996). Foi com base nesse princípio que Wilhelm Eduard Weber desenvolveu seu modelo eletrodinâmico. O surgimento da eletrodinâmica de Maxwell, em 1873, só começaria a repercutir 15 anos depois, com a investigação teórica de Helmholtz e a descoberta de ondas eletromagnéticas por Hertz, em 1888 (DARRIGOL, 1996). Mesmo após as experiências de Hertz, a penetração da concepção de Maxwell de fenômenos elétricos e magnéticos, mediada pelo éter, não foi um processo rápido. Muitos pesquisadores resistiam à teoria de Maxwell pela sua complexidade matemática, preferindo abordagens alternativas (DARRIGOL, 1996). Para se ter um exemplo, durante sua licenciatura em matemática e física, 1896 à 1900, pela Politécnica de Zurique, Albert Einstein não teve nenhuma disciplina direcionada a eletrodinâmica de Maxwell (DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005).

Portanto, em 1898 era muito comum que os físicos acreditassem que não importassem quão distante os eventos ocorressem, os seus efeitos seriam imediatos. Isso justifica que Poincaré presuma tacitamente que seus colegas acreditem que “a duração de dois fenômenos idênticos é a mesma.” Por ser uma afirmação que muitos julgam como evidente, não haveria razão para questioná-la. Porém, a questão não era tão simples para Poincaré. Sendo um especialista em geometria não-euclidianas, dedicando importantes reflexões sobre sua importância e a sua realidade (POINCARÉ, 1899a, 1900f, 1901a, 1902a) que subsidiariam seu Convencionalismo, Poincaré sabia que se uma proposição, por mais evidente que pareça, como o quinto postulado de Euclides, pode ser substituída por outra proposição, mesmo que repugne o senso, desde que a nova proposição não incorra em nenhuma contradição lógica. Parte da filosofia de Poincaré se baseava em um ceticismo sofisticado, tudo pode e deve ser questionado (MARTINS, 2015). Desta forma, considerar que as mesmas causas produzem eventos com durações diferentes não era uma proposição que devesse ser descartada. A objeção mais comum ao raciocínio de Poincaré seria uma violação da terceira lei de Newton, conhecida como o princípio da ação e da

reação. Poincaré em suas reflexões sobre a Mecânica considerava que as leis de Newton eram convenções e não fenômenos induzidos da experiência (POINCARÉ, 1899a, 1902a). Sendo convenções, elas não podem ser consideradas melhores ou mais evidentes que outras convenções.

E então devemos modificar nosso postulado e nossa definição. Em vez de dizer “as mesmas causas levam o mesmo tempo para produzir os mesmos efeitos”, devemos dizer “causas mais ou menos idênticas levam mais ou menos o mesmo tempo para produzir mais ou menos os mesmos efeitos”. Nossa definição, portanto, é apenas aproximada. Aliás, como observa com muita propriedade o sr. Calinon numa dissertação recente (*Études sur les diverses grandeurs*, Paris, Gauthier-Villars, 1897): Uma das circunstâncias de um fenômeno qualquer é a velocidade da rotação da Terra; se essa velocidade de rotação varia, ela constitui, na reprodução desse fenômeno, uma circunstância que não permanece mais idêntica à ela mesma. Mas supor constante essa velocidade de rotação é supor que se sabe medir o tempo. Portanto nossa definição ainda não é satisfatória; certamente não é aquela que implicitamente adotam os astrônomos dos quais eu falava acima, quando afirmam que a velocidade da rotação terrestre vai diminuindo. Que sentido tem em sua boca essa afirmação? Só podemos compreendê-lo analisando as provas que fornecem para sua proposição. De início, dizem que a fricção das marés, que produz calor, deve destruir força viva. Invocam então o princípio das forças vivas ou da conservação da energia. Dizem em seguida que a aceleração secular da Lua, calculada segundo a lei de Newton, seria menor do que a deduzida das observações, se não se fizesse a correção relativa à diminuição da velocidade da rotação terrestre. Invocam, portanto, a lei de Newton. Em outros termos, definem a duração do seguinte modo: o tempo deve ser definido de tal maneira que a lei de Newton e a das forças vivas sejam verificadas. A lei de Newton é uma verdade de experiência; como tal, é apenas aproximada, o que mostra que ainda temos apenas uma definição por aproximação. Se agora supomos que vamos adotar uma outra maneira de medir o tempo, nem por isso as experiências sobre as quais está fundada a lei de Newton deixariam de conservar o mesmo sentido. Só que o enunciado da lei seria diferente, porque seria traduzido para uma outra linguagem; evidentemente, seria muito menos simples. De modo que a definição implicitamente adotada pelos astrônomos pode resumir-se assim: “O tempo deve ser definido de tal modo que as equações da mecânica sejam tão simples quanto possível.” Em outros termos, não há um modo de medir o tempo que seja mais verdadeiro que outro; o que geralmente é adotado é apenas mais cômodo. De dois relógios não temos o direito de dizer que um funciona bem e o outro funciona mal; podemos dizer apenas que é vantajoso nos reportarmos às indicações do primeiro. A dificuldade da qual acabamos de nos ocupar foi, como eu disse, muitas vezes assinalada; entre as obras mais recentes que dela tratam citarei, além do opúsculo do sr. Calinon, o tratado de mecânica do sr. Andrade. (POINCARÉ, 1898, p.03-04)

Nessa passagem, fica bastante claro as circulações intercoletivas que Poincaré realiza: ao Poincaré começa com a questão metafísica dos estados físicos como sendo

uma consequência das leis de Newton, depois Poincaré mostra que essa definição é imprecisa, recorrendo ao coletivo de pensamento dos astrônomos, desse coletivo, Poincaré utiliza o conceito de energia (termodinâmica) e as definições mecânicas, e retorna ao coletivo da metafísica com uma nova conexão passiva:

Em outros termos, não há um modo de medir o tempo que seja mais verdadeiro que outro; o que geralmente é adotado é apenas mais cômodo. De dois relógios não temos o direito de dizer que um funciona bem e o outro funciona mal; podemos dizer apenas que é vantajoso nos reportarmos às indicações do primeiro. (POINCARÉ, 1898, p.06)

Poincaré continua seu raciocínio invocando aquilo que se tornou conhecido como Princípio de Mach: a disposição de todos os corpos no universo exercem uma ação sobre o centro de massa de um corpo em qualquer posição do espaço (POINCARÉ, 1898). Como imaginamos um aparelho de medidas ideais, cuja a precisão é infinitamente alta, devemos considerar que até o mais remoto dos corpos interferem no aparelho. Contudo, mesmo o operador mais hábil não conseguirá computar e compensar a interferência de todos os elementos inerciais do universo, por isso é necessário falar em “causas mais ou menos idênticas levam mais ou menos o mesmo tempo para produzir mais ou menos os mesmos efeitos”, mas a definição em si é apenas uma aproximação e está sujeita a um grau de arbitrariedade. Ao analisar o papel das leis de Newton e das forças vivas (energia), Poincaré prefere não utilizar sua conclusão de que elas são convenções. Provavelmente, Poincaré intencionava mostrar que mesmo assumindo que as leis de Newton e a leis de energia são verdades experimentais, é incapaz de justificar que a simultaneidade é absoluta. Mas, assim como ocorreu com as tentativas de provar o quinto postulado de Euclides, os argumentos se provam como um conjunto de proposições circulares.

A segunda dificuldade atraiu até aqui muito menos atenção; contudo, ela é inteiramente análoga à precedente; e mesmo, logicamente, eu deveria ter falado dela de início. Dois fenômenos psicológicos se passam em duas consciências diferentes; quando digo que são simultâneos, o que quero dizer? Quando digo que um fenômeno físico que se passa fora de toda consciência é anterior ou posterior a um fenômeno psicológico, o que quero dizer? Em 1572, Tycho-Brahé notou no céu uma estrela nova. Uma imensa conflagração se produziu em algum astro muito distante; mas produziu-se muito tempo antes; foi preciso que se passassem pelo menos duzentos anos até que a luz que partia dessa estrela alcançasse nossa Terra. Portanto, essa conflagração era anterior ao descobrimento da América. Pois bem, quando digo isso, quando considero esse fenômeno gigantesco que talvez não tenha tido nenhuma testemunha, já que os satélites dessa estrela talvez não tenham habitantes, quando digo que esse fenômeno é anterior à formação da imagem visual da ilha de Española na consciência de Cristóvão Colombo, o que quero dizer? Basta um pouco de reflexão para

compreender que todas essas afirmações, por si sós, não têm nenhum sentido. Só podem adquirir um sentido a partir de uma convenção. (POINCARÉ, 1898, 06-07)

E, mais à frente Poincaré, escreve:

As definições comuns que convêm para o tempo psicológico não poderiam mais nos bastar. Dois fatos psicológicos simultâneos são ligados tão estreitamente, que a análise não pode separá-los sem mutilá-los. Dar-se-á o mesmo com dois fatos físicos? Meu presente não está mais perto do meu passado de ontem do que do presente de Sirius? Foi dito também que dois fatos devem ser considerados como simultâneos quando a ordem de sua sucessão pode ser invertida à vontade. É evidente que essa definição não poderia convir para dois fatos físicos que se produzem a grande distância um do outro, e é também evidente que, no que lhes diz respeito, nem sequer se compreende mais o que pode ser essa reversibilidade; aliás, é antes de tudo a própria sucessão que seria preciso definir. (POINCARÉ, 1898, p. 08)

Essas considerações podem parecer triviais, porém devemos nos lembrar que esse artigo foi escrito em 1898, nessa o senso comum, mesmo o científico, não considerava essas ideias tão claras. O pressuposto que a velocidade da luz no espaço se propaga com a mesma velocidade em todas as direções e era independente da velocidade da fonte, ainda não era consensual (DARRIGOL, 1996). Menos evidente era a conexão da causalidade e simultaneidade com a propagação da luz. Poincaré construiu a sua percepção do tempo a partir de uma experiência no Bureau des Longitudes (GALISON, 2003). A necessidade de determinação da geodésica francesa, estudos mais precisos sobre a forma da Terra envolviam diretamente o processo de sincronização de relógios usando sinais ópticos (GALISON, 2003). Poincaré havia se tornado um dos maiores especialistas em telegrafia sem fio da França, não há dúvidas que essa experiência foi essencial para romper o senso comum sobre o tempo (GALISON, 2003, JAMMER, 2006, MARTINS, 2015). Porém, o que despertou conexões ativas em Poincaré é a circulação intercoletiva com o coletivo de pensamento da astronomia.

No estudo da geodésica e da longitude, as distâncias eram relativamente pequenas em comparação a velocidade da luz, portanto a troca de sinais poderia ser considerada instantânea. Porém, na mecânica celeste, as distâncias eram “astronômicas” e o fato da velocidade da luz ser finita não poderia ser ignorado. Quando Poincaré levou o problema da sincronização de relógios para o espaço astronômico, ele percebeu que a simultaneidade era relativa e o princípio de coordenação de relógios, a rigor, exigia uma regra mais complicada (POINCARÉ, 1898). Essa regra não era outra senão a transformação de Lorentz. O fato de Poincaré coordenar redes de telegrafo sem fio e

pensar no problema da sincronização em escalas astronômicas, forneceu um elemento ativo, que era imperceptível a Lorentz.

Procuremos então nos dar conta do que entendemos por simultaneidade ou anterioridade, e para isso analisemos alguns exemplos. Escrevo uma carta; em seguida, ela é lida pelo amigo a quem a enviei. Eis aí dois fatos que tiveram como teatro duas consciências diferentes. Ao escrever essa carta, possuí sua imagem visual, e meu amigo, por sua vez, possuiu essa mesma imagem ao ler a carta. Embora esses dois fatos se passem em mundos impenetráveis, não hesito em ver o primeiro como anterior ao segundo, porque creio que aquele foi a causa deste último. Ouço o trovão e concluo que houve uma descarga elétrica; não hesito em considerar o fenômeno físico como anterior à imagem sonora recebida por minha consciência, porque creio que ele é a causa desta. Eis aí, portanto, a regra que seguimos, e a única que podemos seguir; quando um fenômeno nos aparece como a causa de outro, nós o vemos como anterior. É então pela causa que definimos o tempo; mas quase sempre, quando dois fatos nos aparecem ligados por uma relação constante, como reconhecemos qual deles é a causa e qual é o efeito? Admitimos que o fato anterior, o antecedente, é a causa do outro, do consequente. É portanto pelo tempo que definimos a causa. Como ter uma saída para essa petição de princípio? Ora dizemos *post hoc, ergo propter hoc*, ora *propter hoc, ergo post hoc*; conseguiremos sair desse círculo vicioso? (POINCARÉ, 1898, p. 08-09)

Segundo o senso comum (conexão passiva) o tempo é a medida de uma consciência sobre a ordem dos eventos (POINCARÉ, 1898). No problema da medida do espaço, um observador registra diferentes posições de um corpo em movimento ordenando a ordem temporal. Por exemplo, se dispomos de um relógio, podemos relacionar as posições ocupadas por um corpo a cada minuto registrado pelo relógio. O que há por de trás desse processo? Segundo Poincaré, estamos dizendo que a posição do corpo A e a posição do ponteiro dos minutos são eventos simultâneos, isto é, são percebidos ao mesmo tempo pelo observador. Portanto, a medida do tempo se transforma em um problema de ordem de eventos simultâneos, ou, de causas e efeitos.

Mas como definimos as causas e os efeitos? Por meio do tempo. Sempre observamos que ANTES do trovão há um RELÂMPAGO. Observamos que sempre que a tempestade tende a cessar sempre que a diferença de tempo entre o RELÂMPAGO e o TROVÃO tendem a aumentar. Em todos estes exemplos estamos localizando os eventos no tempo. Dizemos que A é a causa de B, porque A acontece ANTES de B. Porém, como podemos organizar os eventos, se ao definir a causa já organizamos os eventos? Essa é a circularidade que Poincaré denuncia e que sustenta a sua tese: a noção e a medida de tempo é convencional. Rubem Alves (1993, p. 124-125) ilustra essa questão:

Os dados que estão em suas mãos são: um evento antecedente, “raio”, e um evento que se lhe segue, “trovão”. Haverá algum dado sensório, dentro desta experiência, que corresponda à ideia de causalidade? Não. Se houvesse, seria possível concluir, de uma única experiência, que um determinado evento é causa de outro, o que não acontece. A mesma coisa poderá ser observada na 2.a, 3.a, 4.a experiências. Em nenhuma delas a relação causal aparece como um dado empírico, ao lado do raio e do trovão. Será necessário que as experiências se repitam, se acumulem, criem hábitos mentais... Mas é isto mesmo! Os hábitos e costumes nos fazem ver a realidade através das rotinas, das repetições. Eles criam formas peculiares de contemplar o mundo. Aquilo que já aconteceu muitas vezes, da mesma maneira, deve continuar a acontecer assim mesmo... Esta é a surpreendente resposta que Hume nos dá. “Quando a repetição de um certo ato ou operação particular produz a tendência de renovar o mesmo ato ou operação, sem para isto sermos impelidos por qualquer raciocínio (lógico) ou qualquer processo do entendimento, dizemos sempre que esta propensão é efeito do costume” (Hume. op. cit. p. 57). Assim, a contragosto somos forçados a admitir que, nas teorias, não são apenas os fatos que falam. É o costume, um fator psicológico, que faz com que liguemos estes fatos de uma certa forma. Foi-se o ideal de um discurso que enuncia os fatos apenas. Porque aqui, sub-repticiamente, o homem introduz sua crença. Mas a coisa se complica ainda mais quando nos perguntamos acerca dos mecanismos que nos fazem saltar dos dados (passado) para o futuro. Hume diz que a “única utilidade imediata de todas as ciências está em que elas nos ensinam a controlar e regular os eventos futuros por meio de suas causas” (Idem, p. 87), o que torna crucial a compreensão desta transição. E a sua conclusão é de novo perturbadora. A única ponte que liga o nosso passado ao futuro é, de forma idêntica, o hábito. As coisas se repetiram tantas vezes, de forma idêntica, que fomos levados a um ato de fé: o futuro deve ser análogo ao passado. Resumindo: elaboramos teorias não porque a lógica o permita ou as observações as produzam. As teorias, estas ambiciosas generalizações que abarcam o passado e o futuro, o aqui e os confins do espaço, são construídas sobre nossa crença na continuidade do universo, uma exigência que brota da fé, dos sentimentos, dos hábitos. Creemos que o universo é ordenado e organizado e que aquilo que é válido aqui e agora será válido também lá e então. A partir disto saltamos do particular para o geral: de alguns gansos para todos os gansos, da amostra do café para a saca inteira, da regularidade que percebi num lugar e tempo específicos, para afirmações que vão até o início e o fim do mundo... Passamos a usar “botas de sete léguas”. Só que elas não são construídas com fatos, mas costuradas com a crença, a esperança, a confiança de que a realidade é contínua e una: um pressuposto de fé que não pode ser provado ou demonstrado. E assim, com sua bota irracional, dotada de asas da imaginação, o cientista levanta, voo para conhecer o mundo... De fato, algo muito perturbador. Não é de se admirar que filósofos tivessem querido substituir sugestão tão insólita (na verdade, vizinha próxima da religião e dos mitos), pela alternativa mais respeitável da probabilidade, que, sendo menos pretensiosa, tem, pelo menos, a respeitabilidade da matemática

O argumento de Poincaré baseia-se precisamente nessa noção de relações que criam circularidades e não podem ser resolvidas, a não ser pelo estabelecimento de convenções.

Isso não significa que toda a ciência se fundamente apenas em convenções, apenas algumas verdades.

Embora Poincaré tenha distinguido entre geometria e mecânica na medida em que este último contém leis experimentais que não são convenções, ele argumentou que os princípios da mecânica são convenções como os axiomas da geometria. Aceitamos as três leis de Newton como os fundamentos da mecânica, ele argumentou, porque são as leis mais simples, mas não porque são verdadeiras. Ao aplicar esse argumento à "Primeira Lei" de Newton, a lei da inércia, Poincaré teria sido capaz de estender seu convencionalismo do domínio das concepções geométricas ou espaciais para o das concepções temporais, como a igualdade de dois intervalos de tempo. De acordo com a lei da inércia, como declarado no Principia de Newton, “todo corpo continua em seu estado de repouso, ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que obrigado a mudar esse estado por forças impressas nele” ou, expressado em breve, uma partícula livre se move sempre com velocidade constante. Mas se tal partícula cobre distâncias iguais em intervalos de tempo iguais, o problema, discutido por Isaac Barrow sobre como verificar a igualdade de dois intervalos de tempo separados temporariamente, parece encontrar facilmente sua solução. Bastaria medir as distâncias iguais cobertas por tal partícula para assegurar a igualdade dos intervalos de tempo correspondentes a essas distâncias. Se, como Poincaré afirma, no entanto, a lei da inércia é meramente uma convenção, não é necessariamente verdade que os intervalos de tempo em discussão são “realmente” iguais em duração. (JAMMER, 2006, p. 99).

Por isso, Poincaré começa avaliar a questão da percepção dos eventos e o princípio da reação:

Veamos, então, não como chegamos a nos sair bem, pois não o conseguimos completamente, mas como procuramos nos sair bem. Executo um ato voluntário A e em seguida experimento uma sensação D, que vejo como uma consequência do ato A; por outro lado, por uma razão qualquer, infiro que essa consequência não é imediata, mas que se realizaram fora da minha consciência dois fatos B e C dos quais não fui testemunha, e de tal modo que B seja o efeito de A, que C seja o de B, e D o de C. Mas por que isso? Se creio ter razões para ver os quatro fatos A, B, C, D como ligados um ao outro por um elo de causalidade, por que dispô-los na ordem causal A B C D, e ao mesmo tempo na ordem cronológica A B C D, em vez de qualquer outra ordem? Vejo bem que no ato A tenho a impressão de ter sido ativo, ao passo que experimentando a sensação D, tenho a de ter sido passivo. É por isso que vejo A como a causa inicial e D como o efeito último; é por isso que disponho A no começo da cadeia e D no fim; mas por que colocar B antes de C, em vez de C antes de B? Se nós fazemos essa pergunta, respondemos geralmente: sabemos bem que é B a causa de C, já que vemos sempre B ocorrer antes de C. Esses dois fenômenos, quando somos testemunhas, passam-se numa certa ordem; quando fenômenos semelhantes ocorrem sem testemunha, não há razão para que essa ordem seja invertida. Sem dúvida, mas tomemos cuidado; jamais conhecemos diretamente os fenômenos físicos B e C; o que conhecemos são sensações B' e C' produzidas respectivamente por B e

por C. Nossa consciência nos informa imediatamente que B' precede C', e admitimos que B e C se sucedem na mesma ordem. Essa regra parece de fato bem natural, e contudo muitas vezes somos levados a derogá-la. Só ouvimos o ruído do trovão alguns segundos após a descarga elétrica da nuvem. De dois raios — um distante e outro próximo —, não pode o primeiro ser anterior ao segundo, embora o ruído do segundo nos chegue antes do ruído do primeiro? (POINCARÉ, 1898, p. 09-10).

O pensamento de Poincaré pode parecer bastante confuso e ir contra o bom senso e a lógica. Porém, essa impressão é causada pelas nossas convenções sobre o tempo e a causalidade (WHITROW, 1993). Um problema famoso, que foi discutido por Flood (1883) é a questão: “Se uma árvore cai na floresta e ninguém está perto para ouvir, será que faz um som?” Do ponto de vista da metafísica e da ontologia, a questão não é tão simples. Assumir que a árvore caindo não depende da presença de observadores, acaba se tornando apenas um convencionalismo. Não temos uma garantia que a presença de observadores perturbe o sistema de tal forma que modifica as condições de queda da árvore. Os orientais acreditam em uma causalidade diferente da que estamos acostumados (WHITROW, 1993).

Por exemplo, na cultura budista a palavra Karma significa ação. Os budistas acreditam que “nenhuma folha caia em vão”, existe um vínculo causal entre todas as coisas. Contudo há dois aspectos na visão dos budistas que diferenciam da visão ocidental: (1) os budistas acreditam que a realidade é uma criação da mente, assim todas as ações humanas (incluindo o próprio pensamento) criam a realidade. (KYOKA, 2012). Não há um aspecto que não seja afetado pelo homem, em outras palavras, a realidade é um todo indivisível e conectado por vínculos causais. (2) não existe uma ação idêntica à outra, cada circunstância é uma união de várias ações e vínculos causais, por isso o homem ouvindo a árvore cair é uma situação causalmente diferente da árvore caindo sozinha. (KYOKA, 2012). Ações diferentes produzem efeitos diferentes. É digno de nota que os budistas desenvolveram uma doutrina do tempo que preconiza a relatividade do tempo e da simultaneidade (KYOKA, 2012).

A visão de causalidade ocidental deve-se em grande parte a doutrina judaica-cristã que se tornou um padrão. O primeiro filósofo a colocar a questão do tempo no ocidente parece ter sido Santo Agostinho no século IV d.C. (WHITROW, 1993, JAMMER, 2006, 2010). A preocupação dos judeus, e posteriormente, dos cristãos com tempo deve-se a dois fatos: (1) comemoração de datas religiosas como a Páscoa e a Festa dos Tabernáculos, que não tinham data fixa, mas dependiam de cálculos envolvendo a Lua

cheia e o número de domingos no mês (WHITROW, 1993, JAMMER, 2010). (2) as profecias, cujo cumprimento seria precedido de certos sinais no céu e na vida civil e seriam consequências a desobediência do povo a lei de Deus. Nos evangelhos de Matheus, Marcos e Lucas há um esforço de conectar as profecias do Cristo contidas em diferentes parte do Antigo Testamento com o nascimento de Jesus (THEISSEN, 2018). Para os medievais o tempo tinha um começo (criação descrita em Gênesis) e um fim (a volta de Cristo), porém poucos se dispunham a discutir o que era o tempo (WHITROW, 1993, JAMMER, 2006, 2010). Para os cristãos havia um sentimento de urgência e de fim eminente, portanto as ações desempenhavam um papel muito maior do que as reflexões metafísicas (WHITROW, 1993, JAMMER, 2006, 2010). Uma vez que o mundo estava na eminência do seu fim, com o retorno de Cristo, não haveria porque questionar os conceitos de futuro, duração, simultaneidade, o único interesse no tempo estava em estabelecer cálculos precisos para realização das festas religiosas. (WHITROW, 1993, JAMMER, 2006, 2010) Como não ocorreu o fim do mundo, os medievais passaram a acreditar em um retorno de Cristo não tão imediato e o planejamento de um futuro passou a ser um empreendimento cada vez mais comum (WHITROW, 1993, JAMMER, 2006, 2010).

Assim como os judeus no Antigo Testamento atribuíam as desgraças naturais e as crises ao castigo de Deus, os medievalistas também acreditam numa relação causal entre o castigo e a desobediência (WHITROW, 1993, JAMMER, 2006, 2010). O que a pesquisa histórica do tempo tende a mostrar que nossa visão de causas e efeitos, como descrito por Poincaré, foi uma construção fundamentada principalmente no culto religioso. (WHITROW, 1993, JAMMER, 2006, 2010). É por essa razão que parte dos orientais, que não foram influenciados pelo credo judaico-cristão apresentavam uma visão diferente do tempo. Quando Poincaré pergunta: “de dois raios — um distante e outro próximo —, não pode o primeiro ser anterior ao segundo, embora o ruído do segundo nos chegue antes do ruído do primeiro?” a resposta de uma pessoa criada na tradição ocidental seria NÃO. Enquanto, uma pessoa criada em uma cultura oriental responderia SIM. Portanto, embora a pergunte afronte nossos sentidos, ela não é descabida de sentido. É possível que essa influência tenha vindo do contato de Poincaré com diferentes culturas (coletivos de pensamento) durante suas viagens ao oriente e a África. Outra possibilidade, é que as ideias de Poincaré fossem uma extensão do Princípio de Mach e sua crítica a Newton:

Outra dificuldade; teremos nós realmente o direito de falar da causa de um fenômeno? Se todas as partes do Universo são solidárias numa certa

medida, um fenômeno qualquer não será o efeito de uma causa única, mas a resultante de causas infinitamente numerosas; ele é, como se diz com frequência, a consequência do estado do Universo um momento antes. Como enunciar regras aplicáveis a circunstâncias tão complexas? E contudo só desse modo essas regras poderão ser gerais e rigorosas. Para não nos perdermos nessa infinita complexidade, levantemos uma hipótese mais simples; consideremos três astros, como por exemplo o Sol, Júpiter e Saturno; mas para maior simplicidade, vejamo-los como reduzidos a pontos materiais e isolados do resto do mundo. As posições e as velocidades dos três corpos em um instante dado bastam para determinar suas posições e suas velocidades no instante seguinte, e por conseguinte num instante qualquer. Suas posições no instante t determinam suas posições no instante $t + h$, assim como suas posições no instante $t - h$. E ainda há mais; a posição de Júpiter no instante t , unida à de Saturno no instante $t + a$, determina a posição de Júpiter num instante qualquer, e a de Saturno num instante qualquer. O conjunto das posições que ocupam Júpiter no instante $t + \varepsilon$ e Saturno no instante $t + a + \varepsilon$ está ligado ao conjunto das posições que ocupam Júpiter no instante t e Saturno no instante $t + a$, por leis tão precisas quanto a de Newton, embora mais complicadas. Portanto, por que não ver um desses conjuntos como a causa do outro, o que levaria a considerar como simultâneos o instante t de Júpiter e o instante $t + a$ de Saturno? Para isso só pode haver razões de comodidade e de simplicidade — muito poderosas, é verdade. (POINCARÉ, 1898, p. 10)

Embora não cite explicitamente, Poincaré está enunciando o Princípio de Mach que diz que existe uma influência de cada parte do universo sobre a inércia de um corpo. Se não podemos, nem por meio da abstração, reduzir as ações sobre um objeto e determinar como cada uma contribui individualmente sobre seus efeitos, não estamos em posição de dizer que a causa de B é A. Outra possibilidade, é uma circulação intercoletiva entre coletivo de pensamento dos engenheiros de minas e a coordenação de linhas férreas, o estudo qualitativo das equações diferenciais e a mecânica celeste, que levaria a Poincaré a uma protoideia da Teoria do Caos. Galison (2003) conseguiu rastrear a origem da Teoria do Caos de Poincaré aos seus serviços prestados enquanto engenheiro de minas para a segurança de minas de carvão. Poincaré havia se interessado pelo problema da estabilidade do sistema solar. Esse problema estava ligado a dificuldade de se estudar a relação mútua entre múltiplos corpos, até o caso mais simples, envolvendo três corpos, apresentava uma complexidade que desafiava os melhores pesquisadores (CHENCINER, MONTGOMERY, 2001). A experiência de Poincaré com mapas de minas de carvão e o uso de sistemas dinâmicos levaram-no a procurar uma solução diferente. Ao invés de empregar a análise matemática, Poincaré buscou uma análise qualitativa destas linhas. (GALISON, 2003). Poincaré estava ciente dessa necessidade já algum tempo, como podemos ver em seu ensaio sobre equações diferenciais de 1881:

Tomemos, por exemplo, o problema dos três corpos: não podemos nos perguntar se um dos corpos permanecerá sempre em uma determinada região do céu ou se será capaz de se afastar indefinidamente; se a distância de dois corpos aumentará ou diminuirá até o infinito, ou permanecerá dentro de certos limites? Não podemos nos fazer mil perguntas desse tipo, todas as quais serão resolvidas quando pudermos construir qualitativamente as trajetórias dos três corpos? E, se considerarmos um número maior de corpos, qual é a questão da invariabilidade dos elementos dos planetas, se não uma verdadeira questão de geometria? A análise qualitativa, visto que mostrar que o eixo maior não tem variações excêntricas, é mostrar que oscila constantemente entre certos limites. Tal é o vasto campo de descobertas que se abre antes dos gêômetras. (POINCARÉ, 1891, p. 376-377)

Em 1882, 1885 e 1886, Poincaré republicou esse ensaio fazendo novos acréscimos. Em todos eles, o problema dos três corpos e a necessidade de uma abordagem diferenciada é latente. Esse raciocínio levou a Poincaré desenvolver os fundamentos da topologia moderna. Em 1899, um ano após escrever *La Mesure du Temps*, Poincaré escreveu a Mittag-Leffler que estava perplexo com a sua descoberta de que “o caos, não a estabilidade, reinava neste novo universo.” (GALISON, 2003), em outras palavras, a causalidade no Universo é acidental.

Por fim, Poincaré mostra que as dificuldades impostas pelo princípio de Mach e do problema dos três corpos nos levam a assumir certos pressupostos por comodidade. A complexidade associada aquilo que irá ser chamado de Teoria do Caos, impõe um aspecto convencional na ciência. É importante notar que as convenções exercem mais do que um papel de comodidade, as convenções são essenciais para o progresso da ciência. Poincaré mostra que se os cientistas não assumem essas convenções, a complexidade dos problemas os levariam a estagnação, uma vez que eles insistiriam gastar seus esforços em problemas que podem sequer ter solução.

Mas passemos a exemplos menos artificiais; para nos dar conta da definição implicitamente admitida pelos cientistas, vamos observá-los enquanto trabalham, e busquemos as regras segundo as quais investigam a simultaneidade. Tomarei dois exemplos simples; a medida da velocidade da luz e a determinação das longitudes. Quando um astrônomo me diz que determinado fenômeno estelar — que seu telescópio lhe revela naquele momento — ocorreu contudo há cinquenta anos, busco o que ele quer dizer com isso: pergunto-lhe de início como o sabe, isto é, como ele mediu a velocidade da luz. Começou por *admitir* que a luz tem uma velocidade constante, e em particular que sua velocidade é a mesma em todas as direções. Esse é um postulado sem o qual nenhuma medida dessa velocidade poderia ser tentada. Esse postulado jamais poderá ser verificado diretamente pela experiência; poderia ser contradito por ela, se os resultados das diversas medidas não fossem concordantes. Devemos nos considerar felizes por essa contradição não ter ocorrido, e pelo fato de poderem explicar-se

facilmente as pequenas discordâncias que podem acontecer. Em todo caso o postulado, em conformidade com o princípio da razão suficiente, foi aceito por todos; o que quero lembrar é que ele nos fornece uma nova regra para a pesquisa da simultaneidade, inteiramente diferente daquela que havíamos enunciado acima. Admitido esse postulado, vejamos como se mediu a velocidade da luz. Sabe-se que Roemer serviu-se dos eclipses dos satélites de Júpiter e procurou saber em quanto tempo o evento se atrasava em relação à predição. Mas como se faz essa predição? Com o auxílio das leis astronômicas, como por exemplo a lei de Newton. Os fatos observados não poderiam do mesmo modo explicar-se se atribuíssemos à velocidade da luz um valor um pouco diferente do valor adotado, e se admitíssemos que a lei de Newton é apenas aproximada? Só que seríamos levados a substituir a lei de Newton por uma outra mais complicada. Assim, adotamos para a velocidade da luz um valor tal que as leis astronômicas compatíveis com esse valor sejam tão simples quanto possível. Quando os marinheiros ou geógrafos determinam uma longitude, têm que resolver precisamente o problema que nos ocupa; sem estar em Paris, devem calcular a hora de Paris. Como se arranjam eles? Podem levar um cronômetro acertado em Paris. O problema qualitativo da simultaneidade é reduzido ao problema quantitativo da medida do tempo. Não preciso retornar às dificuldades relativas a este último problema, uma vez que já insisti longamente sobre ele anteriormente. Ou então observam um fenômeno astronômico, tal como um eclipse da Lua, e admitem que esse fenômeno é percebido simultaneamente de todos os pontos do globo. Isso não é inteiramente verdadeiro, já que a propagação da luz não é instantânea; se desejássemos exatidão absoluta, haveria uma correção a fazer, segundo uma regra complicada. Ou então, enfim, servem-se do telégrafo. Antes de mais nada, é claro que a recepção do sinal em Berlim, por exemplo, é posterior à expedição desse mesmo sinal em Paris. É a regra da causa e do efeito analisada acima. Mas posterior em quanto tempo? Em geral, negligenciamos a duração da transmissão e consideramos os dois eventos como simultâneos. Mas para sermos rigorosos seria preciso fazer ainda uma pequena correção, por um cálculo complicado; não a fazemos na prática, pois seria muito menor do que os erros de observação; nem por isso sua necessidade teórica deixa de subsistir, no nosso ponto de vista, que é o de uma definição rigorosa. Desta discussão quero lembrar dois fatores: 1º – As regras aplicadas são muito variadas. 2º – É difícil separar o problema qualitativo da simultaneidade do problema quantitativo da medida do tempo, quer utilizemos um cronômetro, quer tenhamos que levar em consideração uma velocidade de transmissão, como a da luz, pois não poderíamos medir uma tal velocidade sem *medir* um tempo. (POINCARÉ, 1898, p. 10-11)

Essa é uma passagem que deixa evidente as circulações intercoletivas de Poincaré e a influência do Bureau des Longitudes. O problema que Poincaré estava analisando era metafísico e, no sentido de Bauman e May, sociológico: o que é o tempo? O que é a simultaneidade? Como medimos o tempo? O que são eventos simultâneos? Para responder essas questões Poincaré analisa o problema na perspectiva filosófica, psicológica, física (mecânica e termodinâmica), na matemática (equações diferenciais e

a estabilidade) e geometria (grupos e o convencionalismo geométrico). Agora Poincaré convida o seu leitor a discutir a questão do ponto de vista de dois coletivos de pensamento: o da geociências (problema das longitudes, que são ativaram essas conexões em Poincaré) e o da astronomia, dois coletivos de pensamento que Poincaré estava bem familiarizado.

Este é o ponto crucial - Poincaré invocou a longitude determinada telegraficamente como a base para estabelecer a simultaneidade entre locais distantes. Ele insistiu, nas linhas mais célebres do ensaio, que na sincronização dos relógios era preciso levar em consideração o tempo de transmissão. Ele imediatamente acrescentou que essa pequena correção faz pouca diferença para fins práticos. E ele observou que o cálculo do tempo exato de trânsito para um sinal elétrico de telégrafo era complexo. De pelo menos 1892-93, Poincaré ensinou a teoria da transmissão telegráfica de sinais e revisou os estudos experimentais que mediam a velocidade da transmissão elétrica em fios de ferro e cobre. Esse interesse não diminuiu. Em 1904, em uma série de palestras na *Ecole Supérieure de Télégraphie*, ele analisou extensivamente a “equação do telegrafista”, comparando-a com o trabalho de outros e referindo-se especificamente à física dos cabos telegráficos submarinos. (GALISON, 2003, p. 182-183).

Recordemos que no século XIX, os novos métodos da óptica haviam permitido medir com maior precisão a velocidade da luz. Porém, todas essas medidas partiam de um postulado tácito: a velocidade da luz no vácuo é isotrópica. De fato, embora este seja um postulado aceito até hoje, não existe maneira de prova-lo. Deixe-me mostrar o porquê. Façamos a pergunta: como medimos a velocidade de um corpo que se desloque por inércia? Marcamos dois pontos sobre uma superfície plana, medimos a sua distância e calculamos o tempo que um corpo demora para se deslocar do ponto A até o ponto B.

O que torna nossa experiência possível é que o corpo reflete luz solar que chega sobre ele. Suponha que nos encontramos sobre o ponto A, quando o corpo passar por nós disparamos um cronômetro. Quando o corpo ocupar a posição B, a luz que incide sobre ele será, segundo nossa compreensão, refletida e viajará até o ponto A, onde nos encontramos. Quando a luz nos atinge, o cronômetro é interrompido. Se dividirmos o espaço entre os pontos AB pelo tempo registrado no cronômetro obteremos um valor ligeiramente menor para a velocidade do corpo. Isso ocorre, porque quando o corpo chegou em B, esse evento não é simultâneo a nossa percepção. A imagem do corpo teve que viajar a distância AB a velocidade da luz, causando uma diferença de valores. Portanto, devemos subtrair do nosso cronômetro o tempo que a luz gastou até chegar ao ponto A. O cálculo é simples, o tempo a ser subtraído é dado pela razão da distância AB pela velocidade da luz. O problema é: qual a velocidade da luz?

Como seria possível medir a velocidade da luz? Assim como no problema do corpo se desloca entre dois pontos, a reflexão nos mostra que é impossível medir apenas a

velocidade de ida. Como se perde qualquer noção de simultaneidade para dois eventos separados no espaço, isso exige que as medidas de tempo sejam registradas no mesmo local. Portanto, qualquer medida de velocidade, incluindo a velocidade da luz, é uma medida do tempo de ida e volta. Quando dizemos que a velocidade da luz na ida é igual a velocidade da luz na volta, estamos estabelecendo uma convenção. O problema da simultaneidade nos impõe uma condição física intransponível: medir a velocidade da luz em um único sentido. Como o próprio Poincaré observa, poderíamos supor que a velocidade da luz é variável e o cálculo de ida e volta é apenas uma média, porém, esse postulado introduziria dificuldades adicionais. De todas as infinitas premissas, todas impossíveis de serem decididas pela experiência, a mais simples é aquela que assume que a velocidade da luz é isotrópica.

Outra premissa que assumimos a validade da lei da inércia. Dizemos que o corpo se desloca por inércia. Mas o que isso significa? Ao nosso entendimento, significa que para cada ponto do espaço, a velocidade do corpo é sempre a mesma. Porém, poderia acontecer que a velocidade do corpo e a velocidade da luz em cada ponto fosse ligeiramente variável, de forma que quando observamos o corpo, essas variações se compensam e confirmamos por meio da definição de velocidade que ela é mesma para todos os pontos.

Aqui, acreditamos, que é preciso fazer um importante adendo. O convencionalismo não é um tipo de relativismo filosófico. Não podemos medir a velocidade da luz em um único sentido, porém, todos os observadores em referenciais inerciais concordam que a velocidade de ida e volta da luz no vácuo é igual a c . No problema de medir a velocidade do corpo, tanto um observador em A e um observador em B que adotem a convenção que a velocidade é isotrópica irão concordar quanto a velocidade do corpo, ao realizarem as correções. Em outras palavras, na perspectiva convencionalista existem situações em que não se pode decidir a veracidade dos fatos por meios empíricos, levando aos cientistas optarem por convenções cômodas. Porém, há outros fatos que são determinados pela experiência e sobre os quais devemos nos resignar. Assim, Poincaré conclui sua monografia da seguinte forma:

Convém concluir. Não temos a intuição direta da simultaneidade, nem a da igualdade de duas durações. Se cremos ter essa intuição, é uma ilusão. Nós a compensamos com o auxílio de algumas regras que aplicamos quase sempre sem perceber. Mas qual é a natureza dessas regras? Não há regra geral, não há regra rigorosa; há uma multidão de pequenas regras aplicáveis a cada caso particular. Essas regras não se impõem a nós, e poderíamos divertir-nos inventando outras; contudo,

não poderíamos nos afastar delas sem complicar muito o enunciado das leis da física, da mecânica e da astronomia. Portanto escolhemos essas regras não porque elas sejam verdadeiras, mas porque são as mais cômodas, e poderíamos resumi-las dizendo: “A simultaneidade de dois eventos, ou a ordem de sua sucessão, e a igualdade de duas durações devem ser definidas de tal modo que o enunciado das leis naturais seja tão simples quanto possível. Em outros termos, todas essas regras, todas essas definições são apenas fruto de um oportunismo inconsciente.” (POINCARÉ, 1898, p. 12-13)

Portanto, percebemos que nem o uso do telégrafo sem fio, que Poincaré usou para medir a geodésica francesa, resolvem o problema da simultaneidade. Também podemos constatar como o coletivo de pensamento do Bureau des Longitudes contribuiu para as conexões ativas e passivas de Poincaré. Segundo Galison (2003), as atividades desenvolvidas por Poincaré exigiam a coordenação e sincronização de relógios (conexões passivas) e foi a partir da reflexão das técnicas de medida que Poincaré começou a pensar sobre o aspecto ontológico da simultaneidade e do tempo (conexão ativa). Ao realizar a circulação intercoletiva entre um problema de medida de tempo no Bureau des Longitudes com os círculos da Filosofia (ontologia e metafísica do tempo), Física (princípios mecânicos e eletromagnéticos), Matemática (estudo do espaço) e Astronomia (sistemas de grande distância onde a velocidade da luz não pode ser tratada como instantânea), Poincaré foi capaz de desenvolver uma complexa análise sobre a simultaneidade (conexões ativas) que é, como o próprio Jammer (2006) observou, um dos aspectos mais fundamentais na fundamentação da teoria da relatividade. Geralmente se atribuem esses resultados a Einstein, mas o trabalho de Poincaré apareceu 27 anos antes do trabalho de Einstein. Segundo Jammer (2006, p. 100) “Poincaré então ofereceu o que pode ser considerado como a primeira monografia moderna sobre o conceito de simultaneidade, que, portanto, merece ser discutida em detalhes.”

É importante também enfatizar que nesse ensaio, Poincaré começa uma protoideia que evoluiria para uma epistemologia composta de juízos analíticos, sintéticos e convenções: o convencionalismo de Poincaré. Essa filosofia de Poincaré também continha protoideias, que em certo sentido, pode ser considerada como uma antecipação qualitativa do Teorema da Incompletude de Gödel, como observa Brown (2014, s.p.):

Em uma impressionante ilustração de simultaneidade, Poincaré e Einstein escreveram artigos no verão de 1905 descrevendo suas respectivas visões do princípio da relatividade e suas consequências e implicações. Tudo isso foi amplamente discutido na literatura acadêmica sobre as origens da relatividade especial. Com menos frequência encontramos discussões sobre o papel de Poincaré como um precursor de Gödel na crítica da tentativa de Hilbert de dar uma prova

derradeira da consistência da aritmética. Costuma-se dizer que Gödel, em 1931, demonstrou a insustentabilidade do programa de Hilbert, no entanto, no livro *Science et Methode* descobrimos que Poincaré argumentou que o programa de Hilbert era inerentemente impossível. Claro, é bem sabido que Poincaré foi um dos primeiros defensores do que veio a ser chamado de intuicionismo, e que se opôs tanto ao logicismo de Russell quanto ao formalismo de Hilbert, mas até que ponto Poincaré antecipou os resultados de Gödel (se não os seus métodos) não parece ter recebido muita atenção. É certo que o teorema da incompletude de Gödel explicitamente implica mais do que apenas o corolário da impossibilidade de estabelecer a consistência de um sistema formal dentro do próprio sistema. Como o nome sugere, o teorema da incompletude mostra que qualquer sistema formal é inerentemente incompleto, no sentido de que existem proposições que são verdadeiras e não prováveis dentro do sistema. Poincaré não afirmou explicitamente (e muito menos provou) esse fato. Por outro lado, parece seguro dizer que Poincaré aceitou a consistência da lógica aritmética e de primeira ordem, e certamente teria concordado que poderia ser consistente, e ainda assim afirmou que a consistência não poderia ser provada dentro do próprio sistema. Este é um exemplo particular de incompletude, e não é difícil mapear o raciocínio que levou a essa conclusão a qualquer outro sistema formal (com complexidade suficiente para implicar aritmética). Assim, semelhante à como Poincaré pode ter antecipado muitos dos resultados da relatividade especial, apesar de ter usado métodos que parecem mais fracos do que aqueles associados à relatividade especial canônica, poderíamos dizer que ele também antecipou muitos dos resultados do trabalho de Gödel sobre fundamentos da matemática, embora por métodos que parecem menos sofisticados do que os de Gödel.

Um outro ponto que devemos salientar é que, embora não tenha declarado formalmente, Poincaré já havia percebido que o problema do cálculo da longitude estava conectado com as transformações de Lorentz. Quando Poincaré afirma que “a propagação da luz não é instantânea; se desejássemos exatidão absoluta, haveria uma correção a fazer, segundo uma regra complicada” ao que tudo indica tal “regra complicada” é justamente a transformação de Lorentz, em primeira ordem para v/c :

$$t' = t - \frac{vx}{c^2}$$

É bastante interessante que o problema das longitudes e da geodésica da Terra pareciam não serem tão íntimos com os estudos de Lorentz sobre os resultados da experiência de Michelson-Morley, mas estavam intimamente conectado pela transformação do tempo deduzida por Lorentz. A título de contextualização recordemos o que estava ocorrendo com Lorentz. Paralelo aos problemas geográficos que Poincaré encarava no Bureau das Longitudes, novas medidas estavam sendo feitas para tentar medir a velocidade da Terra em relação ao éter. A experiência mais famosa, devido a sua precisão, foi feita pelo físico Albert Michelson e o químico Edward Morley em 1887

(MARTINS, 2015). O resultado da experiência ia contra as expectativas: o efeito observado era nulo. Como explicar esse resultado? Uma forma seria buscar transformações de coordenadas que tornassem as equações do eletromagnetismo invariantes. Esse foi o caminho adotado por Larmor e Lorentz. (MARTINS, 2015). Em 1895, H. Lorentz publicou um importante trabalho onde ele apresentava um conjunto de transformações entre sistemas de coordenadas válidas para termos de primeira ordem em v/c . Esse livro foi estudado tanto por Poincaré como por Einstein (MEHRA, 2001). As transformadas aproximadas de Lorentz eram (MARTINS, 2015, p. 95):

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t - vx/c^2$$

As transformações espaciais tem um significado claro. A transformada do tempo não parecia ter um significado claro. Lorentz considerava apenas um truque matemático sem qualquer significado físico. Lorentz chamou esse novo tempo t' de tempo local. (MARTINS, 2015) Como já observamos, esse tempo local era a tal *regra complicada* que Poincaré menciona em seu artigo. Uma das qualidades de Poincaré era sua capacidade em lidar com diversos problemas. Por isso sua posição no bureau das Longitudes não isolou Poincaré, pelo contrário (GALISON, 2003 MARTINS, 2015). A medida que projetava novas formas (conexões ativas) para medir longitude e a geodésica francesa, Poincaré trazia novas descobertas (conexões passivas) e as refletia (GALISON, 2003). Diferente de Lorentz, que só se ocupava de problemas matemáticos e teóricos (MARTINS, 2015), Poincaré mesclava seu talento matemático com os problemas práticos das geociências e da mecânica celeste. (GALISON, 2003). Na epistemologia de Fleck, essa circulação de ideias entre diferentes coletivos de pensamento é a circulação intercoletiva, e quanto maior a circulação, maiores são as transformações nos estilos de pensamento.

Poincaré foi o primeiro pesquisador a perceber o verdadeiro significado do tempo local. Em 1900, foi celebrado a festa do 25^a aniversário de doutoramento de H. Lorentz, entre os convidados, estava Henri Poincaré que proferiu um seminário intitulação *La théorie de Lorentz et le principe de réaction*. Basicamente, a eletrodinâmica de Lorentz parece violar o princípio de ação e reação. Neste seminário Poincaré estuda quais os efeitos colaterais se assumirmos o princípio da reação como verdadeiro. Duas descobertas se destacam: a obtenção da relação massa-energia, $E = mc^2$, e o fato do tempo local

significar a tentativa de sincronizar relógios com pulsos de luz. (POINCARÉ, 1900b). Nesta sessão examinaremos apenas a questão envolvendo o tempo local.

O objetivo de Poincaré é adaptar o Princípio de Reação e, por conseguinte, a conservação do momento linear, dentro da teoria de Lorentz. Após mostrar que isso traria implicações sobre a nossa compreensão da energia, como o fato dela possuir uma inércia, Poincaré discute a relação desse princípio, a eletrodinâmica de Lorentz e o princípio da relatividade.

Se todos os objetos materiais são transportados por uma translação comum, como, por exemplo, o movimento da Terra, os fenômenos poderiam ser diferentes daqueles que observaríamos na ausência daquela translação, já que o éter não poderia ser transportado pela translação. Parece que o princípio da relatividade do movimento não deveria se aplicar apenas à matéria comum; então, experimentos foram realizados para detectar o movimento da Terra. É verdade que essas experiências produziram resultados negativos, mas achamos isso bastante surpreendente. Todas as coisas permanecem. Esses experimentos, como eu disse, produziram um resultado negativo, e a teoria de Lorentz explica esse resultado negativo. Parece que o princípio da relatividade do movimento, que não é claramente verdadeiro *a priori*, é verificado *a posteriori* e que o princípio da reação deve seguir. No entanto, o princípio da reação não se sustenta; como pode ser? É o caso em que, na realidade, aquilo que chamamos de princípio da relatividade do movimento foi verificado apenas imperfeitamente, como mostra a teoria de Lorentz. (POINCARÉ, 1900b, p. 272)

Poincaré sugere que isto ocorre devido à múltiplos efeitos de compensação. Dos quatro efeitos que Poincaré elenca, chamamos a atenção em particular a um deles: o problema de sincronização de relógios.

Para que a compensação funcione, devemos relacionar os fenômenos não ao tempo real t , mas a um certo tempo local t' definido da seguinte maneira. Suponhamos que alguns observadores sejam colocados em vários pontos e sincronizem seus relógios usando sinais luminosos. Eles tentam ajustar o tempo de transmissão medido dos sinais, mas eles não estão cientes de seu movimento comum e, consequentemente, acreditam que os sinais viajam igualmente rápido em ambas as direções. Eles realizam observações de sinais de cruzamento, um viajando de A para B, seguido por outro viajando de B para A. A hora local t é a hora indicada pelos relógios que são ajustados dessa forma. Se $V = 1/\sqrt{K_0}$ é a velocidade da luz, e v é a velocidade da Terra que supomos ser paralela ao eixo x , e na direção positiva, então temos: $t' = t - vx/V^2$ (POINCARÉ, 1900b, p. 272-273)

Em posse dos demais efeitos (conexão ativa), Poincaré mostra que as transformações de Lorentz levam a uma dilatação do tempo e uma contração do comprimento (conexão passiva), e deduz novas equações para o momento e a relação-

massa energia $E = mc^2$ (conexão passiva). Estudaremos essas questões mais adiante, foquemos nossa atenção na questão da simultaneidade e do tempo.

Em 1901, Poincaré publicou três artigos sobre o estudo das geodésicas: *Rapport sur le projet de revision de l'arc de méridien de Quito*, *Les mesures de la gravité et la géodésie*, *Sur les déviations de la verticale en géodésie*. E um importante livro sobre eletromagnetismo e óptica: *Électricité et optique: la lumière et les théories électrodynamiques*. Neste livro, Poincaré não apenas discutira a eletrodinâmica de Maxwell, mas também as teorias de Larmor e Lorentz, a importância do princípio da relatividade e o princípio da reação na teoria de Lorentz. Neste mesmo ano, Poincaré escreveu um capítulo intitulado *Sur les principes de la mécanique*, para o livro *Bibliothèque du Congrès international de philosophie, Volume 3*. Esse capítulo seria republicado em 1902, em *A Ciência e a Hipótese*.

Em 1902, Poincaré publicou três artigos relacionados a seu trabalho no Bureau des Longitudes: *Notice sur la télégraphie sans fil*, *La télégraphie sans fil*, *Rapport présenté au nom de la Commission chargée du contrôle scientifique des opérations géodésiques de l'Equateur*. E neste ano, Poincaré lançou o livro *La Science et l'hypothèse (A Ciência e a Hipótese)*. Essa obra era uma coletânea de seus artigos que tratam do papel da hipótese na produção científica. Essa obra é de importância capital para o estudo da história da teoria da relatividade, pois é a única obra de Poincaré que sabemos que Einstein leu em algum momento entre 1902 e 1903 (MARTINS, 2015). No capítulo sexto, que é a republicação de *Sur les principes de la mécanique*, encontramos as seguintes afirmações:

1. Não há espaço absoluto e só concebemos o movimento relativo; e, no entanto, na maioria dos casos, os fatos mecânicos são enunciados como se houvesse um espaço absoluto ao qual possam ser referidos.
2. Não há tempo absoluto. Quando dizemos que dois períodos são iguais, a afirmação não tem significado e só pode adquirir um significado por uma convenção.
3. Não apenas não temos intuição direta da igualdade de dois períodos, mas nem sequer intuimos diretamente a simultaneidade de dois eventos que ocorrem em dois lugares diferentes. Expliquei isso em um artigo intitulado “*Mesure du Temps*”.
4. Por fim, não é a nossa geometria euclidiana, em si mesma, apenas um tipo de convenção da linguagem? Fatos mecânicos podem ser enunciados com referência a um espaço não-euclidiano que seria menos conveniente, mas tão legítimo quanto nosso espaço ordinário; a enunciação se tornaria mais complicada, mas ainda assim seria possível. Assim, o espaço absoluto, o tempo absoluto e até a geometria não são condições impostas à mecânica. Todas essas coisas não mais existiam antes da mecânica do que se pode logicamente dizer que a língua francesa existia antes das verdades expressas em francês. (POINCARÉ, 1901a, p. 458)

Infelizmente está é a única passagem do livro que fala sobre o tempo e simultaneidade. Poincaré indica como um delineamento dos itens 2 e 3 seu artigo de 1898. Porém, não podemos deixar de notas que suas colocações são claras, e não podem ter passado despercebidas por Einstein. Em 1903, Poincaré não abordou assuntos associados às geodésicas ou problemas de medidas do tempo, esses temas só voltariam em 1904 com a publicação de dois livros sobre telégrafos em fio: *Maxwell's Theory and Wireless Telegraphy* e *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes: La télégraphie sans fil*. Contudo, o trabalho mais importante de Poincaré envolvendo simultaneidade foi sua palestra na Convenção de Artes e Ciências de Saint Louis, no Mississippi, intitulada: *L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique*. Antes de abordarmos esse trabalho, precisamos entender o que estava ocorrendo na física teórica.

Em 1892, Lorentz publicou um artigo discutindo o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley e propôs sua famosa tese que os braços do interferômetro sofriam uma contração na direção longitudinal. Lorentz tentou justificar sua proposta como resultado da interação molecular da matéria em movimento com éter (LORENTZ, 1895). Poincaré criticou essa proposta dizendo que se tratava de uma hipótese *ad hoc* e defendeu a necessidade de se criar uma teoria e não emendar hipóteses novas para cada problema (POINCARÉ, 1902a, LORENTZ, 1904). Em 1900, Larmor conseguiu obter as transformações exatas do espaço e do tempo, mas falhou em conseguir as transformações dos campos elétricos e magnéticos. Para sermos mais exatos, Larmor acreditava que suas transformações eram válidas até a segunda ordem em v/c . Somente com os trabalhos posteriores de Lorentz (1904) e Poincaré (1905g) ficaria provado que elas eram exatas.

Lorentz aceitou a crítica de Poincaré e passou a produzir uma nova eletrodinâmica dos corpos em movimento. Seus resultados foram divulgados em um *memoir* de 1904 intitulado: *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*. Pode-se considerar essa a maior contribuição de Lorentz a relatividade. Nesse trabalho Lorentz obteve as transformações exatas do espaço, tempo e do eletromagnetismo, derivou a forma invariante das equações de Maxwell, as leis de transformação das massas transversal e longitudinal do elétron e explicou, sem hipóteses *ad hoc*, o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley. A exposição de 1904 de Poincaré em Saint Louis, tinha como objetivo retratar a crise da física-matemática (física teórica) e mostrar qual era o prognóstico a partir das últimas descobertas, incluindo o *memoir de Lorentz*.

Assim como no seu trabalho de 1900, Poincaré discute o problema da medida do tempo como uma consequência do *princípio da relatividade*, testado até a última precisão por Michelson e Morley. Em sua palestra de 1904, a questão é abordada da seguinte forma:

A ideia mais engenhosa foi a do tempo local. Imaginemos dois observadores que desejem acertar seus relógios por sinais ópticos; eles trocam sinais, mas como sabem que a transmissão da luz não é instantânea, tomam o cuidado de cruzá-los. Quando a estação B percebe o sinal da estação A, seu relógio não deve marcar a mesma hora que a da estação A no momento da emissão do sinal, mas essa hora aumentada de uma constante que representa a duração da transmissão. Suponhamos, por exemplo, que a estação A envie seu sinal quando seu relógio marca a hora zero, e que a estação B o perceba quando seu relógio marca a hora t . Os relógios estão acertados se o atraso igual a t representar a duração da transmissão, e, para verificá-lo, a estação B expede por sua vez um sinal quando seu relógio marca zero; a estação A deve então percebê-lo quando seu relógio marcar t . Então os relógios estão acertados. E, de fato, eles marcam a mesma hora no mesmo instante físico, mas com a condição de estarem fixas as duas estações. Caso contrário, a duração da transmissão não será a mesma nos dois sentidos, já que a estação A, por exemplo, vai ao encontro da perturbação óptica emanada de B, enquanto a estação B foge diante da perturbação emanada de A. Portanto, os relógios acertados desse modo não marcarão o tempo verdadeiro; marcarão o que podemos chamar de tempo local, de modo que um deles se atrasará em relação ao outro. Pouco importa, já que não temos nenhum meio de perceber isso. Todos os fenômenos que se produzirem em A, por exemplo, estarão atrasados, mas todos terão o mesmo atraso, e o observador não perceberá, já que seu relógio atrasa; assim, como manda o princípio de relatividade, ele não terá nenhum meio de saber se está em repouso ou em movimento absoluto. (POINCARÉ, 1904a, p. 808)

Como observa Poincaré, todas as nossas interações são mediadas pela velocidade da luz e essa velocidade é finita. Desta forma, a melhor forma para se medir uma longitude ou uma geodésica é pelo emprego de sinais eletromagnéticos trocados usando um telégrafo sem fio. Porém, esse fato traz uma limitação intrínseca: como a velocidade da luz é finita eventos que passam em diferentes distâncias em relação a dois observadores serão percebidos em momentos diferentes. Além disso, se estes dois observadores estiverem em movimento em relação a um terceiro observador, um evento simultâneo para os dois observadores, pode ocorrer antes para um observador, na perspectiva do terceiro observador.

Registre que mais uma vez podemos ver a influência que o Bureau das Longitudes teve sobre Poincaré e as circulações intercoletivas com a astronomia. Como nós vimos, uma das atribuições do Poincaré era o emprego de telégrafos sem fio em diferentes estações ao redor da França. Entre 1902 e 1904, Poincaré realizou uma série de

publicações sobre este tema, incluindo dois livros. O primeiro artigo de Poincaré sobre o telégrafo sem fio, *Notice sur la télégraphie sans fil*, foi publicado no anuário do Bureau das Longitudes. Não é surpreendente que o exemplo utilizado nessa palestra para explicar o método de sincronização, era o mesmo que ele empregava no Bureau das Longitudes. Podemos concluir que a *dilatação do tempo* e a *relatividade da simultaneidade* que Poincaré apresenta em sua comunicação derivam principalmente de sua experiência com telégrafos sem fio e as medidas geográficas (GALISON, 2003).

Antes de seguirmos adiante, precisamos assinalar que Poincaré reconhece que somente esse efeito de *dilatação do tempo* e *relatividade da simultaneidade* não são suficientes para garantirem a validade do *princípio da relatividade*. Poincaré (1904a) discute em seguida que é preciso também assumir que os corpos em movimento sofram uma contração na mesma direção do movimento, inclusive calculando a contração da Terra em movimento. Como podemos ver, essa comunicação de Poincaré continha três elementos básicos da relatividade, atribuídos como descoberta de Einstein: relatividade da simultaneidade, a transformação do tempo e do espaço. No começo de 1905, seria publicado a segunda coleção de artigos de Poincaré: *La Valeur de la Science*, que trazia a transcrição completa palestra de 1904, *L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique*, e o artigo *La Mesure du Temps*. Neste mesmo ano, Poincaré publicou seu trabalho mais importante: *Sur la dynamique de l'électron*, que analisaremos em uma seção própria

3.3.1. Síntese Fleckiana sobre a Coordenação do Tempo

Quando Poincaré se envolveu com o coletivo de pensamento dos geógrafos no Bureau das Longitudes, entre a suas atribuições, estava o problema do cálculo das longitudes, que na prática era um problema sobre coordenação do tempo. No final do século XIX, a visão ortodoxa sobre o tempo pode ser sumarizada por meio das seguintes conexões passivas:

- O tempo não tem dimensionalidade.
- O tempo real é absoluto.
- É possível definir a simultaneidade absoluta.
- É possível sincronizar relógios de forma precisa

Em busca de métodos mais eficazes para a coordenação do tempo, Poincaré levantou três questões básicas a respeito do tempo (conexões ativas) (POINCARÉ, 1898):

- Qual a relação da medida do tempo quantitativo e qualitativo?
- Como podemos definir que dois eventos são simultâneos?
- Como podemos sincronizar relógios em repouso e em movimento?

Como foi discutido, para conseguir obter as respostas, Poincaré empreendeu uma circulação intercoletiva com coletivos de pensamento dos astrônomos, matemáticos, físicos, filósofos e até mesmo psicólogos. Esse exercício, que reflete a vastidão do espírito de Poincaré, levou a Poincaré chegar a novas conclusões que norteariam o programa da relatividade e sua epistemologia convencionalista (novas conexões ativas):

- O tempo apresenta dimensionalidade.
- O tempo é relacional.
- É impossível dizer se dois eventos são simultâneos.
- Relógios em movimento relativo perdem a sincronia.
- O tempo é uma construção social.
- Não é possível estabelecer uma relação entre o tempo qualitativo e o quantitativo.
- De dois relógios não podemos afirmar que um trabalha melhor que o outro, apenas que é mais conveniente se referir a um do que a outro.

No decorrer de nossa análise falamos superficialmente também sobre a importância do conceito de espaço, que posteriormente Poincaré descobrirá que forma com tempo uma estrutura unificada: o espaço-tempo. No próximo tópico, teremos a oportunidade de compreender o problema do espaço para Poincaré, que assim como tempo, também emergiu no Bureau des Longitudes.

3.4 – A Medida da Geodésica e a Questão do Espaço

Em uma leitura fleckiana, um dos traços mais importantes em Poincaré era o fato dele pertencer a vários coletivos de pensamentos. Essa foi a característica que fez com que Russell (1983) o batizasse com o título de o “último universalista”. Como um engenheiro de minas formado pela Politécnica e ordenado ao Bureau des Longitudes, Poincaré pertencia ao círculo esotérico dos engenheiros e as questões práticas a respeito das medidas de espaço, principalmente ao problema da geodésica francesa.

Para entendermos como Poincaré construiu a sua filosofia do espaço relativo, precisamos entender como a circulação intercoletiva entre estes diferentes círculos

esotéricos, o fizeram descartar as concepções habituais de espaço (GALISON, 2003, JAMMER, 2010, GINOUX, GERINI, 2014). Primeiro devemos observar que as concepções de espaço variavam de área para área. Existia uma certa afinidade entre o espaço filosófico, físico, matemático, geométrico e astronômico. Enquanto estes abstraíam sobre a natureza do espaço, os engenheiros e os geógrafos do século XIX estavam preocupados sobre a sua medida (GALISON, 2003, GINOUX, GERINI, 2014). Para tornar mais clara a exposição que pretendemos fazer, iremos separar a nossa análise em diferentes tópicos e verificar as circulações intercoletivas.

A telegrafia era o meio de comunicação mais rápido (WHITROW, 1993, GALISON, 2003, GINOUX, GERINI, 2014). Cartas demoravam meses para ser entregue conforme a distância e dependiam de um sistema ainda descoordenado de trens. A recente descoberta de ondas eletromagnéticas por Hertz iniciava o processo de construção do telégrafo sem fio. (WHITROW, 1993, GALISON, 2003, GINOUX, GERINI, 2014). Cientistas de diferentes nações muitas vezes ficavam um grande tempo alheio a descoberta de seus colegas. O contexto geopolítico do século XIX era radicalmente diferente da experiência cotidiana do século XXI. Se hoje existe um processo de globalização e as publicações científicas são disponibilizadas virtualmente, integrando cientistas de diferentes nações, no século XIX, havia uma forte segregação. Os pesquisadores prussianos e ingleses disputavam o domínio da ciência. Os prussianos, principalmente incentivados por Ernest Mach, e posteriormente, pelo Círculo de Viena, contestavam o modelo mecânico e metafísico de Newton. Mach escreveu (1883, s.p.):

Ninguém pode dizer nada sobre espaço absoluto e movimento absoluto, isso é apenas algo que pode ser imaginado e não é observável em experimentos. Em vez de referir um corpo em movimento ao espaço (a algum sistema de referência), consideraremos diretamente sua relação com os objetos do mundo, somente dessa maneira é possível definir um sistema de referência. Mesmo no caso mais simples, quando aparentemente consideramos a interação entre apenas duas massas, é aconselhável nos distrair do resto do mundo. Se um corpo gira em relação ao céu de estrelas imóveis, surgem forças centrífugas, enquanto que se gira em torno de um corpo, em vez do céu de estrelas imóveis, nenhuma força centrífuga surgirá. Não tenho nada contra chamar de primeira a primeira revolução, se pelo menos não esquecermos que isso significa nada além de revolução voltada para o céu de estrelas imóveis. Não há necessidade de relacionar a lei da inércia a algum espaço absoluto especial

Os ingleses, por outro lado, acreditavam que a dependência do período dos relógios com a latitude e os desvios do pêndulo de Foucault, bem como a experiência mental do balde de Newton, eram argumentos suficientes em favor da existência do espaço absoluto.

Historicamente, a disputa política sobre a natureza do espaço entre ingleses e alemães, remete ao próprio Newton. Enquanto Newton, e seu discípulo Samuel Clarke defendiam a necessidade de um espaço absoluto, Wilhelm Leibniz defendia a existência de um espaço relacional (JAMMER, 2013).

A prioridade científica e o respeito ao cientista no século XIX desempenhavam um papel muito grande no cenário geopolítico. Benjamin Franklin, presidente dos Estados Unidos e pesquisador, conseguiu apoio da França contra a Inglaterra, devido a sua autoridade como pesquisador em fenômenos elétricos. A França se envolveu em um escândalo de falsificação de Vrain—Lucas, que escreveu cartas que “provavam” que Blaise Pascal teria antecipado os trabalhos de Newton (KRAGH, 2001). Outro campo em que ingleses e prussianos disputavam a prioridade era na eletrodinâmica. Os ingleses sustentavam os trabalhos de Michael Faraday e James Maxwell que previam que ação das cargas era mediada por campos invisíveis associados ao éter (DARRIGOL, 1995, 1996). Os alemães preferiam as ações instantâneas e relacionais dos trabalhos de Weber e Neumann. Essa tensão entre prussianos e ingleses só tenderia aumentar, principalmente com o início da primeira guerra mundial, onde um país boicotava até a cultura científica do outro (DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005).

Embora houvesse um conflito evidente do domínio da cultura científica, havia países que se mantinham neutros, como a Holanda. Na epistemologia de Fleck, podemos considerar que cada país, tinha pelo menos um coletivo de pensamento preponderante em torno da ciência e que seu principal objetivo era expandir o círculo esotérico para o resto da Europa até finalmente eliminar os estilos de pensamento conflitantes. A neutralidade da Holanda mostrou-se fundamental para que existisse uma circulação intercoletiva entre o CP prussiano e o CP inglês. Como os pesquisadores desse país pertenciam aos dois círculos, eles permitiam a penetração de ideias diferentes.

A França também pertencia a elite intelectual, como exemplos, temos Charles Fourier, Gaston Gassendi, Simon Laplace, Diderot, Lagrange, Blaise Pascal, Evaristo Galois e Jean D’Alambert estavam entre os mais renomados pesquisadores. No século XIX, a França entreteve uma guerra geopolítica com a Inglaterra, que posteriormente ficou conhecida como a guerra pela longitude zero. Com o aprimoramento do relógio mecânico, tornou-se possível medir a longitude com maior precisão. A França e a Inglaterra eram de longe as duas nações com a maior perícia em navegação. Os ingleses se declaravam superiores aos franceses por terem vencido a batalha de Waterloo em Trafalgar contra a frota de Napoleão. A França pretendia superar a Inglaterra pelo

domínio das rotas de navegação. Para atingir esse objetivo, os franceses deveriam estabelecer o método mais eficiente do cálculo da longitude, se possível usando a tecnologia mais avançada: o telégrafo sem fio. Havia um segundo objetivo, muito mais simbólico, mas que levantaria a moral francesa: ter o observatório de Paris como a referência de meridiano da longitude zero (GINOUX, GERINI, 2014).

A guerra dos meridianos se provou um novo Waterloo para a França: no dia 22 de outubro de 1884 o meridiano inglês do observatório de Greenwich foi escolhido como a longitude zero. Para se ter uma ideia de como a França reagiu a essa decisão, o governo francês só adotou o horário mundial (antigo GMT) e reconheceu o meridiano de Greenwich a partir de 1911 (GINOUX, GERINI, 2014). Nessa época, Poincaré já ocupava uma posição no Bureau das Longitudes. Sobre este caso Poincaré teria dado pouca atenção e até debochado:

Recebemos aqui no "Bureau des Longitudes" uma comunicação do diretor do observatório do México, que tenho o prazer de repetir. "Existe na França, disse o astrônomo, uma cidade pela qual passa com precisão o meridiano de Greenwich: é Argetan. A França deve adotar o tempo de Argentan, para que a auto-estima francesa permaneça intacta!" Essa é uma solução, disse Poincaré, rindo. (GINOUX, GERINI, 2014, p. 69)

A relação de Poincaré com a política deve ser ponderada de forma cautelosa: Henri Poincaré era um homem letrado também em ciências políticas. Seu primo e amigo Raymond Poincaré ocupou o cargo de primeiro ministro e presidente da França. Os dois apreciavam conversar sobre filosofia e belas artes. Quando Poincaré foi indicado, em partes pela confiança de seu primo em sua competência, para o Bureau das Longitudes, uma parte do trabalho era extremamente burocrática. Poincaré não estava apenas preso ao preenchimento de papeladas, mas também deveria fornecer relatórios (*rapports*) e conferências para especialistas e políticos (GALISON, 2003, GINOUX, GERINI, 2014). Uma destas conferências foi publicada no livro O Valor da Ciência (POINCARÉ, 1905a) sobre o nome de A Astronomia.

Os governos e os parlamentos devem achar que a astronomia é uma das ciências que custam mais caro: o menor instrumento custa centenas de milhares de francos, o menor observatório custa milhões; cada eclipse acarreta depois de si despesas suplementares. E tudo isso para astros que ficam tão distantes, que são completamente estranhos às nossas lutas eleitorais, e provavelmente jamais desempenharão qualquer papel nelas. É impossível que nossos homens políticos não tenham conservado um resto de idealismo, um vago instinto daquilo que é grande; realmente, creio que eles foram caluniados; convém encorajá-los, e lhes mostrar bem que esse instinto não os engana, e que não são logrados por esse idealismo. Bem poderíamos lhes falar da Marinha, cuja importância

ninguém pode ignorar, e que tem necessidade da astronomia. Mas isso seria abordar a questão por seu lado menos importante. A astronomia é útil porque nos eleva acima de nós mesmos; é útil porque é grande; é útil porque é bela; é isso que se precisa dizer. É ela que nos mostra quão pequeno é o homem no corpo e quão grande é no espírito, já que essa imensidão resplandecente, onde seu corpo não passa de um ponto obscuro, sua inteligência pode abarcar inteira, e dela fruir a silenciosa harmonia. Atingimos assim a consciência de nossa força, e isso é uma coisa pela qual jamais pagaríamos caro demais, porque essa consciência nos torna mais fortes. Mas o que eu gostaria de lhes mostrar, antes de tudo, é a que ponto a astronomia facilitou a obra das outras ciências, mais diretamente úteis, porque foi ela que nos proporcionou um espírito capaz de compreender a natureza.

Por outro lado, Poincaré considerava a ciência um empreendimento mais nobre que os interesses políticos (POINCARÉ, 1905a, 1908b). Em certo sentido, Poincaré era um idealista. Podemos assim compreender que o estilo de pensamento em relação a política era que ele entendia a necessidade de ter que dialogar com autoridades e que sua pesquisa deveria ser rentável para garantir o financiamento, mas que ele mesmo rejeitava os preconceitos a respeito da cultura científica, adotando uma posição semelhante à dos holandeses.

Esse é um fato importante sobre Poincaré, que revela suas conexões ativas. Enquanto a maioria dos pesquisadores assumiam institutos ou cátedras e lidavam apenas com problemas da própria disciplina e tinham uma certa liberdade, Poincaré era obrigado a dar satisfações e participar da retórica política. Participar desse círculo esotérico fez com que Poincaré buscasse resultados satisfatórios e aplicações para as suas ideias. Como muitas ideias não apresentavam retorno imediato, Poincaré precisava investir em argumentos metafísicos e históricos, seguindo na contra mão de Mach. Por outro lado, Poincaré não tinha barreiras culturais. Aceitava com bom grado a física dos alemães e dos ingleses. Por isso, junto à Lorentz, Poincaré era um dos poucos que dominavam a teoria de Maxwell antes que ela se tornasse difundida pela Europa. E dos alemães, Poincaré conheceu a geometria qualitativa (topologia), a geometria axiomática de Hilbert e a teoria de grupos infinitesimais de Lie (AUFFRAY, 1998).

Poincaré também era um estudioso da obra de Kant, com quem ele discutia com Raymond. Kant também se dedicou a ontologia do espaço em sua tese dos juízos analíticos e sintéticos. O problema do espaço para seus predecessores era um problema metafísico. Embora Poincaré partilhasse também desse desafio, enquanto membro do Bureau das Longitudes, o problema do espaço era prático: medir a forma da Terra, medir a geodésica francesa, medir a longitude. (GALISON, 2003, GINOUX, GERINI, 2014).

Para o geógrafo e para o engenheiro, o problema do espaço é um problema da medida, em outras palavras, é um problema de melhorar a precisão do aparelho ou dos métodos empregados. Naquela época acreditava-se que sempre seria possível construir ou pelo menos idealizar um aparelho cada vez mais sensível, isto é, não haveria um limite, essa era a conexão passiva sobre técnica no século XIX. Porém, Poincaré percebeu que a melhor forma de lidar com a geopolítica era respondendo uma pergunta mais urgente: qual limite de sensibilidade dos nossos aparelhos? Aqui percebemos algumas conexões ativas: antes do Bureau das Longitudes, Poincaré havia desenvolvido estudos e mapas para o transporte de carvão. Em suas tentativas de melhorar o suprimento, ele acabou descobrindo que por melhor que fosse a distribuição, existiria uma pequena perturbação que tornava o sistema imprevisível. Essa mesma perturbação aparecia em sistemas cíclicos como o sistema solar e não permitiam decidir sobre a sua estabilidade (GALISON, 2003). Esse pequeno número que parecia comprometer todas as medidas e que depois seria a base da teoria do caos, suscitava uma dúvida nova: poderia existir uma medida absoluta de espaço? Poderia um aparelho ser infinitamente sensível? Responder essas perguntas mostrariam para Poincaré o limite da tecnologia e permitiriam convencer o comitê de políticos sobre como investir em seu trabalho.

Para responder essa questão, Poincaré precisou realizar um longo processo de circulação intercoletiva entre diversos círculos esotéricos. Essa comunicação tornou latente as conexões ativas sobre a natureza do espaço, do tempo, da geometria e da simultaneidade e deram a Poincaré não apenas a capacidade de gerir as necessidades do Bureau das Longitudes, como a capacidade de extrapolar a eletrodinâmica de Lorentz e formular o princípio da relatividade como uma lei universal.

Portanto, das questões envolvendo o espaço e a sua medida, haviam três questões fundamentais a serem resolvidas: qual a geometria mais adequada para medida da longitude e da geodésica? Até que ponto é possível separar a influência do medidor sobre a medida? Qual a melhor forma de se medir a longitude e a geodésica?

Por mais de 20 séculos acreditou-se que existia apenas uma geometria compatível com a experiência e com a razão: a geometria euclidiana. Contudo, as dificuldades em sustentar o axioma das paralelas, levou ao matemático húngaro N. Bolyai e ao matemático russo Lobachvesky a criarem uma geometria tão consistente quanto a euclidiana, mas que rejeitava o axioma das paralelas. B. Riemann posteriormente tentou formular uma teoria qualitativa geral das geometria, a análise *situs* que posteriormente seria chamado de topologia. A teoria de Riemann, porém não permitia dizer quais seriam

as geometrias possíveis de se construir. Essa tarefa ambiciosa foi empreendida por D. Hilbert em seus Fundamentos da Geometria, onde o autor tentou agrupar todos os axiomas possíveis para se construir geometrias (POINCARÉ, 1902a).

Assim, no final do século XIX o número de geometrias possíveis tinha aumentado. Era natural que os matemáticos e os físicos se perguntassem: qual é a verdadeira geometria do espaço? A primeira vista, essa pergunta talvez parecesse uma abstração sofisticada demais para um engenheiro à frente do Bureau das Longitudes, mas Poincaré compreendia que o problema da geodésica e da longitude só poderia ter uma resposta plenamente satisfatória se fosse possível estabelecer a geometria mais adequada do espaço (POINCARÉ, 1902a).

Para responder essa questão, Poincaré começou a desenvolver a teoria dos homeomorfismos e difeomorfismos¹⁶ entre variedades gerais e a variedade euclidiana. A conclusão de Poincaré foi que não existe uma geometria mais adequada para o espaço, mas uma geometria mais cômoda, pois os elementos de uma geometria sempre podem ser traduzidos em elementos de outra geometria (POINCARÉ, 1902a). Poincaré acreditava que a nossa experiência com a geometria euclidiana sempre a tornaria a favorita, contudo, anos mais tarde, as geometrias pseudo-euclidianas e, posteriormente, as pseudo-riemannianas se mostrariam mais cômodas. Essa equivalência entre as geometrias foi um elemento essencial na construção de sua epistemologia: o convencionalismo. O fato que Poincaré havia espantado qualquer dúvida sobre qual a melhor geometria. Agora ele sabia que a escolha não afetaria na precisão das medidas e podia se preocupar com outras questões, como: até que ponto é possível separar a influência do medidor sobre a medida?

Essa era uma questão bastante complexa, que dividia os filósofos entre os empiristas e racionalistas. Para o empirista radical todo conhecimento era devido as sensações. Os sentidos constroem a realidade e fornecem conhecimento seguro do mundo. O empirista ingênuo não confia nos instrumentos, pois estes distorcem a realidade antes que ela seja apreendida pelo sentido. O instrumentalista defende que o instrumento é apenas uma amplificação de nossos sentidos, que torna possível ver uma realidade que de outra forma seria incognoscível (CHALMERS, 2017).

¹⁶ Um homeomorfismo é uma aplicação que a cada elemento de uma estrutura associa-se a um único elemento de outra estrutura. Se essa aplicação for bijetiva, temos um isomorfismo. Se esse isomorfismo for entre duas variedades diferenciáveis, ele é denominado de difeomorfismo. Se a aplicação for na próprio estrutura, o homeomorfismo é chamado de endomorfismo. Se o endomorfismo for isomórfico, ele é denominado de automorfismo. As transformações de Lorentz são um automorfismo de M^4 em M^4 .

Os racionalistas, por sua vez, acreditavam que os sentidos contaminam o conhecimento. O verdadeiro conhecimento deve ser obtido por um processo racional que exclua qualquer percepção pessoal sobre o objeto. A geometria analítica de Descartes correspondia ao ideal do racionalismo, pois as formas grosseiras da geometria, contaminadas pela percepção, eram traduzidas em termos algébricos, abstratos. Assim, enquanto um empirista representa as figuras geométricas por figuras, cujas medidas correspondem a proporções de suas réguas e compassos, o racionalista procura as equações algébricas consistentes com as características definidas a priori. Coube ao filósofo alemão I. Kant buscar uma síntese entre a razão pura e a razão prática. A crítica de Kant deu origem a teoria dos juízos analíticos e juízos sintéticos. O pensamento de Kant é altamente complexo e foge ao escopo de nossa análise, porém Brown apresenta uma ideia bastante clara da síntese do espaço derivada da crítica kantiana.

Normalmente tomamos por garantida a existência através do tempo de objetos que se movem de acordo com leis fixas no espaço tridimensional, mas esse é um modelo altamente abstrato do mundo objetivo, distante das impressões sensoriais cruas que compõem nossa experiência real. Esse modelo pode ser consistente com nossas impressões sensoriais, mas certamente não é determinado exclusivamente por elas. Por exemplo, Ptolomeu e Copérnico construíram dois modelos conceituais muito diferentes dos céus, baseados essencialmente no mesmo conjunto de impressões sensoriais brutas. Da mesma forma, Weber e Maxwell sintetizaram dois modelos conceituais muito diferentes de eletromagnetismo para explicar um único conjunto de fenômenos observados. O fato de que nossas impressões e experiências sensoriais cruas são (pelo menos nominalmente) compatíveis com conceitos amplamente diferentes do mundo levou alguns filósofos a sugerir que devemos dispensar completamente a ideia de um "mundo objetivo" e basear nossas teorias físicas em nada além de impressões sensoriais diretas, sendo tudo o mais apenas produto de nossa imaginação. Berkeley expressou a identificação positivista de impressões sensoriais com existência objetiva pela famosa frase "esse est percipi" (ser é ser percebido). No entanto, todas as tentativas de basear teorias físicas em nada além de impressões sensoriais cruas, evitando elementos conceituais arbitrários, invariavelmente fundadores desde o início, porque não temos meios seguros de distinguir impressões sensoriais de nossos pensamentos e ideias. De fato, mesmo a decisão de fazer essa distinção representa uma escolha conceitual significativa, que não é estritamente necessária com base na experiência. O processo pelo qual nós, como indivíduos, aprendemos a reconhecer impressões sensoriais induzidas por um mundo externo e a distingui-las de nossos próprios pensamentos e ideias internas, é altamente complicado e talvez, no final das contas, inexplicável. Como Einstein colocou (parafraseando Kant) "o eterno mistério do mundo é sua compreensibilidade". No entanto, para examinar os fundamentos epistemológicos de qualquer teoria física, devemos considerar um pouco como os elementos da teoria são realmente derivados de nossas impressões sensoriais cruas, sem interpretá-las automaticamente em termos convencionais. Por outro lado, se

suprimirmos todos as noções pré-concebidas, incluindo regras comuns de raciocínio, dificilmente podemos esperar progredir. Devemos escolher um nível de abstração suficientemente profundo para dar uma perspectiva significativa, mas não tão profundo que nunca possa ser conectado às ideias convencionais (BROWN, 2017, s.p.)

Sendo um estudioso da filosofia do espaço, Poincaré estava muito bem familiarizado com as críticas de seus antecessores. Para compreender o papel da experiência na geometria, Poincaré inicialmente analisou a relação entre a geometria e os sentidos, em uma área que ele denominou de geometria tátil ou visual. Poincaré compreendeu que a natureza do espaço estava intimamente relacionada ao estado de movimento dos corpos:

Mostrei em *A ciência e a hipótese* o papel preponderante desempenhado pelos movimentos do nosso corpo na gênese da noção de espaço. Para um ser completamente imóvel, não haveria nem espaço nem geometria; os objetos exteriores se deslocariam à sua volta em vão, e as variações que suas impressões sofreriam com esses deslocamentos não seriam atribuídas por esse ser a mudanças de posição, mas a simples mudanças de estado: esse ser não teria qualquer meio de distinguir esses dois tipos de mudanças, e essa distinção, para nós capital, não teria qualquer sentido para ele. (POINCARÉ, 1905a, p. 04-05)

Depois, Poincaré estuda a questão da dimensionalidade do espaço. Do ponto de vista da epistemologia fleckiana, o conceito de dimensão é uma conexão passiva. No século XIX, poucos matemáticos refletiam sobre o caráter dimensional da geometria, Poincaré foi um dos pioneiros a observar a necessidade de se definir rigorosamente o conceito de dimensão (COURANT, ROBBINS, 2001). As definições de dimensão eram aceitas a partir dos postulados de Euclides de ponto, reta, plano e espaço. A necessidade de aprimorar medidas geográficas despertaram como uma conexão ativa, fazendo com que Poincaré buscasse entender a ideia de dimensionalidade do espaço. Inicialmente, Poincaré (1905a) busca no empirismo argumentos para compreender a dimensionalidade do espaço:

Vai-se dizer então que é a experiência que nos informa que o espaço tem três dimensões, já que é partindo de uma lei experimental que chegamos a lhe atribuir três? Mas só fizemos aí, por assim dizer, uma experiência de fisiologia; e mesmo que bastasse adaptar aos olhos lentes de fabricação conveniente para fazer cessar a concordância entre as sensações de convergência e de acomodação, iremos nós dizer que basta colocar óculos muito grossos para que o espaço tenha quatro dimensões, e que o fabricante de lentes que as fez deu uma dimensão a mais ao espaço? É evidente que não: tudo o que podemos dizer é que a experiência nos informou que é cômodo atribuir ao espaço três dimensões. Mas o espaço visual não é mais que uma parte do espaço, e na própria noção desse espaço há alguma coisa de artificial, como

expliquei no início. O verdadeiro espaço é o espaço motor. (POINCARÉ, 1905a, p. 95)

Poincaré identifica o espaço motor como aquele formado pelo grupo matemático dos deslocamentos. Em síntese, Poincaré está desenvolvendo uma topologia cuja cinemática é a álgebra de Lie do grupo infinitesimal de deslocamento (POINCARÉ, 1905a, p. 99-100):

Entre as mudanças que se produzem em nossas impressões, distinguimos de início as mudanças internas, voluntárias e acompanhadas de sensações musculares, e as mudanças externas, cujos caracteres são opostos. Constatamos que pode acontecer que uma mudança externa seja corrigida por uma mudança interna que restabelece as sensações primitivas. As mudanças externas que são suscetíveis de ser corrigidas por uma mudança interna chamam-se mudanças de posição; aquelas que não o são chamam-se mudanças de estado. As mudanças internas suscetíveis de corrigir uma mudança externa chamam-se deslocamentos do corpo em bloco; as outras se chamam mudanças de atitude.

Por fim, Poincaré desconecta a experiência da geometria, assumindo um caráter puramente normativo:

Em resumo, a experiência não nos prova que o espaço tem três dimensões; prova-nos que é cômodo atribuir-lhe três, porque é assim que o número de ajudas é reduzido ao mínimo. Será preciso acrescentar que a experiência sempre nos levaria apenas ao espaço representativo, que é um contínuo físico, e não ao espaço geométrico, que é um contínuo matemático? Quando muito, poderia nos informar que é cômodo dar ao espaço geométrico três dimensões, para que ele tenha tantas quantas tem o espaço representativo (POINCARÉ, 1905a, p. 125).

E acrescenta:

A experiência, portanto, desempenhou apenas um único papel: forneceu a oportunidade. Mas nem por isso esse papel deixava de ser muito importante, e julguei necessário ressaltá-lo. Esse papel teria sido inútil se existisse uma forma a priori que se impusesse a nossa sensibilidade, e que seria o espaço de três dimensões (POINCARÉ, 1905a, p. 127).

Para compreendermos a construção do espaço, e a interpretação de Poincaré, recorremos a explanação simplificada proposta por Brown (2017, s.p.):

Como exemplo de um modelo de experiência moderadamente abstrato, podemos representar um observador idealizado como uma sequência de estados ordenada linearmente, cada uma das quais é uma função dos estados anteriores e de um conjunto de impressões sensoriais brutas de fontes externas. Isso já implica duas escolhas profundas. Primeiro, é um modelo puramente passivo, no sentido de que não invoca volição ou livre arbítrio. Como resultado, todas as declarações condicionais neste modelo devem ser interpretadas apenas como correlações porque sem liberdade não faz sentido falar sobre as diferentes consequências de ações hipotéticas alternativas. Segundo, estipulando que os estados são funções do precedente mas não nos estados subsequentes, introduzimos uma assimetria direcional inerente à experiência, mesmo que a justificativa

para isso esteja longe de ser clara. Ainda outra escolha deve ser feita sobre se a sequência de estados e experiências é contínua ou discreta. Em qualquer um dos casos, podemos parametrizar a sequência por uma variável l e, para fins de definição, podemos representar cada estado S (λ) e as impressões sensoriais correspondentes E (λ) por cadeias de bits binários. Agora, devido à misteriosa compreensibilidade do mundo, pode acontecer que algumas funções de S estejam correlacionadas com algumas funções de E . (Como esse é um modelo passivo por suposição, não podemos afirmar nada além de correlações estatísticas, porque não fazemos isso tenha a liberdade de variar arbitrariamente S e determinar o E resultante, mas, em princípio, ainda poderíamos encontrar passivamente variedade suficiente de estados e experiências para inferir as correlações mais importantes.) Essas correlações mais primitivas são presumivelmente "conectadas" a um nível superior categorias de sentidos e conceitos (variáveis de estado), em vez de serem classificadas de maneira cognitiva. Em termos dessas variáveis de nível superior, podemos descobrir que, em algum intervalo de l , as impressões sensoriais E (λ) estão estritamente correlacionados com três funções θ, ϕ, α do estado S (λ), que mudam apenas incrementalmente de um estado para o outro. Além disso, podemos descobrir que E é apenas incrementalmente diferente para diferenças incrementais em θ, ϕ, α (independente dos valores anteriores dessas funções), e que esse é o menor e mais simples conjunto de funções com essa propriedade. Finalmente, suponha que as impressões sensoriais correspondentes a um determinado conjunto de valores das funções de estado sejam idênticas se os valores dessas funções forem aumentados ou diminuídos em alguma constante. Isso descreve aproximadamente como um observador abstrato pode inferir um espaço de orientação junto com os modos de interação associados. Em termos convencionais, o observador infere a existência de objetos externos que induzem um conjunto particular de impressões sensoriais, dependendo da orientação do observador. (Obviamente, essa interpretação é necessariamente conjectural; pode haver outras interpretações, talvez mais complexas, que correspondam tão bem ou melhor com a sequência real de experiências do observador.) Em algum momento, o observador pode começar a perceber desvios dos três simples modelo de orientação variável e acha necessário adotar um modelo conceitual mais complicado para acomodar a sequência de impressões sensoriais. Continua sendo verdade que o modelo de orientação simples se aplica a intervalos de estados suficientemente pequenos, mas as impressões sensoriais correspondentes a cada orientação podem variar em função de três variáveis de estado adicionais, que em termos convencionais representam a posição espacial do observador. Como as variáveis de orientação, essas variáveis de conversão, que podemos chamar de x, y e z , mudam apenas de forma incremental de um estado para o próximo, mas, diferentemente das variáveis de orientação, não há periodicidade aparente. Observe que o sucesso desse processo de indução depende de uma estratificação de experiências, permitindo discernir primeiro os efeitos de orientação, mais ou menos independentes dos efeitos de tradução. Então, uma vez que o modelo de orientação tenha sido estabelecido, os desvios relativamente pequenos (em pequenas faixas da variável de estado) podem ser interpretados como efeitos do movimento de translação. Se não fosse por essa estratificação (em magnitude ou em algum outro atributo), talvez nunca seja possível inferir as fontes distintas de variação em nossas impressões sensoriais.

As conclusões sobre o espaço que Poincaré chega trazem implicações interessantes: a primeira que não é possível separar por completo a observação da teoria, como desejavam os empiristas. Toda teoria está sujeita a um conjunto de convenções que devem ser impostas e não podem ser testadas sobre nenhuma forma. Buscamos as convenções com menor grau de arbitrariedade possível. O segundo ponto é que não existe espaço sem movimento, a natureza do espaço é motor. Esse fato pressupõe uma conexão entre o espaço e o tempo.¹⁷ Embora Poincaré não tenha apresentado quantitativamente, existe um limite experimental, uma equivalente ao princípio da incerteza na teoria da relatividade, a qual toda medida envolvendo sinais luminosos está sujeita:

$$\langle dx \rangle \langle dt \rangle = \frac{1}{c}$$

Ou seja, não importa quanto se aprimore as técnicas de medida e os aparelhos, ao menos que consigamos produzir sinais supraluminais, é impossível obter uma medida mais precisa do que $1/c$. Do ponto de vista prático, a imprecisão o método de telegrafia sem fio que Poincaré empregava era infinitamente menor que o erro que o próprio navegador estaria sujeito a cometer e, portanto, o problema da geodésica e da longitude havia atingido a máxima precisão que era possível, na ocasião.

Assim percebemos como um problema da longitude e da geodésica francesa levou Poincaré a percorrer por diferentes coletivos de pensamento e promovendo uma ampla *circulação intercoletiva*. O que tornava essa circulação vasta é o fato que Poincaré conseguia migrar para círculos exotéricos ao da geografia, pois sendo um *universalista*, ele pertencia e lidava com naturalidade diferentes coletivos de pensamento. Desta forma, o que era um problema geopolítico, nas mãos de Poincaré era analisado do ponto de vista da matemática, da geometria, da física, da astronomia, da filosofia, da engenharia.

3.4.1. Síntese Fleckiana sobre a Medida do Espaço

Assim como ocorreu com a coordenação do tempo, quando Poincaré se envolveu com o coletivo de pensamento dos geógrafos no Bureau das Longitudes, outra de suas atribuições era medir a forma da Terra e o cálculo da geodésica, que na prática era um

¹⁷ Se desenvolvermos uma topologia de baixa dimensão considerando que a curvatura e a torção da variedade se anulam em todos os pontos, obteremos três espaços possíveis: o espaço de Galileu com três dimensões espaciais e o tempo como uma medida sem dimensionalidade. O espaço-tempo euclidiano de 4 dimensões, onde a quarta dimensão é *ct*. O espaço-tempo pseudo-euclidiano (conhecido como espaço-tempo de Poincaré-Minkowski) com quatro dimensões, sendo a quarta dimensão *ict*.

problema sobre a medida no espaço. No final do século XIX, a visão ortodoxa sobre o espaço pode ser resumida por meio das seguintes conexões passivas:

- O espaço tem três dimensões.
- O espaço motor é absoluto
- A geometria euclidiana é a verdadeira geometria

Um dos fenômenos mais importantes no campo da geometria foi a descoberta das geometrias não euclidianas e as hipóteses de Riemann sobre novas geometrias. Esse período onde os físicos começaram a buscar aplicações dessas geometrias ou questionar qual delas seria a geometria do Universo. É possível rastrear nos trabalhos de Riemann e Clifford propostas de uma teoria física baseada na estrutura geométrica e suas modificações, como ocorre na Teoria da Relatividade Geral. De maneira geral, Poincaré que participava ativamente do coletivo de pensamento dos matemáticos e geômetras¹⁸, formulou algumas questões (conexões ativas).

- - Como seria um espaço 4-dimensional?
- Qual relação entre o espaço sensível e o espaço?
- Existe uma geometria mais verdadeira que as outras?

Em outro exercício que Poincaré promove uma circulação de ideias intercoletiva nos coletivos de pensamento da geografia, da física, da matemática, da astronomia, de suas experiências com coordenação de linhas férreas enquanto engenheiro e da filosofia, Poincaré apresentou novos resultados (novas conexões passivas) que tornaram a base de toda a física moderna (tanto a relatividade especial e geral quanto a mecânica quântica)

- O espaço tem três dimensões devido ao grupo de deslocamentos.
- O espaço motor é relacional. Só o movimento relativo é ponderável.
- Todas as geometrias são igualmente verdadeiras
- A geometria euclidiana é a mais cômoda
- O espaço sensível pode ter mais de 3 dimensões.
- A medida do espaço depende da medida do tempo.
- Há uma incerteza entre a medida do espaço e do tempo.

A reformulação dos conceitos de espaço e tempo são suficientes para desenvolver uma cinemática relativística, porém, assim como aconteceu com o movimento da Terra,

¹⁸ Neste período histórico não havia um consenso se a geometria pertenceria ao círculo dos matemáticos ou seria uma ciência própria cujo objeto seria o espaço e as suas formas. Por essa razão optamos em tratá-la como uma categoria distinta da matemática.

foi na dinâmica, mais precisamente na eletrodinâmica, que as mudanças mais significativas da relatividade ocorreriam. Larmor e Lorentz lideravam a busca de uma reformulação da eletrodinâmica para explicar os resultados da experiência de Michelson-Morley. Nem Lorentz e nem Larmor podiam imaginar na época que a solução da crise estava nas modificações do espaço e do tempo discutidas por Poincaré. Como os dois pesquisadores não pertenciam aos coletivos de pensamento de Poincaré, eles não empreenderam uma circulação intercoletiva de ideias. Porém, Poincaré, seria designado a coordenar a expedição ministerial sobre o telégrafo sem fio. Essa tarefa exigiria que Poincaré compreendesse a eletrodinâmica de Maxwell e seus desdobramentos por Hertz, Helmholtz e Lorentz. Essa circulação intercoletiva irá aproximar Poincaré dos problemas teóricos da eletrodinâmica e permitir que Poincaré superasse a crise ao trazer suas novas ideias sobre o espaço e o tempo. No próximo capítulo veremos como Poincaré empreendeu esse êxodo.

4. POINCARÉ E A GÊNESE DO DESENVOLVIMENTO DA TEORIA DA RELATIVIDADE (1895-1904)

No capítulo anterior, caracterizamos a importância da sociologia na produção científica, os coletivos de pensamento que pertenciam Poincaré, e como as circulações intercoletivas levaram Poincaré a conexões ativas sobre o espaço e o tempo que levaram a novas conexões passivas: não há espaço absoluto, não há tempo absoluto, a simultaneidade é relativa e a geometria é puramente convencional (POINCARÉ, 1902a). Estas conexões passivas irão despertar novas conexões ativas em Poincaré que o levarão a formulação do Princípio da Relatividade e a Relação Massa-Energia (conexões passivas). Nessa seção, faremos uma leitura fleckiana sobre o desenvolvimento destes dois conceitos.

4.1. O Princípio Da Relatividade

Segundo Poincaré, a física do século XIX enfrentava uma grande crise. Para Poincaré, a física passou por um primeiro momento que ele denominou de Física das Forças Centrais. Contudo com a descoberta de novos fenômenos na termodinâmica e no eletromagnetismo, esse estilo de pensamento tornou-se insuficiente e entrou em crise, sendo superado pelo segundo momento: a física dos princípios. Porém, novas descobertas no campo da radioatividade, termodinâmica do corpo negro, no eletromagnetismo e as tentativas de medir a velocidade da Terra em relação ao éter levaram a questionar a validade dos princípios. Na epistemologia de Fleck, o período de expansão do estilo de pensamento e aceitação corresponde ao *classicismo*, enquanto o período de crise é o equivalente a *complicação*. Em 1887, Michelson e Morley realizaram uma experiência muito precisa para medir a velocidade da Terra em relação ao éter. Contudo, nenhum efeito foi detectado. Esse resultado inesperado criava uma complicação ao Estilo de Pensamento vigente. G. Fitzgerald e H. Lorentz tentaram contornar a situação com a hipótese *ad hoc* da contração dos comprimentos. Essa tentativa de explicar uma complicação e evitar o surgimento de uma crise corresponde ao que Fleck chama de *harmonia das ilusões*. Poincaré criticou essa abordagem no congresso de física moderna, exigindo o desenvolvimento de uma nova teoria e não de hipóteses novas para cada nova complicação. Em 1893, Joseph Larmor (1857-1942) propôs uma nova teoria que buscava explicar os resultados nulos da experiência de Michelson e Morley.

Considerando que a luz era um fenômeno eletromagnético, a aparente impossibilidade de medir a velocidade da Terra em relação ao éter, por efeitos ópticos, podia significar que todos os fenômenos eletromagnéticos ocorriam exatamente da mesma forma, tanto em um referencial parado em relação ao éter como em um referencial em movimento (MARTINS, 2015, p. 94).

Dois anos depois desta publicação de Larmor, e noventa anos depois do surgimento da palavra *relatividade*, Poincaré escreve seu primeiro artigo onde ele aborda explicitamente o tema.

Em 1895, Poincaré publicou sob o título geral "*À propos de la théorie de M. Larmor*", uma série de quatro artigos (publicados entre abril e novembro de 1895 no *L'Éclairage électrique*), em todas as 57 páginas. Estes são reflexões (e cálculos) sobre as teorias da electro-óptica, isto é, sobre a adaptação das teorias "mecânicas" da ótica de Fresnel, Neumann e MacCullagh, para uma visão "Maxwelliana" de Larmor, Helmholtz, Lorentz, J.-J. Thomson e Hertz. Poincaré propõe três critérios para que essas tentativas de adaptação constituam uma teoria aceitável. No mínimo, eles devem: 1) levar em consideração o coeficiente de arrastamento de Fizeau; 2) garantir a conservação de eletricidade e magnetismo; 3) garantir a validade do princípio: ação = reação. Ele observa que nenhuma das teorias propostas atende aos três critérios simultaneamente: por exemplo, a teoria de Hertz satisfaz os critérios 2) e 3) mas não a primeira; A teoria de Lorentz atende aos critérios 1) e 2) mas não ao terceiro; ... etc. (REIGNIER, 2004, p. 37)

Após analisar cada teoria e expor suas críticas, Poincaré apresenta suas conclusões provisórias. Ao final delas encontramos, o que poderíamos chamar do primeiro enunciado da *relatividade*:

A experiência revelou uma série de fatos que podem ser resumidos na seguinte fórmula: é impossível tornar manifesto o movimento absoluto da matéria, ou melhor, o movimento relativo da matéria em relação ao éter; tudo o que pode ser medido é o movimento da matéria ponderável em relação à matéria ponderável (POINCARÉ, 1895, p. 426)

Veja que, diferente de Newton, Marcart e Larmor, Poincaré propõe a relatividade como um princípio universal, válido para toda a física e que deveria ser uma lei fundamental a ser inclusa em todas teorias. Segundo Keswani e Kilmister (1983), Poincaré cunhou seu princípio da relatividade a partir das obras de Maxwell. Mas também nos parece bastante plausível que a generalização de Larmor, da relatividade da óptica para todo eletromagnetismo, também foi fundamental para elaboração do Princípio Geral de Poincaré. Um fato importante a ser observado é que nessa afirmação Poincaré ainda não usa o termo *relatividade* para se referir a esse princípio. O primeiro uso dessa palavra aparece no artigo *Des fondements de la géométrie; à propos d'un livre de M. Russell* (1899):

Sim, na base da geometria projetiva, existe um postulado que pode ser chamado de princípio da relatividade da posição. Na base da geometria métrica, há também um postulado que também pode ser chamado de princípio da relatividade da posição. Mas este não é o mesmo postulado. (POINCARÉ, 1899a, p. 256)

Mais à frente, Poincaré esclarece a diferença desses dois *princípios da relatividade*:

Então, quando digo que o princípio da relatividade da posição é comum a ambas as geometrias, isso simplesmente significa que, em ambas as geometrias, há coisas que não podem ser distinguidas umas das outras. *Mas elas não são as mesmas coisas*. Deve-se acrescentar, no entanto, que o que é indistinguível para a geometria métrica é também indiscernível para a geometria projetiva; mas o inverso não é verdadeiro, e a geometria métrica torna possível distinguir coisas que seriam indistinguíveis para a geometria projetiva. (POINCARÉ, 1899a, p. 256)

Poincaré também discute a questão dos graus de liberdade de um corpo em um espaço n dimensional.

O que significa a palavra formas? A forma (*shape*) é algo que conhecemos antecipadamente, ou é, por definição, o que não é alterado pelos movimentos previstos? Seu axioma que ele significa: Na medida do possível, é necessário que os números são susceptíveis de certos movimentos, e há alguma coisa que não vai ser alterada por esses movimentos e vamos chamar de forma (*shape*)? Ou significa: você sabe qual é a forma; ótimo! Para que a medição seja possível, as figuras devem poder sofrer certos movimentos que não alterem esta forma? Eu não sei o que o Sr. Russell quis dizer; mas aos meus olhos o primeiro significado é o único correto. Com esta primeira afirmação, o axioma é incontestavelmente *a priori*; mas então o que ele nos ensina? Ele nos ensina apenas uma coisa: as figuras devem estar livres para se mover; ele não nos ensina quantos <<graus de liberdade>> (*degree freedom*) existem. Por que é necessário que o número de graus de liberdade seja 6 no espaço tridimensional e $n(n+1)/2$ no espaço n -dimensional? (POINCARÉ, 1899a, p. 259)

Russell recorre a homogeneidade e a relatividade do espaço, mas Poincaré mostra que essa abordagem é apenas um princípio de petição. A solução para o problema exige uma matemática mais sofisticada: a teoria de grupos

O número de graus de liberdade pode, portanto, ser diferente de seis sem que a medição espacial se torne impossível. Suponha, por exemplo, que uma figura possa ser transportada de modo que um de seus pontos chegue a qualquer ponto no espaço, mas se esse ponto for fixo, a figura não poderá se mover. Não haverá mais de três graus de liberdade. A medida ainda será possível? É fácil ver que não podemos mais comparar comprimentos, superfícies e ângulos em geral; mas a medição de volumes ainda é possível. Portanto, não é correto dizer que, com essa hipótese, a "medida espacial" (se mantivermos esse termo vago) não pode mais ser feita. O princípio da mobilidade livre deve ser declarado assim na linguagem matemática: há um grupo de transformações que preserva certas propriedades das figuras, e todas essas propriedades

constituem o que chamamos de sua forma¹⁹. (POINCARÉ, 1899a, p. 260)

Depois de discutir a estrutura do espaço, Poincaré começa a discutir o significado dessas considerações para a mecânica. Novamente ele fala do princípio da relatividade, mas dessa vez ele o chama de *lei da relatividade*.

O estado dos corpos e suas distâncias mútuas a qualquer momento dependerão apenas do estado dos mesmos corpos e de suas mútuas distâncias no momento inicial, mas de modo algum dependerão da posição inicial absoluta do sistema e de sua orientação inicial absoluta. Isto é o que nós chamaremos, por uma questão de abreviação, *a lei da relatividade*. (POINCARÉ, 1899a, p.267)

O *princípio da relatividade* e a *lei da relatividade* são proposições equivalentes, então por que Poincaré faz essa distinção? Ao que tudo indica apenas para diferenciar uma proposição geométrica (*princípio da relatividade*) de uma proposição física (*lei da relatividade*). É importante frisar que páginas 265 à 269 foram transformadas no quinto capítulo do livro *A Ciência e a Hipótese*. Após a página 269 não há mais nenhuma menção do princípio ou da lei da relatividade. Nós discutiremos novamente alguns pormenores da *lei da relatividade* quando falarmos do livro *A Ciência e a Hipótese*. Considerando que este trabalho de 1899 era uma discussão do livro de Bertrand Russell sobre a geometria, não seria Russell o primeiro pesquisador a empregar o termo *relatividade* no sentido moderno? A resposta é não. Russell embora emprega os termos homogeneidade do espaço e relatividade do espaço, suas bases são puramente geométricas e se aplicam a posição relativa de objetos geométricos em um espaço abstrato. Foi Poincaré quem estabeleceu a conexão do espaço motor com a teoria de grupos e com o movimento dos corpos rígidos e que conectou a ideia de relatividade à física como um princípio fundamental (LOGUNOV, 2004).

Em 1900, Poincaré se apresentou no *Congresso Internacional de Física em Paris*. A palestra estava intitulada como *Relations entre la Physique Expérimentale et la Physique Mathématique*, e publicada em *A Ciência e a Hipótese* com título de *As Teorias da Física Moderna*. Nessa palestra, Poincaré apresentou um panorama do fracasso das novas teorias físicas em explicar as tentativas de se medir a velocidade da Terra em relação ao éter, criticando o uso de hipóteses *ad hoc* por Lorentz (e FitzGerald) para obter concordância das teorias com a experiência.

¹⁹ Posteriormente, os matemáticos estabeleceriam que o número de dimensões para o movimento livre de um corpo é igual ao número de isometrias do corpo, que é definido pelo seu campo vetorial de Killing. O campo vetorial de Killing é gerado pelas soluções da equação de Killing, $\mathcal{L}_u(g_{ij}) = 0$, onde $\mathcal{L}_u$ é a derivada de Lie na congruência- u e g_{ij} é a métrica do espaço.

E, agora, permita-me uma digressão. Com efeito, devo explicar porque não creio, apesar de Lorentz, que observações mais precisas possam algum dia, evidenciar outra coisa senão os deslocamentos relativos dos corpos materiais. Foram feitas experiências que poderiam ter revelado os efeitos de primeira ordem; os resultados foram negativos. Poderia ter sido coincidência? Ninguém o admitiu. Procurou-se uma explicação geral e Lorentz a encontrou. Ele demonstrou que os efeitos de primeira ordem devem destruir uns aos outros, mas não os de segunda ordem. Então, experiências mais precisas foram feitas. Elas também deram resultados negativos e, mais uma vez, não poderia ser coincidência. Uma explicação era necessária. Ela foi encontrada; sempre se encontra alguma; hipótese é coisa que não falta. Mas isso não basta. Quem é que não acha que se atribui, assim, um papel por demais importante ao acaso? Não seria também um acaso essa singular coincidência que faria com que uma certa circunstância viesse, no momento apropriado, destruir os termos de primeira ordem e em uma outra circunstância, completamente diferente, mas igualmente oportuna, se encarregasse de destruir os de segunda ordem? Não, é preciso encontrar uma mesma explicação para ambos, e, então, tudo nos leva a crer que essa explicação será igualmente válida para os termos de ordem superior e que a destruição mútua desses termos será rigorosa e absoluta. (POINCARÉ, 1900b, p. 1172)

Neste mesmo ano, Poincaré exploraria ainda mais a conexão da relatividade com as leis gerais da física no trabalho *La Théorie de Lorentz et le principe de réaction*. Recordemos que quando os resultados da experiência de Michelson-Morley promoveram uma *complicação* no estilo de pensamento vigente, H. Lorentz para manter a harmonia das ilusões propôs a hipótese da contração do comprimento e tentou justificá-lo como uma consequência da interação do éter com as moléculas. Porém, a explicação foi considerada insatisfatória e Lorentz tentou achar um conjunto de transformações de coordenadas que permitisse explicar os resultados da experiência. Lorentz encontrou um conjunto de transformações, válidas até a primeira ordem de v/c .

$$x' = x - vt$$

$$t' = t - \frac{vx}{c^2}$$

A transformação do espaço é a transformação clássica, cujo significado era bem conhecido. Porém, qual o significado da transformação do tempo? Lorentz achava que se tratava apenas de um truque matemático, desprovido de significado físico. Porém, neste trabalho de 1900, Poincaré conseguiu decifrar o mistério: a transformação do tempo (chamado de tempo local), era justamente a medida de tempo, válida em primeira ordem de v/c , que observadores em movimento obteriam se tentassem sincronizar seus relógios usando sinais luminosos ou um telégrafo sem fio.

Por que Poincaré conseguiu enxergar esse fato? Ema uma leitura fleckiana, isso se deve principalmente as conexões ativas de Poincaré. O círculo esotérico de Lorentz era centrado basicamente na física-matemática. Havia pouca circulação intercoletiva de Lorentz com outras áreas mais práticas, como a geografia. Já Poincaré pertencia a vários círculos e mantinha uma circulação intercoletiva muito ampla. Enquanto membro e, posteriormente, presidente do Bureau des Longitudes, Poincaré foi obrigado a lidar com problemas práticos de sincronização de relógios para realizar o cálculo da geodésica e das longitudes usando o telégrafo sem fio.

Nesse trabalho, as ideias de Poincaré sobre a coordenação do tempo e do espaço também estavam mais claras e pela primeira vez ele consegue associa-las ao *princípio da relatividade*. Poincaré também tentou mostrar que o princípio da reação era uma consequência da relatividade e buscou formas de conciliar essas ideias com o modelo de Lorentz.

Na teoria de Lorentz, ele apontou, termos de segunda ordem em v/c tiveram que ser negligenciados; um “tempo local” ao invés do tempo real tinha que ser usado; diferentes valores para a energia em diferentes sistemas de referência tiveram que ser introduzidos; e uma força eletromagnética que existe apenas em um referencial móvel deveria ser assumida. A teoria de Lorentz, portanto, entrava em conflito com o princípio da relatividade, e Poincaré mais uma vez viu uma estreita conexão entre esse princípio e o da ação e reação. Agora, porém, ele mostrou que o princípio de ação e reação poderia ser deduzido do princípio da relatividade e do princípio da conservação da energia. (KATZIR, 2005b, p. 272)

O princípio da relatividade aparece tardiamente no artigo, quando Poincaré analisa se os resultados obtidos nas duas sessões anteriores sobre a inclusão do princípio da reação, tal como se associar uma inércia a energia e uma espécie de recuo no éter, poderiam significar objeções a teoria de Lorentz. Poincaré (1900b, p. 271-272) declara:

O princípio da reação parece-nos, portanto, como consequência do princípio da energia e do princípio da relatividade do movimento. Este último pesa fortemente em nossos pensamentos quando consideramos um sistema isolado. Mas, no caso que estamos considerando, não estamos lidando com um sistema isolado, uma vez que estamos considerando apenas a matéria comum e, além disso, ainda existe um éter. Se todos os objetos materiais são transportados por uma translação comum, como, por exemplo, o movimento da Terra, os fenômenos poderiam ser diferentes daqueles que observaríamos na ausência daquela translação, já que o éter não poderia ser transportado pela translação. Parece que o princípio da relatividade do movimento não deveria se aplicar apenas à matéria comum; então, experimentos foram realizados para detectar o movimento da Terra. É verdade que essas experiências produziram resultados negativos, mas achamos isso bastante surpreendente. Tudo a mesma coisa permanece. Esses

experimentos, como eu disse, produziram um resultado negativo, e a teoria de Lorentz explica esse resultado negativo. Parece que o princípio da relatividade do movimento, que não é claramente verdadeiro *a priori*, é verificado *a posteriori* e que o princípio da reação deve seguir. No entanto, o princípio da reação não se sustenta; como pode ser? É o caso em que, na realidade, aquilo que chamamos de princípio da relatividade do movimento foi verificado apenas imperfeitamente, como mostra a teoria de Lorentz.

Ao final do artigo, Poincaré volta a enfatizar que o princípio da relatividade seja uma lei exata de toda física, não apenas aplicada a matéria, mas a todos os fenômenos físicos e mostra que esta ideia já estava sendo gestada em sua publicação de 1895:

Uma importante consequência decorre da correlação dos dois fatos. Isso é que o próprio experimento Fizeau já é contrário ao princípio da reação. Se, de fato, como indicado por aquele experimento, as ondas são arrastadas apenas parcialmente, então a propagação relativa das ondas em um meio móvel não deve seguir as mesmas leis que a propagação em um meio estacionário, o que equivale a dizer o princípio do movimento relativo não se aplica somente à matéria, e devemos fazer pelo menos uma correção adicional, da qual falei acima (2.) e que consiste em relacionar tudo com a “*tempo local*”. Se essa correção não for compensada por outros, devemos concluir que o princípio da reação não é correto apenas para a matéria. Assim, todas as teorias que respeitam esse princípio são condenadas, *pelo menos, se consentirmos em modificar profundamente todas as nossas ideias sobre eletrodinâmica*. Essa é uma ideia que desenvolvi mais extensamente em um artigo anterior (POINCARÉ, 1895, p 395).²⁰

A principal diferença entre a declaração de Poincaré entre 1895 e 1900, era sua convicção na validade do princípio.

Em 1900, Poincaré reiterou sua visão de que as teorias atuais da eletrodinâmica estavam em conflito com o princípio da relatividade, em cuja validade ele agora parecia mais confiante. Segundo as teorias, ele disse, “poder-se-ia esperar ver métodos precisos dando resultados positivos” para determinar o movimento absoluto da Terra através do éter, mas ele acreditava que “tal esperança é ilusória” (KATZIR, 2005b, p. 272).

Podemos considerar o pronunciamento de 1895 de Poincaré como a primeira declaração do princípio da relatividade. Mesmo que a ideia de movimento relativo tenha uma longa história, como abordamos no começo dessa sessão, e Larmor já defendesse a doutrina do movimento relativo dentro do eletromagnetismo, Poincaré percebeu que não se tratava apenas uma lei válida para matéria ou corpos ponderáveis, mas para todos os fenômenos físicos. Esse salto de Poincaré foi fundamental para o desenvolvimento da teoria da relatividade. Embora essa generalização pareça simples, de fato ela não era. O

²⁰ *l'Éclairage Électrique*, volume 5, nº 40, página 395

próprio Lorentz se sentia desconfortável de assumir que ideia de relatividade pudesse ser válida para o éter, como revela o trecho dessa carta:

Eu preferia outro modo de ver. Tendo sempre em vista os fenômenos da aberração, admiti que o éter está absolutamente imóvel - quero dizer que seus elementos de volume não se movem, embora possam ser a sede de certos movimentos internos. Mas se um corpo nunca se move, não há razão para falar de forças exercidas nesse corpo. Foi assim que fui levado a não falar mais de forças agindo no éter. Eu digo que o éter atua nos elétrons, mas não digo que tenha uma reação do lado deles; Eu, portanto, nego o princípio da reação nessas ações elementares. Nessa ordem de ideias, não posso falar nem de uma força exercida por uma parte do éter na outra; As pressões de Maxwell não têm existência real e são apenas ficções matemáticas que servem para calcular de maneira simples a força que age sobre um corpo ponderável. (LORENTZ, 1901)

Infelizmente não sabemos qual foi a resposta de Poincaré a Lorentz, o documento não foi preservado. O que sabemos que Poincaré continuou a desenvolver e expandir seu estilo de pensamento, o princípio da relatividade, enquanto Lorentz não o considerava como uma ideia fundamental e preferia preservar a harmonia das ilusões. Isso fica claro em seu *memoir*, de 1904, onde Lorentz escreve que o único postulado de seu trabalho é que o sistema de coordenadas se mova uma velocidade inferior à da luz (LORENTZ, 1904). A relutância de Lorentz com a validade do princípio da relatividade fica bastante clara no famoso artigo *Deux Mémoires de Henri Poincaré sur la Physique Mathématique*²¹:

Não tendo percebido, não consegui obter a invariância exata das equações; minhas fórmulas permaneciam sobrecarregadas com certos termos que deveriam ter desaparecido. Esses termos eram pequenos demais para ter um efeito apreciável sobre os fenômenos, e eu poderia explicar a independência do movimento da Terra revelada pelas observações, mas não estabeleci o princípio da relatividade como rigoroso e universalmente verdadeiro. Poincaré, ao contrário, obteve uma perfeita invariância das equações da eletrodinâmica e formulou o "postulado da relatividade", termos que ele foi o primeiro a empregar. (LORENTZ, 1921, p. 298)

A afirmação de Lorentz concorda com o que apresentamos, o princípio da relatividade foi estabelecido por Poincaré. Em 1901, Poincaré publicou um capítulo no livro *Bibliothèque du Congrès international de philosophie, Volume 3*. O capítulo foi intitulado *Sur les principes de la mécanique* e aborda o movimento relativo. Este trabalho seria republicado em *A Ciência e a Hipótese*, em 1902, uma coletânea de ensaios que foram adaptados e tratam do tema exposto no título. O quinto capítulo *Experiência e*

²¹ Esse artigo foi escrito por Lorentz em 1914, mas somente publicado em 1921. Este artigo também foi reimpresso nos *Ouvres de Henri Poincaré*, tomo X, de 1956.

Geometria, são as páginas 265 à 269 do ensaio de 1899, *Des fondements de la géométrie; à propos d'un livre de M. Russell*. Poincaré volta a discutir a “lei da relatividade”.

Temos que considerar, por um lado, o "estado" dos vários corpos desse sistema - por exemplo, sua temperatura, seu potencial elétrico, etc; e por outro lado, sua posição no espaço. E entre os dados que nos permitem definir essa posição, distinguimos as distâncias mútuas desses corpos que definem suas posições relativas e as condições que definem a posição absoluta do sistema e sua orientação absoluta no espaço. A lei dos fenômenos que serão produzidos neste sistema dependerá do estado desses corpos e de suas mútuas distâncias; mas por causa da relatividade e da inércia do espaço, elas não dependerão da posição e orientação absoluta do sistema. Em outras palavras, o estado dos corpos e suas distâncias mútuas a qualquer momento dependerão apenas do estado dos mesmos corpos e de suas mútuas distâncias no momento inicial, mas de modo algum dependerão da posição inicial absoluta do sistema e de sua orientação inicial absoluta. Isto é o que nós chamaremos, por uma questão de abreviação, *a lei da relatividade*. (POINCARÉ, 1899a, p. 267)

Como já vimos, Poincaré apresenta sua “lei da relatividade” em suas reflexões sobre a geometria e sua conexão com os grupos de deslocamento²² e a física. Por que esse princípio se originou na matemática? Segundo Galison (2003), o princípio da relatividade era uma intersecção de três problemas: a filosofia matemática (convencionalismo), a física e o estudo das geodésicas.

No final de 1902, Poincaré passou uma década inteira enfrentando o problema da coordenação do tempo a partir de três perspectivas muito diferentes. Como um dos exaltados membros do Bureau of Longitude Academy desde janeiro de 1893, Poincaré ajudou a liderar a instituição em sua busca para cobrir o mundo com o tempo sincronizado. Quando a questão da reestruturação convencional do tempo em um sistema decimal surgiu a sério em meados da década de 1890, foi Poincaré quem dirigiu o esforço de avaliar as alternativas, culminando no relatório de 1897. Depois, de volta à filosofia: em 1898, ele proclamava a uma plateia essencialmente filosófica que a simultaneidade não era outra coisa senão uma convenção, uma convenção que definiria a simultaneidade exatamente como seu Bureau fizera com sua coordenação telegráfica de relógios. Da *Revue de Metaphysique et de Morale*, poucos meses antes Poincaré estava de volta, mais profundo do que nunca, no externismo expedicionário. A partir de 1899, ele tinha sido a ligação entre a Academia e a complexa e perigosa missão de longitude a Quito, enquanto a missão lutava para ligar o tempo e a geografia através da simultaneidade telegráfica. Naquele verão de 1900, ele emitiu sua declaração mais forte, mas filosófica, da convencionalidade da simultaneidade, uma afirmação que apareceu em uma das seções mais citadas da *Science et L'Hypothesis*. Então um retorno à física. Em dezembro de 1900, Poincaré “revisou” a teoria de Lorentz, transformando a ficção matemática de Lorentz em “tempo

²² O grupo de deslocamentos é o conjunto das transformações isomórficas que preservam as distâncias entre os pontos de um corpo rígido ou de uma variedade.

local” em procedimento de telegrafista, onde os observadores se moviam através dos relógios sincronizados de éter trocando sinais. (GALISON, 2003, p. 211)

Nesta passagem, vemos que o princípio da relatividade foi sendo construído a partir da circulação intercoletiva de Poincaré e os coletivos de pensamento das geociências (as atividades que Poincaré realizava no Bureau das Longitudes), e coletivos de pensamento da filosofia (principalmente as concepções kantianas, de Mach e de Russell sobre o espaço e tempo, que Poincaré criticaria, principalmente em *A Ciência e a Hipótese*), da matemática (*análise situs* de Riemann e a teoria de grupos de Lie que Poincaré usa como ferramenta para caracterizar o espaço), a física (sobre tudo a teoria eletromagnética de Maxwell, Hertz, Larmor e Lorentz) e dos astrônomos (em particular, as medidas da velocidade da luz de Roemer e as desigualdades de Newcomb). Como mostramos anteriormente, em 1893, Poincaré foi alocado no Bureau das Longitudes. Uma de suas tarefas era coordenar o uso do telégrafo sem fio. Nesse período, Poincaré estabeleceu, em uma leitura fleckiana, uma conexão ativa, a saber: aprofundou seus conhecimentos na teoria eletromagnética e os problemas contemporâneos a respeito das tentativas de estabelecer a interação entre o éter e a matéria. Em 1895, dois anos após sua admissão no Bureau das Longitudes, Poincaré discutiu a teoria de Larmor sobre a matéria ser o éter condensado e apresentou aquilo que, em uma leitura fleckiana, pode ser considerada a primeira protoideia do princípio da relatividade:

A experiência revelou uma série de fatos que podem ser resumidos na seguinte fórmula: é impossível tornar manifesto o movimento absoluto da matéria, ou melhor, o movimento relativo da matéria em relação ao éter; tudo o que pode ser medido é o movimento da matéria ponderável em relação à matéria ponderável (POINCARÉ, 1895, p. 426)

Registre que o interesse de Poincaré nas teorias eletromagnéticas partia do seu interesse em compreender melhor o funcionamento do telégrafo sem fio. Portanto, o princípio da relatividade como um estilo de pensamento nasceu das conexões ativas promovidas pela circulação intercoletiva de Poincaré entre o círculo esotérico das geociências, matemática, filosofia, física e astronomia.

O relato de Galison (2003) também nos mostra como a questão da simultaneidade surgiu da experiência de Poincaré com a coordenação de relógios usando o telégrafo sem fio. Aqui devemos acrescentar o papel que a circulação intercoletiva com a Astronomia ativou conexões que eram desconhecidas a Poincaré e seus colegas. No final do século XIX, já sabia-se que a velocidade da luz era muito rápida, porém finita. Maxwell ao calcular a velocidade das ondas eletromagnéticas, descobriu que sua velocidade era

equivalente a velocidade da luz e conjecturou que a própria luz fosse uma onda eletromagnética. Se tomarmos, para efeito de cálculo, a velocidade da luz como 300000 km/s, em um segundo, a luz seria capaz de completar 8 voltas ao redor da superfície da Terra. Isso significa que dois fenômenos que se produzam em pontos diferentes da Terra são percebidos como simultâneos para observadores locais. Em outras palavras, o erro devido a posição relativa dos operadores de telégrafo em estações fixas ou em navios estaria muito abaixo da margem de erro e, portanto, seria irrelevante. Porém, Poincaré levou este problema para outro coletivo de pensamento: o dos astrônomos. Em *Mesure du Temps*, ele escreve:

Em 1572, Tycho-Brahé notou no céu uma estrela nova. Uma imensa conflagração se produzira em algum astro muito distante; mas produzira-se muito tempo antes; foi preciso que se passassem pelo menos duzentos anos até que a luz que partia dessa estrela alcançasse nossa Terra. Portanto, essa conflagração era anterior ao descobrimento da América. Pois bem, quando digo isso, quando considero esse fenômeno gigantesco que talvez não tenha tido nenhuma testemunha, já que os satélites dessa estrela talvez não tenham habitantes, quando digo que esse fenômeno é anterior à formação da imagem visual da ilha de Española na consciência de Cristóvão Colombo, o que quero dizer? Basta um pouco de reflexão para compreender que todas essas afirmações, por si sós, não têm nenhum sentido. Só podem adquirir um sentido a partir de uma convenção. (POINCARÉ, 1898, p. 06-07)

Ao fazer a circulação intercoletiva do problema da simultaneidade para astronomia, onde a ordem de grandeza dos fenômenos torna ativa a finitude da velocidade da luz, Poincaré começou a compreender o caráter relativo da simultaneidade e, por consequência, do espaço e do tempo. São essas conexões ativas, que podemos extrair do relato de Galison, e que deram substancialidade para que Poincaré começasse a formular uma lei geral da relatividade. Por trás desses fenômenos haviam pressupostos tácitos da isotropia e homogeneidade do espaço (conexões ativas), que quando traduzidos na linguagem das simetrias convergiam para o princípio da relatividade (conexão passiva) (BROWN, 2017). Para compreender o que era intrínseco ao espaço, Poincaré precisava examinar as geometrias e as simetrias conservadas. Esta é a perspectiva que originaria o Convencionalismo (conexão passiva). Max Jammer (2006), explora que a relatividade de Poincaré surgiu de uma generalização do seu convencionalismo geométrico para as leis da física:

Ao aplicar esse argumento à "Primeira Lei" de Newton, a lei da inércia, Poincaré teria sido capaz de estender seu convencionalismo do domínio das concepções geométricas ou espaciais para o das concepções temporais, como a igualdade de dois intervalos de tempo. De acordo

com a lei da inércia, como declarado no Principia de Newton, “todo corpo continua em seu estado de repouso, ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que obrigado a mudar esse estado por forças impressas nele” ou, expressado em breve, uma partícula livre se move sempre com velocidade constante. Mas se tal partícula cobre distâncias iguais em intervalos de tempo iguais, o problema, discutido por Isaac Barrow, de como verificar a igualdade de dois intervalos temporais separados temporariamente parece encontrar sua solução. Bastaria medir as distâncias iguais cobertas por tal partícula para assegurar a igualdade dos intervalos de tempo correspondentes a essas distâncias. Se, como Poincaré afirma, no entanto, a lei da inércia é meramente uma convenção, não é necessariamente verdade que os intervalos de tempo em discussão são “realmente” iguais em duração. (JAMMER, 2006, p. 99)

Os argumentos de Jammer (2006) são reforçados pela seguinte passagem:

Até agora falei como um geômetra euclidiano. Mas eu disse que um experimento, seja ele qual for, requer uma interpretação da hipótese euclidiana; requer igualmente uma sobre a hipótese não euclidiana. Bem, fizemos uma série de experimentos. Nós os interpretamos na hipótese euclidiana, e reconhecemos que esses experimentos assim interpretados não violam essa “lei da relatividade”. (POINCARÉ, 1899a, p. 268)

Seguindo adiante, Poincaré discute a aplicação da *lei da relatividade* em geometrias não euclidianas. Após sua breve discussão, ele apresenta um novo enunciado da lei:

Assim, nossa lei da relatividade pode ser enunciada da seguinte forma: As leituras que podemos fazer com nossos instrumentos em qualquer momento dependerão apenas das leituras que pudemos fazer nos mesmos instrumentos no momento inicial. Ora, tal enunciação é independente de toda interpretação por experimentos. Se a lei é verdadeira na interpretação euclidiana, ela também será verdadeira na interpretação não-euclidiana. (POINCARÉ, 1899a, p. 268)

Contudo Poincaré não considera esse enunciado completamente satisfatório. Na republicação da Ciência e Hipótese, após discutir alguns pontos desse enunciado, ele apresenta outra enunciação:

Para que a mente seja plenamente satisfeita, a lei da relatividade teria que ser enunciada da seguinte forma: - O estado dos corpos e suas distâncias mútuas em qualquer momento dado, assim como as velocidades com as quais essas distâncias estão mudando naquele momento, dependem apenas do estado desses corpos, de suas distâncias mútuas no momento inicial e das velocidades com as quais essas distâncias estavam mudando no momento inicial. Mas eles não dependerão da posição inicial absoluta do sistema nem de sua orientação absoluta, nem das velocidades com as quais a posição e orientação absoluta estavam mudando no momento inicial. (POINCARÉ, 1902a, p. 98-99)

Mas, Poincaré reconhece que esse princípio apresenta dificuldades para sistemas em rotação.

Infelizmente, a lei assim enunciada não concorda com experimentos - pelo menos, como eles são normalmente interpretados. Suponha que um homem fosse levado para um planeta, cujo céu estava constantemente coberto por uma grossa cortina de nuvens, de modo que ele jamais pudesse ver as outras estrelas. Nesse planeta ele viveria como se estivesse isolado no espaço. Mas ele notaria que isso gira, seja medindo sua elipticidade (que normalmente é feita por meio de observações astronômicas, mas que poderia ser feita por meios puramente geodésicos), ou repetindo o experimento do pêndulo de Foucault. A rotação absoluta deste planeta pode ser claramente mostrada desta maneira. Ora, aqui está um fato que choca o filósofo, mas que o físico é obrigado a aceitar. Sabemos que, a partir desse fato, Newton concluiu a existência do espaço absoluto. Eu mesmo não posso aceitar essa maneira de olhar para ela. (POINCARÉ, 1902a, p. 99)

Essa frase podemos ver novamente a influência do Bureau de Longitudes na formação de Poincaré ao citar a possibilidade de se medir a elipticidade de um planeta por meio geodésicos. Este argumento reforça a hipótese de Galison (2003) sobre a lei da relatividade ser a intersecção das geodésicas, da mecânica e do convencionalismo e a nossa hipótese que foi a circulação intercoletiva entre diferentes coletivos de pensamento, engenheiros, geocientistas, físicos, matemáticos (geômetras e analistas), astrônomos e filósofos, que levou as conexões ativas que ajudaram na formação do princípio da relatividade.

Outro ponto interessante associado a frase é que se costuma à dizer que Poincaré tinha dúvidas sobre a universalidade do Princípio da Relatividade. Mas observe que apesar de todas as objeções experimentais, ele afirma que não aceita essa maneira de olhar as dificuldades. Ao que indica Poincaré estava antecipando aos seus críticos que estava ciente seu princípio da relatividade era, aparentemente, contraditório com fenômenos de rotação, embora ele não tivesse dúvida sobre a sua veracidade. Essa hipótese que levantamos se justifica na seguinte afirmação:

Vou explicar por que na terceira parte, mas no momento não é minha intenção discutir essa dificuldade. Devo, portanto, resignar-me, na enunciação da lei da relatividade, a incluir velocidades de todo tipo entre os dados que definem o estado dos corpos. Seja como for, a dificuldade é a mesma para a geometria de Euclides e para a de Lobatschevsky. Não necessito, portanto, de mais problemas, e só o mencionei incidentalmente. Em suma, seja qual for a maneira como a observamos, é impossível descobrir no empirismo geométrico um significado racional. (POINCARÉ, 1902a, p. 100)

Contudo em *Sur les principes de la mécanique*, de 1901, que foi republicado como sexto capítulo (parte III) de *A Ciência e a Hipótese* encontramos as seguintes asserções:

1. Não há espaço absoluto e só concebemos o movimento relativo; e, no entanto, na maioria dos casos, os fatos mecânicos são enunciados

como se houvesse um espaço absoluto ao qual possam ser referidos. 2. Não há tempo absoluto. Quando dizemos que dois períodos são iguais, a afirmação não tem significado e só pode adquirir um significado por uma convenção. 3. Não apenas não temos intuição direta da igualdade de dois períodos, mas nem sequer intuimos diretamente a simultaneidade de dois eventos que ocorrem em dois lugares diferentes. Expliquei isso em um artigo intitulado “*Mesure du Temps*”. 4. Por fim, não é a nossa geometria euclidiana, em si mesma, apenas um tipo de convenção da linguagem? Fatos mecânicos podem ser enunciados com referência a um espaço não-euclidiano que seria menos conveniente, mas tão legítimo quanto nosso espaço ordinário; a enunciação se tornaria mais complicada, mas ainda assim seria possível. Assim, o espaço absoluto, o tempo absoluto e até a geometria não são condições impostas à mecânica. Todas essas coisas não mais existiam antes da mecânica do que se pode logicamente dizer que a língua francesa existia antes das verdades expressas em francês. (POINCARÉ, 1902a, p. 111-112)

Uma vez que não exista espaço, tempo, simultaneidades absolutas e uma única geometria verdadeira, as experiências que colocam em dúvida o princípio da relatividade, como a medida da eplipticidade, perdem força. Fica bastante claro que Poincaré não tinha dúvida da validade do Princípio da Relatividade. As dificuldades impostas pela experiência eram apenas problemas derivados da aceitação do espaço e tempo absoluto. Sobre o termo “*lei da relatividade*”, ele só aparece nesse capítulo. Porém, a palavra *relatividade* e exemplos envolvendo fenômenos onde apenas podemos considerar efeitos devido ao movimento relativo aparecem em todo o livro. Apenas ao final do livro, em seu estudo sobre a eletrodinâmica, Poincaré emprega o termo *princípio da relatividade*.

Algumas objeções ainda permaneciam. Os fenômenos de um sistema elétrico pareciam depender da velocidade absoluta de translação do centro de gravidade desse sistema, o que é contrário à ideia que temos da relatividade do espaço. Apoiado por Sr. Crémieu, Sr. Lippman apresentou essa objeção de uma forma muito impressionante. Imagine dois condutores carregados com a mesma velocidade de translação. Eles estão relativamente em repouso. No entanto, sendo cada um deles equivalente a uma corrente de convecção, eles deveriam atrair um ao outro e, medindo essa atração, poderíamos medir sua velocidade absoluta. "Não!", Responderam os partidários de Lorentz. "O que poderíamos medir dessa maneira não é sua velocidade absoluta, mas sua *velocidade relativa em relação ao éter*, de modo que o princípio da relatividade está a salvo" (POINCARÉ, 1902a, p. 280-281)

Esse exemplo dado por Poincaré, é muito semelhante ao que Einstein usa na introdução de seu *paper* relatividade de 1905:

É bem sabido que, se tentarmos aplicar a eletrodinâmica de Maxwell, como concebida na atualidade, a corpos móveis, somos levados a uma assimetria que não concorda com os fenômenos observados. Vamos pensar na ação mútua entre um ímã e um condutor. Os fenômenos observados, neste caso, dependem apenas do movimento relativo do

condutor e do ímã, enquanto, de acordo com a concepção usual, uma distinção deve ser feita entre os casos em que um ou outro dos corpos está em movimento. Se, por exemplo, o ímã se move e o condutor está em repouso, então um campo elétrico de determinado valor de energia é produzido na vizinhança do ímã, que excita uma corrente nas partes do campo onde existe um condutor. Mas se o ímã estiver em repouso e o condutor for colocado em movimento, nenhum campo elétrico é produzido na vizinhança do ímã, mas uma força eletromotriz que corresponde a nenhuma energia em si é produzida no condutor; isto provoca uma corrente elétrica da mesma magnitude e da mesma carreira que a força elétrica, assumindo-se, é claro, que o movimento relativo em ambos os casos é o mesmo. (EINSTEIN, 1905a, p. 891)

E logo em seguida Einstein rejeita o éter e introduz seu princípio da relatividade:

Exemplos de um tipo similar, como a tentativa frustrada de substanciar o movimento da Terra em relação ao "meio-luz", nos levam à suposição de que não apenas na mecânica, mas também na eletrodinâmica, nenhuma propriedade dos fatos observados corresponde a um conceito de repouso absoluto; mas para todos os sistemas de coordenadas para os quais as equações mecânicas são válidas, as equações eletrodinâmicas e ópticas equivalentes também se mantêm, como já foi mostrado para grandezas de primeira ordem. A seguir, fazemos essas suposições (que posteriormente chamaremos de Princípio da Relatividade). (EINSTEIN, 1905, p. 891)

De todos os trabalhos escritos por Poincaré, o único que sabemos que Einstein leu e discutiu detalhadamente é *A Ciência e a Hipótese* (ISAACSON, 2007). Embora Einstein não faça nenhuma referência ao trabalho de Poincaré, não podemos negar este foi o primeiro contato de Einstein com a ideia da relatividade para todos fenômenos físicos. A similaridade dos exemplos dados por Poincaré e Einstein não podem ser tratados como mera coincidência. Poincaré só viria a comentar novamente sobre o Princípio da Relatividade em 1904, em sua conferência em Saint Louis para o congresso de Artes e Ciências. Ao discutir a crise da física-matemática (física teórica), Poincaré caracteriza o atual estado como a física dos princípios. Segundo Poincaré (1904a) estes princípios são:

- O princípio de Mayer
- O princípio de Lavoisier
- O princípio de Carnot
- O princípio da mínima ação
- O princípio de Newton
- O princípio da relatividade

Poincaré discute cada um dos princípios e as experiências que os colocaram em xeque. Em especial, no princípio da relatividade, Poincaré discute as experiências para evidenciar o movimento da Terra em relação ao éter. Novamente ele discute o problema de sincronização de relógios, citando o exemplo de duas estações (o que mais uma vez remete a sua experiência no Bureau das Longitudes). Nesse artigo Poincaré, apresenta uma nova definição do *Princípio da Relatividade*:

O princípio da relatividade, segundo o qual as leis dos fenômenos físicos devem ser as mesmas, quer para um observador fixo, quer para um observador em movimento de translação uniforme; de modo que não temos, nem podemos ter, nenhum meio de discernir se somos ou não levados num tal movimento. (POINCARÉ, 1904a, p. 306)

Que, como discutimos no segundo capítulo, foi republicado em *O Valor da Ciência*, em 1905, e é muito semelhante a definição que Einstein usaria em 1905. Einstein estava ciente dessa publicação do Poincaré? É bastante provável (DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005, FÖLSING, 1998, GALISON, 2003, JAMMER, 2006). Como já mostramos na sessão anterior, o método de sincronização de relógios também é muito semelhante a que Poincaré apresentou nesse artigo. A semelhança sugere que Einstein tivesse algum conhecimento desse *paper* do Poincaré. Uma passagem que merece a nossa atenção é a seguinte: “E serão inconcebíveis tais sinais se admitirmos, com Laplace, que a gravitação universal se transmite 1 milhão de vezes mais rapidamente que a luz?” (POINCARÉ, 1904a) Poincaré iria resolver essa pergunta alguns meses depois, em 1905, em seu artigo *Sur la dynamique de l'électron*. Como veremos, sua conclusão é que a gravidade se propaga à velocidade da luz por meio de *ondas gravitacionais* (POINCARÉ, 1905g, 1906). Esta conclusão segue como consequência do Princípio da Relatividade.

Em uma leitura fleckiana, o Princípio da Relatividade se tornou uma conexão passiva. Depois de compreender a evolução histórica da formulação desse princípio por Poincaré, é importante compreendermos como ele se tornou uma conexão passiva. Como vimos, a primeira vez que Poincaré propõe a lei da Relatividade, é uma crítica à Russell sobre a Geometria. Vejamos como essa crítica a Russell se tornou uma circulação intercoletiva com a física.

Na geometria duas figuras são equivalentes se a distância mútua de seus pontos em relação aos eixos ortogonais é a mesma. Do ponto de vista algébrico existe uma transformação G transporta pelo espaço a figura F de tal forma que a distância entre seus pontos é preservada para todos os sistemas de eixos ortogonais. Essa operação G é chamado de automorfismo interno, pois ela preserva a forma dentro do mesmo espaço. O conjunto de todos os automorfismos internos forma um grupo que, seguindo a sugestão de Minkowski (1908), denotamos de G_{∞} , porque a transmissão dos eventos é infinita e a simultaneidade é absoluta.

Esse grupo G_{∞} apresenta duas características: é isotrópico, o que significa que qualquer rotação no espaço preserva a sua forma; e é homogêneo, o que significa qualquer translação também preserva sua forma. É por essa razão que o número de geradores do

grupo é a soma do número dos planos de rotação, que no espaço 3D são 3: x - y , x - z , y - z ; e as direções de translação, que no espaço 3D, são 3 direções; totalizando 6 geradores. Essa condição de isotropia e homogeneidade implica que a transformação G associada ao grupo G_∞ deve ser uma transformação Especial (S) e Ortogonal (O) de três dimensões (3), em outras palavras, o grupo G_∞ é um grupo espacial SO(3).

Na mecânica racional essa linguagem matemática é traduzida por meio do conceito de Corpo Rígido, Isotropia da Inércia e pelo Princípio da Relatividade de Galileu. Um corpo rígido quando posto em movimento de translação e/ou de rotação preserva a distância dos seus pontos. Isso só é possível se a transmissão de informação for instantânea e a simultaneidade for absoluta²³. Para um sistema ortogonal de coordenadas a distância entre os pontos é dada por:

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

A isotropia da inércia é uma consequência da primeira lei de Newton. A reação de uma massa inerte depende apenas da intensidade da força que aplicada sobre ela. Como consequência desse postulado, todo sistema de eixos deve ser ortogonal²⁴. Por fim, o princípio da relatividade estabelece que dois sistemas em movimento de translação uniforme são equivalentes. Nenhuma experiência mecânica interna pode evidenciar se estamos em movimento ou em repouso. Desta forma, o grupo de Galileu G_∞ , é o grupo que descreve os eventos mecânicos.

Em sua crítica à Russell, Poincaré está discutindo esse aspecto comum entre a geometria e a mecânica racional. Esse é um ponto crucial na elaboração da Teoria da Relatividade. Poincaré faz a seguinte pergunta ou, que em uma leitura fleckiana é uma conexão ativa: em 1898, como discutimos no capítulo anterior, Poincaré havia demonstrado que na teoria eletromagnética simultaneidade não tinha significado absoluto e a velocidade de propagação da informação era finita. Como o princípio da relatividade da mecânica (que posteriormente foi validado para óptica) exige um grupo G_∞ , então seria possível medir a velocidade da Terra em relação ao éter por meio de experiências eletromagnéticas. Contudo, todas experiências realizadas, sendo a de Michelson-Morley aquela que estava no limite da precisão, haviam dado resultados nulos. Poincaré

²³ Essa também uma condição exigida pela terceira lei de Newton e pela conservação do momento para interações a distância.

²⁴ Essa dificuldade só será resolvida na Teoria da Relatividade Geral que substitui o Princípio da Relatividade Especial pelo Princípio da Covariância Geral.

interpretou esse fenômeno como uma consequência do Princípio da Relatividade que deveria ser válido para toda a física.

Ao realizar essa proposta, Poincaré promove uma circulação intercoletiva de ideias. Ele transporta da geometria, da matemática e da mecânica o conceito de corpo rígido, grupo e o princípio da relatividade para o eletromagnetismo. De certa forma, essa transposição não era exatamente uma novidade. Muitos físicos tentavam atribuir uma interpretação mecânica do eletromagnetismo. O Tratado de Maxwell nada mais era que a cristalização dessa mecanização do éter eletromagnético. Porém, Poincaré sabia que essa circulação não era tão simples como o deslocamento de ideias e analogias. Era preciso partir de novas premissas.

Em seu ensaio de 1898, sobre a medida do tempo, ele provou, por meio de uma circulação de intercoletiva de ideias entre o eletromagnetismo, a filosofia, a matemática, a astronomia e as geociências, que toda a simultaneidade é relativa e a transmissão de informações é finita e igual a velocidade da luz. Isso significa que o grupo G_{∞} deve ser substituído por um G_c , isto é, um grupo que é definido pela isotropia da velocidade da luz. O conceito de corpo rígido também seria afetado, pois a distância entre dois pontos não poderia mais ser preservada já que durante uma transformação ortogonal haveria um tempo para que a informação fosse transferida para todos os pontos do corpo rígido. Poincaré sabia que ao incluir o princípio da relatividade no eletromagnetismo seria preciso desenvolver uma nova mecânica baseada inteiramente na velocidade da luz (POINCARÉ, 1904a).

As conexões ativas que agora apareciam diante Poincaré era: qual seria o grupo G_c e seus geradores e qual seria a nova definição de corpo rígido? Poincaré não conseguiria resolver esta questão antes de 1905, quando chegou a duas conexões passivas: as transformadas de Lorentz compõe o grupo G_c , que é um grupo $SO(1,4)$. e calculou os seis geradores das rotações (x - y , x - z , y - z , t - x , t - y , t - z) e que este grupo torna invariante a forma quadrática do espaço-tempo (POINCARÉ, 1905g, 1906):

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2$$

Pode-se dizer que o novo corpo rígido é uma distribuição de pontos no espaço e no tempo, cuja distância mútua é um invariante para o grupo G_c . Para chegar a essas conexões passivas, Poincaré precisou realizar circulações intercoletivas com círculo dos físicos teóricos especializados em eletromagnetismo, em particular, H. Lorentz e o círculo

dos matemáticos, geômetras, mecanicistas (princípio da relatividade, corpo rígido, teoria de grupos), astrônomos, geofísica, filosofia (problema da simultaneidade).

4.1.1. Síntese Fleckiana sobre o Princípio da Relatividade

Embora seja creditado a Galileu a criação do princípio da relatividade, estritamente falando, essa afirmação é um anacronismo. Pode-se dizer que a essência do princípio da relatividade aparece com os primeiros filósofos que defendiam o movimento da Terra e deviam explicar que esse movimento não produzia efeitos. Mesmo Galileu tendo descrito de forma clara aquilo que chamamos, por um abuso de linguagem, de princípio da relatividade da mecânica, o conceito de relatividade como entendemos só apareceu de forma sistemática com Poincaré em 1900. No final do século XIX, era consenso (conexões passivas) que:

- O princípio da relatividade é válido para a mecânica.
- O princípio da relatividade é válido para a óptica.
- As Equações de Maxwell não covariantes em Galileu
- É possível medir a velocidade da Terra em relação ao éter.

Ao estudar o problema da medida do espaço, usando o conceito de homogeneidade e o grupo de descolamentos e aplica-los aos problemas da eletrodinâmica e as medidas da velocidade da Terra em relação ao Éter, levaram Poincaré a fazer as seguintes perguntas (conexões ativas):

- O princípio da relatividade é uma lei universal da física devido a isotropia do espaço e do tempo?
- Existe uma censura física em relação aos movimentos absolutos?
- O éter é realmente necessário?

Poincaré derivou a sua lei da relatividade: somente a posição relativa entre os corpos sólidos produz efeitos. Somando a sua descoberta que todas as geometrias são equivalentes, Poincaré compreendeu que essas características eram satisfeitas por todos os referenciais inerciais. Com o princípio da relatividade em mãos, Poincaré agora tinha uma percepção nova (novas conexões passivas) sobre a nova mecânica:

- O princípio da relatividade é uma lei universal.
- O resultado nulo das experiências de Michelson-Morley é uma consequência do princípio da relatividade.

- É impossível medir o movimento entre a matéria o éter, só se pode medir o movimento da matéria em relação a matéria.
- O éter é apenas uma convenção útil que serve de andaime para edificação da física moderna, porém quando o prédio estiver edificado, o éter deverá ser rejeitado tal como aconteceu com o conceito de calórico.
- A isotropia é uma propriedade do espaço e do tempo que os transforma em um contínuo 4-dimensional.
- A homogeneidade e a isotropia da inércia como um fundamento intrínseco do princípio da relatividade.

O princípio da relatividade foi o passo fundamental para a transição da antiga física para a nova física relativística. Esse passo fundamental seria dado por Einstein (1905a) e por Poincaré (1905g, 1906) ao aplicarem o conceito no estudo da eletrodinâmica. Lorentz, na ocasião, não percebeu o potencial heurístico do Princípio da Relatividade e por isso não o explorou em seus estudos e, como ele mesmo confessa, não foi capaz de estabelecer a Teoria da Relatividade como Einstein e Poincaré.

4.2 Contribuições de Poincaré À Dinâmica Relativística

Paralelo ao desenvolvimento do princípio da relatividade e das noções de espaço, tempo e simultaneidade, importantes pesquisas sobre a dinâmica dos corpos carregados foram desenvolvidas. Estes estudos acabaram por compor aquilo que hoje se chama de dinâmica relativística e Poincaré também deu importantes contribuições neste campo. Antes de abordarmos quais foram as contribuições neste campo, precisamos fazer uma contextualização e apresentar alguns conceitos que eram comuns no final do século XIX e no começo do século XX, mas que hoje são pouco conhecidos.

4.2.1. O Estudo da Variação da Massa do Elétron

O primeiro conceito que abordaremos é o de massa. Trata-se de um conceito polêmico, portanto provido de historicidade. Não abordaremos a história do conceito de massa, o leitor interessado poderá consultar a obra de Jammer (2000). Desde a aceitação do princípio da equivalência de Einstein, a palavra massa tem sido de forma genérica para se referir tanto a massa inercial quanto a massa gravitacional. Contudo, durante o

desenvolvimento da dinâmica relativística a diferenciação entre estes dois tipos de massa era crucial.

A massa inercial é definida como a medida da inércia de um corpo, no começo do século XX haviam três tipos de massas inerciais: cinética, maupertuisiana e acelerativa, que se subdivida em longitudinal e transversal (JAMMER, 2000; MARTINS, 2005a, 2012, 2015). A massa gravitacional ocupa o papel de carga gravitacional nas interações entre corpos massivos por meio da lei universal da gravitação. As massas gravitacionais podem ser ativas ou passivas (JAMMER, 2000).

A massa maupertuisiana ($m = p/v$), a massa acelerativa ($m = F/a$) e a massa cinética ($m = 2E/v^2$) são, todas elas, massas inerciais (não envolvem conceitos de gravitação e peso). Na física clássica elas são um único conceito. Na física relativística, são distintas e geralmente levam a resultados diferentes. Dessas três, considera-se que a mais fundamental (e que é utilizada nas deduções atuais da teoria da relatividade) é a massa maupertuisiana, ou seja, a massa que aparece na relação $\vec{p} = m\vec{v}$ (MARTINS, 2005a, p. 18-19).

O período de desenvolvimento da dinâmica relativística que estudaremos envolveu apenas o estudo da massa inercial e por esta razão não iremos nos preocupar em conceituar massa gravitacional. Enfatizamos novamente que nessa época não existia equivalência entre esses dois conceitos de massa. Historicamente, o primeiro conceito de massa que surgiu na dinâmica relativística foi o conceito de massa cinética. Esta ideia foi introduzida em 1881 por J. J. Thomson que ao analisar as propriedades dinâmicas de uma carga elétrica no éter, obteve a seguinte equação para a energia magnética de uma carga esférica em movimento lento (conexão passiva) (MARTINS, 2005a):

$$W_m = \frac{q^2 v^2}{12 \epsilon_0 \pi a c^2}$$

onde q é a carga elétrica, v é a velocidade, ϵ_0 é a permeabilidade elétrica, a é o raio da carga e c é a velocidade da luz no vácuo.

Como a energia magnética era associada a energia cinética e ambas equações dependem do quadrado da velocidade, Thompson estabeleceu a existência de uma massa eletromagnética (MARTINS, 2015):

$$m_e = \frac{q^2}{6 \epsilon_0 \pi a c^2}$$

Porém a energia eletrostática de uma esfera carregada é igual à:

$$W_e = \frac{q^2}{8 \epsilon_0 \pi a}$$

Podemos estabelecer uma relação entre massa e energia, expressa pela fórmula:

$$m_e = \frac{4}{3} \frac{W_e}{c^2}$$

Essa fórmula não aparece no trabalho de Thomson de 1881, mas é obtida facilmente a partir de seus resultados. Note-se sua semelhança com a relação relativística entre massa e energia, $m = E/c^2$. O fator numérico 4/3 será discutido posteriormente. (MARTINS, 2005a, p. 15)

Essa massa eletromagnética foi obtida a partir da energia cinética, podemos chamá-la de massa cinética. Esta relação vale apenas para cargas elétricas em baixa velocidade. De qualquer forma, interessa-nos saber: como esse resultado foi interpretado?

Na época, esses resultados foram interpretados da seguinte forma. Uma partícula sem carga, para ser acelerada até a velocidade v , precisa receber uma energia K dada por $K = \frac{1}{2}mv^2$, correspondente ao trabalho fornecido pela força aceleradora. Essa energia fica armazenada na própria partícula. No caso de uma partícula carregada, além dessa energia cinética ordinária, existe uma energia magnética adicional. Assim sendo, para acelerar a partícula carregada, a força aceleradora deve fornecer uma energia total maior do que no caso da partícula neutra. Essa energia pode ser representada por $K' = \frac{1}{2}(m + m_e)v^2$, onde m_e é a massa eletromagnética. (MARTINS, 2005a, p. 16)

Essas propriedades descobertas por Thomson levaram-no a assumir que o éter apresentava uma nova propriedade mecânica:

Após o trabalho de J.J. Thomson, o éter tinha uma nova propriedade mecânica: além de exercer forças, produzir pressões, ter energia potencial e cinética e um momento magnético, existia também a massa eletromagnética. Note-se que essa massa eletromagnética não é a massa do próprio éter. É a massa associada a uma mudança no éter - pois o campo magnético produzido por uma carga em movimento seria justamente essa mudança. (MARTINS, 2005a, p. 16)

Em 1889, Oliver Heaviside (1850-1925) estudou as propriedades dinâmicas para cargas elétricas em alta velocidades usando seu método operacional. Apesar de ter obtido as equações corretas, os resultados de Heaviside foram criticados. “Esses cálculos eram muito complexos e alguns autores criticaram o método operacional utilizado por Heaviside para chegar ao seu resultado. Por isso, J.J. Thomson deduziu novamente os mesmos resultados, por outro método, confirmando as equações de Heaviside” (MARTINS, 2005a, p. 16) Em 1896, George Frederic Charles Searle (1864-1954), um estudante de J. J. Thomson, mostrou que o campo elétrico de uma carga em movimento rápido era equivalente ao campo de uma carga elétrica na forma de um elipsoide, com seu comprimento contraído na direção longitudinal por um fator de $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ (SEARLE,

1896). Estes elipsoides foram chamados por Searle de “elipsoides de Heaviside” (SEARLE, 1896, MARTINS, 2005a). Em 1887, Searle apresentou uma importante de suas equações: uma carga elétrica não poderia ser acelerada à velocidades iguais ou superiores a velocidade da luz (SEARLE, 1897).

A equação obtida por Searle mostrava que a energia do campo eletromagnético de uma carga em movimento tenderia a infinito, quando a velocidade da carga tendesse a c . Portanto, seria necessário fornecer um trabalho infinito para acelerar essa carga até a velocidade da luz. Por essa razão, Thomson e Searle concluíram que era impossível acelerar uma carga a uma velocidade igual ou superior a c . Esse é um resultado bem conhecido da teoria da relatividade, que estava no entanto sendo deduzido a partir de considerações puramente eletromagnéticas, sem fazer uso dos postulados da relatividade especial. (MARTINS, 2005a, p. 16)

Neste mesmo período (1896-1897), trabalhos experimentais de Peter Zeeman (1865-1943) e J. J. Thomson permitiram a descoberta dos elétrons. H. Lorentz, analisou teoricamente o trabalho de Zeeman, e obteve o valor da razão da carga do elétron por sua massa (e/m) (MARTINS, 2005a). Esse resultado era extremamente importante, pois se a massa do elétron variava com a velocidade, então a razão e/m deveria diminuir para elétrons muito rápidos.

Medindo a deflexão de raios catódicos em campos elétricos e magnéticos, Thomson e Walter Kaufmann (1871-1947) mediram em 1897 a razão e/m para elétrons de baixa velocidade, obtendo valores que concordavam com a estimativa de Lorentz. Em 1898 e 1900, Phillip Lenard (1862-1947) mediu e/m para raios beta com velocidades de até $c/3$. As medidas indicaram um aumento da massa com a velocidade. Os dados não eram conclusivos, mas podiam ser interpretados como uma indicação de que os elétrons tinham uma massa eletromagnética que variava com a velocidade. Em 1901 Walter Kaufmann mediu e/m para raios beta com velocidades entre 0,8 e 0,9 c . Agora, havia um claro aumento de massa com a velocidade. (MARTINS, 2005a, p. 17)

Kaufmann ainda derivar uma equação para a variação da massa do elétron com a velocidade, porém a fórmula não concordava com os dados experimentais. Para resolver essa discrepância, Kaufmann postulou que $2/3$ da massa do elétron era de origem mecânica e o restante, de origem eletromagnética. No ano seguinte, 1902, Max Abraham criticou a análise de Kaufman, e usando argumentos sobre o momento do campo elétrico, obteve importantes resultados sobre a massa eletromagnética (MARTINS, 2005a, 2015). Abraham mostrou que o aumento da inércia dependia da direção da força, em relação ao vetor deslocamento da partícula. Assim, uma força transversal sofria uma resistência menor do que uma força longitudinal quando aplicada a uma carga elétrica (MARTINS,

2005a, 2015). Abraham denominou as massas associadas a estas forças de massa transversal e longitudinal, cujas equações são dadas por (MARTINS, 2005, p. 18)

$$m_{\parallel} = \frac{e^2}{8\epsilon_0 \pi R c^2} \frac{1}{\beta^2} \left[-\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right) + \frac{2}{1-\beta^2} \right] \quad m_{\perp} = \frac{e^2}{8\epsilon_0 \pi R c^2} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1+\beta}{2\beta} \ln \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right) - 1 \right]$$

onde β é razão v/c . A equação da massa longitudinal é a mesma obtida por Kaufmann a partir da energia do campo eletromagnético, então por que os resultados divergiam? Abraham observou que Kaufmann estava medindo a deflexão dos elétrons, por isso ele deveria ter usado a massa transversal.

Nos experimentos de Kaufmann, ele havia utilizado uma equação equivalente à da massa longitudinal, mas estava medindo a *deflexão* dos elétrons. Portanto, sua análise teórica dos experimentos estava errada. Ele deveria ter utilizado a massa transversal. Kaufmann reconheceu que estava enganado e, em 1902, publicou um novo artigo, com medidas adicionais que foram analisadas utilizando a teoria de Abraham. Agora, ele concluiu que havia uma boa concordância entre os dados experimentais e a fórmula da massa transversal e concluiu que toda a massa do elétron era puramente *eletromagnética*. (MARTINS, 2005a, p. 18)

Assim, no começo do século XX, existia uma dinâmica do elétron que impunha que as cargas não poderiam ser postas em velocidades iguais ou maiores que a velocidade da luz no vácuo. Além disso, já existiam formulações diferentes para a massa:

Note-se que, nos trabalhos desencadeados por J.J. Thomson em 1881, a massa eletromagnética era calculada a partir de considerações de energia cinética. Ou seja: tomava-se a equação $K = mv^2 / 2$ como sendo a relação fundamental a partir da qual se definia a massa eletromagnética. Pode-se chamar esse conceito de massa cinética. Posteriormente, na abordagem utilizada por Abraham, as massas eletromagnéticas (longitudinal e transversal) passam a ser calculadas a partir da relação vetorial $\vec{p} = m\vec{v}$, que é depois derivada em relação ao tempo para se obter as acelerações nos casos em que a força é paralela ou perpendicular ao movimento da partícula. Então, utilizando-se a relação $\vec{F} = m\vec{a}$, obtém-se as duas massas. Pode-se chamar esse conceito de massa acelerativa. (MARTINS, 2005a, p. 18)

O conceito de massa maupertuisiana também, já havia sido introduzido por Poincaré, em 1900, para a radiação eletromagnética (LANGEVIN, 1913b). Embora o modelo de Abraham estivesse em concordância com os dados de Kaufmann, ele não era a única possibilidade. Em seus cálculos, Abraham supôs que o elétron era uma esfera indeformável. Em 1904, Lorentz, em seu famoso *memoir*, utilizou o mesmo método de Abraham, mas supôs que os elétrons eram contraídos na direção longitudinal do

movimento. As equações obtidas por Lorentz para as massas longitudinais e transversais foram as seguintes (LORENTZ, 1904):

$$m_{\parallel} = \frac{e^2}{6\varepsilon_0 \pi R c^2} \frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \quad m_{\perp} = \frac{e^2}{6\varepsilon_0 \pi R c^2} \frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}}$$

Na hipótese de Lorentz, a contração do elétron era arbitrária, ou seja, o volume do elétron não era conservado. Neste mesmo ano, Alfred Bucherer (1863-1927) propôs um modelo isométrico para a variação de massa do elétron contraído.

Ou seja: o raio longitudinal do elétron contraído se tornaria $L = R(1 - v^2/c^2)^{1/3}$ e o seu raio transversal se tornaria $L' = R(1 - v^2/c^2)^{-1/6}$, onde R é o raio do elétron em repouso. A razão entre as duas dimensões obedeceria à equação de contração de Lorentz. Independentemente de Bucherer, a mesma teoria foi proposta, no ano seguinte, por Paul Langevin. (MARTINS, 2005a, p. 20)

Bucherer (em 1904) e Langevin (em 1905) obtiveram as seguintes equações para as massas do elétron (MARTINS, 2005a)

$$m_{\parallel} = \frac{e^2}{6\varepsilon_0 \pi R c^2} \frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{4/3}}, \quad m_{\perp} = \frac{e^2}{6\varepsilon_0 \pi R c^2} \frac{1}{(1 - v^2/c^2)^{1/3}}$$

Estes eram os três principais modelos para caracterizar a massa do elétron, porém, como observa Martins (2005a, p. 20), não eram os únicos:

Eram possíveis outros modelos diferentes desses. Todas as teorias acima referidas supunham que a carga do elétron estava espalhada sobre sua superfície; mas ela poderia estar distribuída em todo o seu volume. Além disso, podiam ser feitas outras hipóteses sobre a forma do elétron e sobre a distribuição de sua carga. Cada modelo levava a resultados diferentes para a relação entre massa e velocidade.

Embora as fórmulas de Abraham, Lorentz e Bucherer-Langevin fossem diferentes, todas convergiam para as medidas experimentais de primeira ordem em v/c . Em outras palavras, não havia como discernir experimentalmente sobre qual era o modelo mais satisfatório. Do ponto de vista teórico, havia um argumento que aparentemente favorecia o modelo de Abraham. Ele mostrou que a hipótese do elétron não contraído era a única que garantia a coesão da estrutura do elétron. Qualquer modelo de elétron contraído levava a um elétron instável (ABRAHAM, 1904, MILLER, 1997, DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005). A tabela abaixo, parcialmente reproduzida de Fadner (1988, p. 115), sintetiza o desenvolvimento da dinâmica do elétron entre 1885 e 1905.

Tabela 2. Uma história da relação massa-energia. Para esta tabela: μ = permeabilidade magnética, e = carga do elétron, a = raio de um objeto carregado, E = energia observada, v = velocidade observada, c = velocidade de luz, m_0 = massa de repouso, m_L = massa longitudinal de um objeto em movimento. Equações para a massa transversal não são dadas aqui (FADNER, 1988, p. 115).

Ano	Investigador	Resultados
1885	J. J. Thompson	Um condutor carregado em movimento aumenta sua massa em $\delta m^e = \frac{4}{15} \mu e^2 / a$
1889	O. Heaviside	Correção do aumento da massa para $\delta m^e = \frac{2}{3} \mu e^2 / a$
1900	H. Poincaré	A energia eletromagnética tem quantidade de movimento. Pode ser representado por um "fluido fictício" com densidade de massa: $\rho = J/c^2$ onde J é a densidade de energia.
1901, 1903	W. Kaufmann	Evidências experimentais de que a massa transversal do elétron aumenta com a velocidade.
1902	M. Abraham	Sugestão: a massa do elétron é puramente eletromagnética.
1903	M. Abraham	Equações da teoria de campo para a quantidade de aumento de massa com velocidade, com base em cargas esféricas rígidas. Em bom acordo com os dados de Kaufmann (agora sabemos que está incorreta).
1904	H. A. Lorentz	$m_L = m_0 (1 - v^2/c^2)^{-3/2}$ aumento de massa correto, a partir de transformações de Lorentz, baseado em cargas esféricas deformáveis.
1904	F. Soddy	Declaração verbal: A radioatividade ocorre às custas da massa do sistema.
1904, 1905	F. Hasenöhl	$\delta m^e = \frac{8}{3} E/c^2$ adição aparente à massa de um sistema termodinâmico devido à pressão de radiação interna. Corrigido, em 1905, para: $\frac{4}{3} E/c^2$
1905	A. Einstein	(a) $m_L = m_0 (1 - v^2/c^2)^{-3/2}$ (b) $\delta m = E/c^2$ A massa de um corpo diminui em L/c^2 se emitir energia L (para primeira ordem em v^2/c^2).
1906	H. Poincaré	Um elétron estável (deformável) requer forças suplementares não elétricas (tensões de Poincaré) para ser consistente com o princípio da relatividade.

E qual foi a posição de Poincaré diante a esses avanços? Poincaré não apresentou uma posição clara sobre estas descobertas até 1904. Em seus cursos de eletrodinâmica e telegrafia sem fio, Poincaré não menciona esses estudos sobre a massa do elétron. Ao que tudo indica, Poincaré parecia mais preocupado com significado ontológico do conceito de massa, como podemos ver em sua conferência de 1901, para o congresso internacional de filosofia. Durante essa conferência, Poincaré apresenta a seguinte conexão ativa: é possível medir a massa ou se trata apenas de uma convenção cômoda?

A aceleração de um corpo é igual à força que age sobre ele dividida por sua massa. Esta lei pode ser verificada por experiência? Se assim for, temos que medir as três grandezas mencionadas na enunciação:

aceleração, força e massa. Eu admito que a aceleração pode ser medida, porque eu passo por cima da dificuldade decorrente da medição do tempo. Mas como podemos medir força e massa? Nós nem sabemos o que são. O que é massa? Newton responde: "O produto do volume e da densidade". "Era melhor dizer", respondem Thomson e Tait, "essa densidade é o quociente da massa pelo volume". O que é força? "É", responde Lagrange, "aquilo que move ou tende a mover um corpo". "É", segundo Kirchhoff, "o produto da massa e da aceleração". Então por que não dizer que a massa é o quociente da força pela aceleração? Essas dificuldades são insuperáveis. (POINCARÉ, 1901a, p. 466)

Em *A Ciência e a Hipótese*, Poincaré introduz novamente este ensaio e complementa sua análise verificando o conceito de massa quando introduzido como uma propriedade dos corpos pesados. A conclusão de Poincaré é que ainda seria impossível estabelecer um conceito de massa (POINCARÉ, 1902a). Em 1904, na conferência de Saint Louis, Poincaré discute pela primeira vez a questão da massa dos elétrons poder variar com a velocidade e as consequências desse resultado na lei de Lavosier:

Esses raios podem ser desviados quer por um campo elétrico, quer por um campo magnético, e se pode, comparando esses desvios, medir ao mesmo tempo a velocidade dos elétrons e sua massa (ou antes, a razão de sua massa por sua carga). Mas quando se viu que essas velocidades se aproximavam da velocidade da luz, percebeu-se que uma correção era necessária. Essas moléculas, estando eletrizadas, não podem deslocar-se sem abalar o éter; para pô-las em movimento, é preciso vencer uma dupla inércia: a da própria molécula e a do éter. A massa total, ou aparente, que se mede compõe-se então de duas partes: a massa real, ou mecânica, da molécula e a massa eletrodinâmica que representa a inércia do éter. Os cálculos de Abraham e as experiências de Kauffman mostraram então que a massa mecânica propriamente dita é nula, e que a massa dos elétrons, ou ao menos dos elétrons negativos, é de origem exclusivamente eletrodinâmica. Isso nos força a mudar a definição de massa; não podemos mais distinguir a massa mecânica e a massa eletrodinâmica, porque então a primeira se dissiparia; não há outra massa a não ser a inércia eletrodinâmica; mas, nesse caso, a massa não pode mais ser constante, aumenta com a velocidade; e até mesmo depende da direção, e um corpo animado por uma velocidade notável não oporá a mesma inércia às forças que tendem a desviá-lo de sua rota e àquelas que tendem a acelerar ou a retardar sua marcha. Há ainda um recurso: os elementos últimos dos corpos são elétrons, uns carregados negativamente, outros carregados positivamente. Os elétrons negativos não têm massa, é verdade; mas os elétrons positivos, segundo o pouco que se sabe, parecem muito maiores. Talvez tenham, além de sua massa eletrodinâmica, uma verdadeira massa mecânica. A verdadeira massa de um corpo seria então a soma das massas mecânicas de seus elétrons positivos; os elétrons negativos não contariam; a massa assim definida poderia ainda ser constante. Que lástima! Também esse recurso nos escapa. Lembremo-nos do que dissemos a propósito do princípio de relatividade e dos esforços feitos para salvá-lo. E não é apenas um princípio que se trata de salvar, são os resultados indubitáveis das experiências de Michelson. Pois bem, tal como vimos acima, para explicar esses resultados Lorentz foi obrigado a supor que todas as

forças, qualquer que seja sua origem, eram reduzidas na mesma proporção num meio animado por uma translação uniforme; não é o bastante: não basta que isso ocorra com as forças reais, é preciso também que se dê o mesmo com as forças de inércia; é preciso, pois — diz ele —, que *as massas de todas as partículas sejam influenciadas por uma translação no mesmo grau que as massas eletromagnéticas dos elétrons*. Assim, as massas mecânicas devem variar segundo as mesmas leis que as massas eletrodinâmicas; portanto, não podem ser constantes (POINCARÉ, 1904a, p. 316).

Outra previsão de Poincaré, com base no estudo das propriedades dinâmicas do elétron, é que se confirmadas, seria necessário uma reformulação da mecânica.

De todos esses resultados, se fossem confirmados, proviria uma mecânica inteiramente nova, que seria sobretudo caracterizada pelo fato de que nenhuma velocidade poderia ultrapassar a da luz (pois os corpos oporiam uma inércia crescente às causas que tendessem a acelerar seu movimento; e essa inércia se tornaria infinita quando nos aproximássemos da velocidade da luz), assim como nenhuma temperatura pode cair abaixo do zero absoluto. (POINCARÉ, 1904a, p. 315).

Porém, a maior contribuição de Poincaré para a dinâmica do elétron, viria em seus artigos de 1905 e 1906, *Sur la dynamique de l'électron*. Nestes dois papers, que analisaremos com mais detalhes posteriormente, Poincaré mostrou, por meio de seu grupo de Lorentz, que o único modelo do elétron compatível com o princípio da relatividade era o modelo do elétron contraído de Lorentz. Poincaré sugeriu como solução do problema da estabilidade do elétron a existência de tensões internas sobre o elétron, que não eram de natureza eletrodinâmica. Essas tensões foram denominadas de tensões de Poincaré.

Neste artigo ele também soluciona uma conexão ativa que ele havia apresentado em sua conferência de 1904: “A massa tem dois aspectos: é ao mesmo tempo um coeficiente de inércia e uma massa atrativa que entra como fator na atração newtoniana. Se o coeficiente de inércia não é constante, a massa atrativa poderá sê-lo? Eis a questão”. (POINCARÉ, 1904a, p. 317). A resposta é negativa (conexão passiva). Em 1907, Planck demonstrou que o princípio da relatividade exige uma equivalência entre as massas. Neste mesmo ano Eotvös realizou experimentos precisos que estabeleciam a equivalência entre a massa inercial e a massa gravitacional (WHITTAKER, 1953).

4.2.2. A Relação Massa e Energia: Um Breve Histórico

Como vimos, Thomson em seu trabalho de 1881, comparou a massa eletromagnética de um elétron com a sua energia cinética, obteve que uma expressão para massa cinética do elétron à baixa velocidade. Do seu trabalho, levando em consideração

a fórmula de Maxwell para energia eletrostática, é fácil obter a seguinte relação entre massa e energia (MARTINS, 2005):

$$m_e = \frac{4}{3} \frac{W_e}{c^2}$$

O fator 4/3 não se trata de um erro na dedução. Ele está correto e é compensado com a introdução das tensões de Poincaré, levando a equação conhecida (MILLER, 1973, 1986, DARRIGOL, 1995, MARTINS, 2005):

$$m_e = \frac{W_e}{c^2}$$

Embora consideremos a relação-massa energia como um dos resultados fundamentais da relatividade, na época esse conceito não despertou atenção. Thomson não a deduziu em seu trabalho de 1881 e essa relação não voltaria aparecer antes de 1900, com uma importante publicação de Poincaré no jubileu de doutoramento de Lorentz (FADNER, 1988). Abordaremos um pouco mais frente em detalhes este trabalho de Poincaré, mas para essa contextualização importa dizer que a teoria de Lorentz violava a terceira lei de Newton e, por conseguinte, a conservação do momento. Lorentz não considerava o princípio da ação e reação um aspecto fundamental da física, por isso acreditava que não havia contradição entre sua teoria e essa violação. O argumento de Lorentz se baseava na ideia de que uma vez que as interações eletrodinâmicas não era instantâneas, mas mediadas pelos campos elétricos e magnéticos, o par ação e reação não ocorreriam simultaneamente e por isso, o princípio não poderia ser considerado como uma lei exata. (DARRIGOL, 1995)

Poincaré, por outro lado, achava o princípio da ação e reação fundamental e buscou formas de conciliar os dois (DARRIGOL, 1995). Uma solução era atribuir um estado de movimento ao éter. Se o éter pudesse carregar a quantidade de movimento que era destruída na interação dos corpos carregados, então a terceira lei de Newton era preservada. Tanto Lorentz como Poincaré consideravam essa ideia absurda. Lorentz afirmava que se fosse possível atribuir um estado de movimento ao éter, não seria possível explicar o resultado da experiência de Fizeau. Já Poincaré acreditava que somente movimentos relativos entre a matéria produziam resultados ponderáveis. (DARRIGOL, 1995).

No final de 1900, na comemoração dos 25 anos do doutoramento de Lorentz, Poincaré estudou o centro de gravidade em emissões eletromagnéticas usando a análise de Thomson sobre o momento eletromagnético. Poincaré concluiu que era possível

conciliar a terceira lei de Newton com a teoria de Lorentz assumindo que a radiação se comportasse como um fluido fictício com uma inércia dada por (POINCARÉ, 1900b):

$$m = \frac{E}{c^2}$$

A dedução de Poincaré envolve apenas considerações sobre o momento, por isso o que ele deduziu foi a massa maupertuisiana da luz (MARTINS, 2005a). Pelo fato de Poincaré ter sido o primeiro a deduzir a relação massa-energia para a luz, Langevin (1913b) denominou-a de massa maupertuisiana de Poincaré. Algo que pode chamar a atenção do leitor é que alguns autores e físicos afirmam que a massa não tem luz. Estaria, a análise de Poincaré, de alguma forma equivocada?

Atualmente dizemos que a luz não tem massa. É conveniente, portanto, esclarecer melhor esse ponto. A luz não possui massa de repouso. Ou seja: se fosse possível reduzir a velocidade da luz (no vácuo) e colocá-la em repouso, sua massa seria nula. Não é possível parar a luz, e pode-se perguntar que sentido tem, então, falar sobre tal massa de repouso. Suponhamos que temos um pulso de radiação, de energia E , se movendo na direção x , em um determinado referencial S . Agora, suponhamos que um outro referencial S' se move na mesma direção e sentido. Quanto maior a velocidade desse referencial S' em relação ao primeiro, menor será a energia E' da radiação em relação a ele, e menor será também sua massa (calculada pela equação $m' = E'/c^2$). Quando a velocidade desse referencial se aproxima de c , a massa do pulso de radiação tende a zero, em relação a ele. Não existe, portanto, contradição entre a ideia de que a massa de repouso da luz é nula, e a relação $m = E/c^2$ aplicada à luz. (MARTINS, 2005a, p. 19)

Em 1901, Pyotr Lebedew (1866-1912), Ernest Fox Nichols (1869-1924) e Gordon Ferrie Hull (1870-1956) demonstraram experimentalmente que quando a radiação é absorvida ou refletida por uma superfície, há uma pressão (MARTINS, 2005a, 2015). Esse fenômeno havia sido previsto por Maxwell em 1873 (MARTINS, 2005a, 2015). Essa confirmação, inspirou novos trabalhos sobre a pressão da luz. Max Abraham analisou a pressão exercida pela radiação em uma superfície espelhada em movimento e em um ângulo arbitrário. Em 1904, Abraham, Friedrich Hasenöhl (1874-1916) estudou a dinâmica de uma caixa oca com superfícies perfeitamente refletoras cheia de radiação (MARTINS, 2005a, 2015). Vejamos, qual foi a análise empregada por Hasenöhl:

Suponhamos uma caixa em forma de paralelepípedo, com arestas paralelas aos eixos x ; y ; z com superfícies internas perfeitamente refletoras, cheia de radiação. Se a caixa estiver em repouso, a radiação produzirá pressões iguais em todas suas faces. Suponhamos, agora, que a caixa que estava em repouso é acelerada paralelamente ao eixo x . A pressão da luz na superfície da parte de trás da caixa será maior do que quando ela estava em repouso, e na superfície na parte da frente da caixa será menor. O motivo é, basicamente, que a caixa aumenta de

velocidade entre os momentos em que a radiação é refletida na parede oposta e o momento em que atinge a superfície. Assim, a radiação produzirá uma força resultante contrária ao movimento da caixa. Portanto, para acelerar a caixa cheia de luz é necessária uma força maior do que para acelerar a mesma caixa sem radiação. Em outras palavras, a radiação aumenta a inércia da caixa. (MARTINS, 2005a, p. 19)

A partir desta análise, Hasenöhl foi capaz de derivar uma relação massa-energia e outros efeitos dinâmicos e termodinâmicos.

Hasenöhl também calculou a mudança da energia da radiação decorrente da aceleração da caixa. Ele provou que a radiação total seria uma função da velocidade da caixa. Portanto, quando a caixa é acelerada, uma parte do trabalho realizado pelas forças externas é transformado em energia adicional da radiação. Como a inércia da radiação é proporcional à sua energia, e como essa energia aumenta com a velocidade da caixa, a inércia total aumentará com a velocidade do sistema. Quando a velocidade da caixa tende a c , sua inércia tende a infinito. Se a temperatura interna da caixa aumentasse, a energia da radiação também aumentaria. Por isso, Hasenöhl concluiu que a massa de um corpo depende de sua energia cinética e de sua temperatura. (MARTINS, 2005a, p. 19)

A modelagem de Hasenöhl permitiu que ele deduzisse a seguinte relação para a massa-energia da caixa cheia de luz (FADNER, 1988):

$$\delta m = \frac{8}{3} \frac{E}{c^2}$$

Este resultado estava errado. Hasenöhl cometeu um erro de integração, obtendo o valor numérico incorreto (FADNER, 1988, MARTINS, 2015). Em 1905, Max Abraham usando considerações do momento, criticou o trabalho de Hasenöhl e mostrou que o valor correto do aumento da inércia da caixa era (MARTINS, 2015):

$$\delta m = \frac{4}{3} \frac{E}{c^2}$$

Em 1905, Hasenöhl reconheceu seu erro e realizou a integração correta obtendo o mesmo resultado de Abraham (FADNER, 1988, MARTINS, 2015). Embora, a análise de Abraham conduzisse a um resultado igual ao de Hasenöhl, tratavam-se de deduções de diferentes massas: “O que Abraham calculou foi a *massa maupertuisiana* da radiação dentro da caixa. O que Hasenöhl calculou foi a contribuição da radiação para a *massa acelerativa* do sistema.” (MARTINS, 2005a, p. 20)

Como observamos, o fator $4/3$ não é um erro de cálculo ou um problema da teoria. Esse é o resultado consistente com a teoria eletromagnética quando não consideramos a ação de forças não eletromagnéticas que foram descobertas por Henri Poincaré, em 1905. Convém observarmos que, em 1904, F. Sody observou que nos processos de emissão

radioativo deveria ocorrer variação da massa do isótopo (FADNER, 1988). A análise de Sody era apenas qualitativa, isto é, ele não derivou nenhuma equação que pudesse ser testada experimentalmente. Outro fato importante é que todas estas considerações eram feitas a partir da massa inercial, portanto não era possível concluir se uma caixa cheia de luz sofreria alterações em seu peso (MARTINS, 2015). A relação entre a energia e a massa gravitacional surgiria nos primeiros estudos da relatividade geral e seriam testados por Eotvös usando elementos radioativos e balanças de torção (LANGEVIN, 1913b).

4.2.3. O Paradoxo do Princípio da Reação na Teoria de Lorentz

No final do século XIX, o princípio da ação e reação era questionado por alguns físicos que atribuíam essa concepção como uma herança da eletrodinâmica de Weber que defendia ações a distância. Em geral, eram os pesquisadores alemães (ou influenciados por eles) que julgavam o princípio da ação e reação como uma lei fundamental. Poincaré, embora pertencesse a tradição de pesquisadores franceses, simpatiza com as ideias de Hertz e a necessidade de garantir a validade do princípio da ação e reação (harmonia das ilusões). Em suas aulas de eletrodinâmica na Souborne, em 1889, (publicadas no livro *Électricité et Optique*). Poincaré demonstrou que a teoria de Hertz era compatível com o princípio da ação e reação e o princípio da conservação da eletricidade e do magnetismo, este último princípio criaria dificuldades que não permitiam explicar os resultados da experiência de Fizeau, exatamente como acontece na eletrodinâmica de Hertz. Caso se desenvolvesse uma eletrodinâmica consistente com a experiência de Fizeau seria impossível garantir o princípio da conservação da eletricidade e do magnetismo, tal era o caso da eletrodinâmica de Helmholtz e Reiff. (DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005).

Em 1892, Lorentz escreveu "*La theorie electromagnetique de Maxwell et son application aux corps mouvants*," um paper onde discutia modificações na eletrodinâmica para explicar os resultados negativos da experiência de Michelson-Morley. Em 1893, Larmor publicou um importante paper, intitulado "*Dynamical theory of the electric and luminiferous medium*", onde apresentava sua teoria eletrodinâmica, que em muito se assemelhava ao modelo de Lorentz. Em 1895, Lorentz apresentou um trabalho mais maduro sobre a sua eletrodinâmica, "*Versuch eine Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*" onde ele apresentou a forma aproximada de suas transformações de Lorentz e explicou os resultados negativos da experiência de

Michelson-Morley para efeitos de primeira ordem. Neste mesmo ano, Poincaré publicou um artigo chamado *À propos de la théorie de M. Larmor*” onde ele discutiu a teoria de Larmor de 1893 e mostrou que ela era incompatível com o princípio da ação e reação. Neste trabalho Poincaré ainda afirma que uma eletrodinâmica deve atender três parâmetros (POINCARÉ, 1895):

- 1) Descreva o coeficiente de Arrastamento de Fizeau;
- 2) Garanta a conservação da energia elétrica e magnética;
- 3) Garanta a validade do princípio da igualdade da ação e reação.

Haveria uma teoria que fosse consistente, ao mesmo tempo com estes três princípios?

Entre as mais recentes teorias, a teoria de Helmholtz-Reiff violava (ii); as teorias de Lorentz e Larmor satisfazem (i) e (ii) mas não (iii); a teoria de Hertz satisfaz (ii) e (iii) mas não (i). Poincaré provou que a teoria de Hertz era a única teoria que satisfazia (ii) e (iii) para matéria macroscópica. Mais precisamente, ele mostrou que os termos lineares adicionais nas equações de Hertz necessariamente desapareceriam se ambas as condições mais a conservação de energia fossem atendidas. A prova inquestionável deixou Poincaré com um grande dilema: *as três condições básicas não eram compatíveis*. (DARRIGOL, 1995, p. 21)

Mas o que, mais precisamente, tornava a teoria de Lorentz incompatível com o princípio da ação e reação?

Lorentz havia construído essa violação em sua teoria, já que o éter agia sobre os corpos, mas não vice-versa. Em sua publicação de 1895, Lorentz havia se esquivado dessa questão afirmando que o princípio de ação e reação de Newton não precisa ser universalmente válido. O princípio de ação e reação de Newton, no entanto, estava no nível mais alto da visão hierárquica de Poincaré sobre uma teoria científica porque sua generalidade impedia sua desconfirmação experimental. (MILLER, 1997, p. 53).

Como Poincaré havia provado que nenhuma modificação poderia ser feita na teoria de Hertz e Helmholtz-Reiff que garantisse que as três condições fossem satisfeitas, por isso para garantir a harmonia das ilusões, talvez fosse possível modificar a teoria de Lorentz. Essa esperança justifica Poincaré ter declarado que a teoria de Lorentz era a menos defeituosa (POINCARÉ, 1895). De fato, uma solução bastante simples seria atribuir momento e inércia ao éter. Essa era uma ideia compartilhada por físicos britânicos, pois como o éter pode portar energia, não seria absurdo que ele carregasse momento e tivesse uma inércia (DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005).

Qual era opinião de Lorentz e Poincaré sobre essa solução? Lorentz julgava essa hipótese absurda, como ele declarou de forma veemente a Poincaré em uma carta de

janeiro de 1901. Para Lorentz, o éter estava em repouso absoluto, portanto era completamente sem sentido atribuir um estado de movimento à ele (LORENTZ, 1901). Poincaré também descartava essa hipótese por assumir uma posição cética em relação a existência do éter (DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005). Diferente da maioria dos físicos da época, incluído Lorentz, Poincaré achava que o éter era um conceito metafísico e que seria gradativamente expurgado da física²⁵ (DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005). Para Poincaré não se deveriam atribuir efeitos da matéria ponderável ao éter, somente interessava a interação entre corpos materiais (POINCARÉ, 1895). Diferente de Poincaré, que preserva a harmonia das ilusões sobre a terceira lei de Newton, Lorentz não se importava em abandonar o princípio da ação e reação, por isso a questão nunca foi centro de suas discussões. Já Poincaré passaria os próximos anos buscando modificações que satisfizessem o princípio da ação e reação. Em 1900, Poincaré estava muito mais animado com a teoria de Lorentz, no congresso internacional de física em Paris, ele anunciou que a teoria de Lorentz era de todas a mais satisfatória (POINCARÉ, 1900b). Segundo Miller (1997) a mudança de ânimo de Poincaré se deu porque ele havia conseguido tornar a teoria de Lorentz compatível com princípio da ação e reação sem atribuir propriedades ponderáveis ou um estado de movimento ao éter.

4.2.4. Versão Simplificada da Análise de Poincaré

Antes de discutirmos o trabalho de Poincaré “*La théorie de Lorentz et le principe de réaction*”, vamos apresentar uma versão simplificada da dedução da relação massa-energia proposta por Poincaré, que é apresentada por Martins (2015, p.140-141) e Logunov (2004, p. 118). Trata-se de uma dedução didática, que visa esclarecer qual era o significado físico do trabalho de Poincaré, em 1900. Portanto, essa sessão introduz propositalmente um anacronismo para tornar mais claro ao leitor o que significava a relação massa-energia em 1900. Inicialmente, iremos assumir a hipótese de Maxwell que a luz capaz de realizar pressão sobre corpos refletores e absorvedores²⁶. Poincaré observou que a Teoria de Lorentz violava a conservação do momento e a terceira lei de Newton. Para conseguir fazer a conciliação entre as duas teorias, Poincaré assumiu que a luz poderia se comportar como um fluído fictício portando momento. Usando a equação

²⁵ Entre os físicos que descartavam a existência do éter podemos citar Alfred Bucherer, Emil Cohen e Heinrich Hertz.

²⁶ Recordemos que em 1900, a existência dessas pressões ainda não havia sido observada experimentalmente.

de J. J. Thomson para densidade de momento, podemos expressar a densidade de momento $\vec{g}$ para um feixe de luz em função do vetor fluxo de energia $\vec{S}$:

$$\vec{g} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta V} = \frac{\vec{S}}{c^2}$$

Como dissemos, Poincaré interpretou essa equação associando a radiação um fluido fictício com uma densidade de massa ρ . Assim, a equação pode ser reescrita como:

$$\vec{g} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta V} = \frac{\vec{v} \Delta m}{\Delta V} = \rho \vec{v}$$

Nesta equação $\vec{v}$ é o vetor velocidade da luz. Tomando a forma escalar dessa equação, temos:

$$g = S/c^2 = \rho c$$

O fluxo de energia S do fluido fictício associado um feixe luminoso se relaciona com a densidade de energia ε por meio da seguinte equação:

$$S = \varepsilon c$$

Substituindo essa relação de S na equação escalar da densidade do momento,

$$\varepsilon/c = \rho c$$

E isolando a densidade ρ do fluido fictício, resulta em:

$$\rho = \varepsilon/c^2$$

Que é o resultado, obtido por Poincaré, em seu *memoir* de 1900. Multiplicando os dois lados da equação por ΔV , obtemos a relação massa-energia:

$$\Delta m = \rho \Delta V = \frac{\varepsilon \Delta V}{c^2} = \frac{\Delta E}{c^2}$$

Um argumento em favor a originalidade de Einstein seria dizer que Poincaré não deduziu a relação massa-energia de forma explícita. Contudo esse argumento é falho sobre um aspecto: Einstein também não fez a dedução explícita dessa equação em seu *paper* de 1905. Também podemos deduzir essa relação considerando a pressão exercida pela luz sobre uma superfície A , de forma semelhante à realizada por Abraham. Mostraremos também essa dedução, usaremos como referência Martins (2012, p, 118-120). Segundo Maxwell, a radiação pode exercer uma pressão sobre uma superfície arbitrária de A . De acordo com a mecânica clássica, a pressão de um corpo é definida pela razão da intensidade da força exercida sobre um corpo pela área de contato. Assim, podemos exprimir a força como a pressão aplicada sobre uma determinada área.

$$F = P \cdot A$$

Essa pressão deve ser igual a densidade de energia transportada pela radiação que interage com a superfície.

$$P = \varepsilon = \frac{\Delta E}{\Delta V}$$

Consideremos uma porção de radiação eletromagnética incidindo perpendicularmente a superfície A e que ocupa um volume $\Delta V = A \cdot \Delta L$. Para prosseguirmos, devemos assumir, como Poincaré, que a conservação do momento e a terceira lei de Newton são garantidos na eletrodinâmica. Por esta razão, assumiremos que o momento associado à radiação antes da absorção é igual ao momento da radiação emitida, desta forma, assumindo a validade desses princípios, convém expressar a força como a variação do momento linear.

$$\Delta p = F \Delta t$$

O tempo necessário para que a radiação seja absorvida pela superfície A é:

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{c}$$

Substituindo o comprimento por meio da equação do volume ocupado pela radiação eletromagnética, obtemos a seguinte equação para o tempo decorrido:

$$\Delta t = \frac{\Delta V}{A \cdot c}$$

Substituindo o tempo decorrido e a força na equação do momento,

$$\Delta p = (P \cdot A) \frac{\Delta V}{A \cdot c}$$

Simplificando as áreas A , e substituindo a pressão pela expressão da densidade de energia da radiação eletromagnética, obtemos a seguinte equação:

$$\Delta p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta V} \right) \frac{\Delta V}{c}$$

Simplificando, obtemos a equação do momento para a radiação eletromagnética.

$$\Delta p = \frac{\Delta E}{c}$$

Poincaré também obteve uma equação semelhante em seu *memoir* de 1900, para o fluido fictício associado à radiação eletromagnética. Uma vez que massa maupertusiana é definida como a razão do momento pela velocidade do corpo:

$$\Delta m = \frac{\Delta p}{v}$$

Portanto, a massa maupertuisiana associada à radiação eletromagnética, ou ao fluido fictício, que se desloca na velocidade da luz, será dada por:

$$\Delta m = \frac{\Delta p}{c}$$

Substituindo a expressão do momento da radiação nessa última equação,

$$\Delta m = \left(\frac{\Delta E}{c} \right) \frac{1}{c}$$

Que nos conduz a relação massa energia:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$$

Observe que em nossas duas deduções partimos de considerações do momento, portanto a massa associada à luz é uma massa maupertuisiana de Poincaré (para adotarmos a nomenclatura proposta por Langevin). Uma vez que a luz (ou qualquer radiação eletromagnética) no vácuo não pode ser acelerada, portanto não podemos associar uma massa acelerativa à luz. É também possível associar uma massa cinética e derivar a relação massa e energia. Esse é um caso um pouco mais trabalhoso ao qual remetemos o leitor interessado ao capítulo 5, sessão 8, do livro Teoria da Relatividade Especial (MARTINS, 2012). Por derradeiro, observarmos que em nenhuma das deduções usamos a massa de repouso ou a massa gravitacional, portanto não podemos fazer qualquer afirmação sobre a massa de repouso ou peso da luz.

4.2.5. O Princípio da Reação na Teoria de Lorentz

Os dois trabalhos mais importantes de Poincaré sobre as propriedades dinâmicas da luz e do elétron foram seus memoirs de 1900, “*Le principe de reaction et le theorie de Lorentz*”, e de 1905-1906, “*Sur la dynamique de l’électron*”. Nesta sessão analisaremos o argumento original de Poincaré em seu trabalho de 1900. Antes de começarmos analisar, precisamos fazer algumas observações sobre a notação empregada por Poincaré. A primeira delas é que Poincaré usa a mesma notação para derivadas parciais e derivadas ordinárias, como exemplificamos nas equações abaixo:

$$\frac{\partial f(u, v)}{\partial u} \equiv \frac{d}{du} f(u, v)$$

A segunda observação é que Poincaré exprime as equações de Maxwell em notação cartesiana:

$$\nabla \times \vec{F} \equiv \begin{bmatrix} \frac{dF_z}{dy} - \frac{dF_y}{dz} \\ \frac{dF_x}{dz} - \frac{dF_z}{dx} \\ \frac{dF_y}{dx} - \frac{dF_x}{dy} \end{bmatrix}$$

A última observação é sobre a notação que Poincaré emprega para se referir as quantidades de físicas. Schwartz (1971) produziu um pequeno dicionário de símbolos para o artigo *Sur la dynamique de l'électron*, mas que também é válido para este artigo.

Tabela 3. Dicionário de notação (SCHWARTZ, 1971, p. 1289)²⁷

Quantidade	Notação de Poincaré	Notação Contemporânea
Campo Elétrico	(f, g, h)	E
Campo Magnético	(α, β, γ)	B
Potencial Escalar	ψ	ϕ
Potencial Vetor	(F, G, H)	A
Densidade de Corrente Elétrica Total	(u, v, w)	J

Poincaré inicia seu artigo com uma mea-culpa, por estar supostamente reavivando críticas a teoria de Lorentz em seu jubileu de doutorado:

Sem dúvida, parece estranho que, em um monumento elevado à glória de Lorentz, eu discutir as considerações que eu apresentei anteriormente como uma objeção à sua teoria. Eu poderia dizer que as páginas que se seguem são mais da natureza de uma atenuação e não uma ampliação dessa objeção. Mas desprezo essa desculpa, porque tenho uma que é 100 vezes melhor: *boas teorias são flexíveis*. Aquelas que têm uma forma rígida e que não podem mudar essa forma sem colapsar realmente têm pouca vitalidade. Mas se uma teoria é sólida, então ela pode ser lançada em diversas formas, ela resiste a todos os ataques e seu significado essencial não é afetado. Foi o que eu discuti no último Congresso de Física. Boas teorias podem responder a todas as objeções. Os argumentos específicos não têm efeito sobre eles, e também triunfam sobre todas as objeções sérias. No entanto, ao triunfar, elas podem ser transformadas. As objeções a elas, portanto, longe de

²⁷ Este artigo do Schwartz também foi publicado no livro organizado por Hsu & Zang (2001), *Lorentz and Poincaré Invariance*. O livro *Henri Poincaré and Relativity Theory*, de A. Logunov (2004), apresenta uma tradução parcial e com as equações modernizadas desse memoir.

aniquilá-las, realmente as servem, pois permitem que tais teorias desenvolvam todas as virtudes que estavam latentes nelas. A teoria de Lorentz é uma dessas, e essa é a única desculpa que invocarei. Portanto, não é por isso que imploro o perdão do leitor, mas sim por ter apresentado tão poucas novidades. (POINCARÉ, 1900b, p. 251)

Inicialmente, Poincaré analisa a incompatibilidade entre a teoria de Lorentz e o princípio da ação e reação. Poincaré inicia sua análise estudando a interação de um elétron em um pequeno elemento de $d\tau$ e procura determinar a ação de todas as forças ponderáveis sobre os elementos de superfície $d\omega$. Decompondo todas estas forças e levando em consideração as pressões de Maxwell, Poincaré (1900b, p. 256) obtém a seguinte expressão:

$$\int \frac{dJ}{dt} d\tau = \int \frac{d\omega}{K_0} \begin{vmatrix} l & m & n \\ \alpha & \beta & \gamma \\ f & g & h \end{vmatrix} + \frac{4\pi}{K_0} \int \rho d\tau \sum f\xi$$

onde (l, m, n) são as coordenadas do vetor normal da superfície de contato onde a força é aplicada.

A partir dessa equação, Poincaré introduz o seu conceito de fluido fictício, como segue:

A primeira integral no lado direito representa, como sabemos, a quantidade de energia eletromagnética que entra no volume em consideração através da radiação que passa pela superfície e o segundo termo representa a quantidade de energia eletromagnética que é criada dentro do volume por transformação de outras formas de energia. Podemos considerar a energia eletromagnética como um fluido fictício de que a densidade é $K_0 J$ e que viaja através do espaço de acordo com a lei de Poynting. Precisamos apenas perceber que o fluido não é indestrutível e, no elemento de volume $d\tau$, durante uma unidade de tempo, uma quantidade $\frac{4\pi}{K_0} \int \rho d\tau \sum f\xi$ é destruída (ou, se o sinal for negativo, uma quantidade idêntica, mas com sinal oposto é criada). Essa é a razão que nos impede de considerar nosso fluido fictício como uma espécie de fluido "real". (POINCARÉ, 1900b, p. 256)

Agora Poincaré, começa analisar o movimento do centro de gravidade do fluido fictício. Como ele mesmo observa, se o momento linear for constante, então o centro de gravidade deve percorrer uma trajetória retilínea e uniforme. Contudo como o fluido fictício é criado e destruído em processos de transformação de energia, essa hipótese não pode ser assumida como verdadeira. Assim Poincaré passa a estudar o movimento do centro de gravidade do fluido fictício. Após escrever as equações e realizar a análise das integrais Poincaré, escreve:

Usaremos M_0 para representar a massa total da substância, usaremos X_0, Y_0, Z_0 para designar coordenadas de seu centro de gravidade, usaremos M_1 para representar a massa total do fluido fictício, usaremos X_1, Y_1, Z_1 para designar as coordenadas de seu centro de gravidade, usaremos M_2 para a massa total do sistema (matéria mais fluido fictício), X_2, Y_2, Z_2 para designar o seu centro de gravidade. (POINCARÉ, 1900b, p. 257-258)

E apresenta as seguintes equações:

$$M_2 = M_0 + M_1 \quad M_2 X_2 = M_0 X_0 + M_1 X_1$$

$$\frac{d}{dt}(M_0 X_0) = \sum M V_x \quad K_0 \int x J d\tau = M_1 X_1$$

E a seguinte equação para o deslocamento do centro de massa do fluido fictício.

$$\frac{d}{dt}(M_2 X_2) = C - 4\pi \int \rho x d\tau \sum f \xi$$

Sobre esta equação, Poincaré obtém as seguintes conclusões:

Se a energia eletromagnética não for criada nem destruída em qualquer lugar, o último termo desaparecerá; Então, o centro de gravidade do sistema que consiste na substância e na energia (considerado fluido fictício) tem movimento linear e uniforme. Suponhamos, agora, que em certos locais, há destruição de energia eletromagnética, que se transforma em energia não elétrica. Devemos, então, considerar o sistema formado não apenas pela substância e energia eletromagnética, mas também pela energia não elétrica que resulta da transformação da energia eletromagnética. Mas devemos assumir que a energia não elétrica permanece no ponto em que ocorre a transformação e não é subsequentemente carregada com o assunto nesse local. Não há nada nesta convenção que, mas devemos assumir que a energia não elétrica permanece no ponto em que a transformação ocorre e não é subsequentemente carregada com o assunto nesse local. Não há nada nesta convenção que deveria nos chocar, pois estamos apenas discutindo uma ficção matemática. Se alguém adotar essa convenção, o movimento do centro de gravidade do sistema permanecerá linear e uniforme. Para estender esta afirmação ao caso em que não há apenas destruição, mas também criação de energia, basta supor que em cada ponto há uma certa quantidade de energia não elétrica, a partir da qual é formada a energia eletromagnética. Seguem-se então a convenção precedente, que é dizer que, no lugar de assumir que a energia não elétrica é co-localizada com a substância ordinária, consideramos isso como imobilizado. Dada essa condição, o centro de gravidade ainda se move em linha reta. (POINCARÉ, 1900b, p. 258)

E depois de discutir o movimento do centro de gravidade, Poincaré estabelece a conservação do momento ao associar uma inércia ao fluido fictício:

Para definir a inércia desse fluido fictício, devemos assumir que o fluido que é criado em qualquer ponto por transformação de energia não elétrica é criado sem velocidade e que obtém sua velocidade do fluido que já existe. Se, portanto, a quantidade de fluido aumentar, mas a velocidade permanece constante, devemos ter uma certa inércia a superar, uma vez que o novo fluido "empresta" a sua velocidade do

fluido antigo. A velocidade do sistema diminuirá se alguma causa não intervir para mantê-la constante. Da mesma forma, quando há destruição de energia eletromagnética, o líquido que é destruído deve perder sua velocidade antes da sua destruição, desistindo do fluido restante. (POINCARÉ, 1900b, p. 259)

E, após discutir a conservação do momento, Poincaré estabelece pela primeira vez que a relação massa-energia, isto é, que a energia eletromagnética apresenta uma inércia.

Portanto, do nosso ponto de vista, uma vez que a energia eletromagnética se comporta como um fluido que tem inércia, devemos concluir que, se algum tipo de dispositivo produz energia eletromagnética e a irradia em uma determinada direção, esse dispositivo deve recuar exatamente como um canhão faz quando dispara um projétil. Claro, esse recuo não ocorrerá se o dispositivo emitir energia igualmente em todas as direções; Isso só ocorrerá se a emissão for assimétrica e se a energia eletromagnética for emitida em uma única direção, como acontece, por exemplo, se o dispositivo for um excitador hertziano colocado no foco de um espelho parabólico. (POINCARÉ, 1900b, p. 260)

Para entendermos o argumento como Poincaré estabeleceu a relação massa-energia, nós devemos avaliar a seguinte integral (POINCARÉ, 1900b):

$$K_0 \int x J d\tau = M_1 X_1$$

Em notação moderna e levando em consideração o valor da velocidade da luz, a integral seria escrita da seguinte forma:

$$\int \vec{x} \frac{J}{c^2} dV = M_1 \vec{R}_1$$

Aqui aparece de forma explícita a razão entre a densidade de energia J e o quadrado da velocidade da luz no vácuo. Embora Poincaré não desenvolva explicitamente o raciocínio a seguir, é fácil obter a relação massa-energia. Uma vez que J é igual a razão entre a variação de energia dE e a variação de volume dV , então a integral pode ser reescrita como:

$$\int \vec{x} \frac{1}{c^2} \left(\frac{dE}{dV} \right) dV = M_1 \vec{R}_1$$

Pelo cálculo ordinário, a integral se torna:

$$\int \vec{x} \frac{dE}{c^2} = M_1 \vec{R}_1$$

A análise dimensional, mostra que a razão dE/c^2 deve corresponder a variação da massa do fluido fictício dM_I . Portanto, podemos concluir que o fluido fictício associado a radiação eletromagnética apresenta uma inércia dada por:

$$M_1 = \frac{E}{c^2}$$

Embora Poincaré não apresente esse resultado explicitamente, ele estava ciente. Isso fica claro, pois logo após afirmar que a energia eletromagnética apresenta uma inércia e conserva o momento, Poincaré propõe um exercício quantitativo.

É fácil avaliar esse recuo quantitativamente. Se o dispositivo tiver uma massa de 1 kg e se ele emitir três milhões de joules em uma direção com a velocidade da luz, a velocidade do recuo é de 1 cm / seg. Em outros termos, se a energia produzida por uma máquina de 3.000 watts for emitida em uma única direção, é necessária uma força de um dine para manter a máquina em prática apesar do recuo. É evidente que essa força fraca não pôde ser detectada em nossa experiência. Mas podemos imaginar que, impossivelmente, temos dispositivos de medição tão sensíveis que podemos medir essas forças. Poderíamos então demonstrar que o princípio da reação é aplicável não apenas à substância; E isso seria confirmação da teoria de Lorentz, e a queda de algumas outras teorias. (POINCARÉ, 1900b, p. 260)

Esse cálculo é realizado de forma bastante pormenorizada pelo matemático H. Ives (1952). Aqui apresentaremos uma versão sintetizada, um pouco diferente do detalhamento feito por Ives (e também mais simples). Pela conservação do momento, o recuo do dispositivo de massa M deve ser igual ao momento da energia eletromagnética que se propaga na velocidade da luz:

$$Mv = M_1 c$$

Utilizando a relação massa-energia,

$$Mv = \left(\frac{E}{c^2} \right) c$$

$$v = \frac{E}{M \cdot c}$$

Os dados fornecidos por Poincaré para o cálculo são:

$$\begin{cases} M = 10^3 \text{ gramas} \\ E = 3 \times 10^6 \text{ joules} = 3 \times 10^{13} \text{ ergs} \\ c = 3 \times 10^{10} \text{ cm por segundo,} \end{cases}$$

Substituindo estes valores na equação da velocidade de recuo, obtemos:

$$v = \frac{3 \times 10^{13}}{10^3 \times 3 \times 10^{10}} = 1 \text{ cm/seg,}$$

que é o resultado declarado por Poincaré. Poincaré discorre que esse recuo previsto na teoria de Lorentz também era previsto na Teoria de Hertz. Portanto, é preciso investigar

as duas teorias mais afundo. Poincaré começa examinando o princípio da ação e reação para dielétricos. Ele escreve:

Na teoria de Lorentz, quando o ar recebe a energia irradiada, não resulta em nenhuma ação mecânica; ele também não é afetado quando a energia sai depois de atravessá-lo. Em contraste, na teoria de Hertz, quando o ar recebe a energia, ela é empurrada para frente e recua quando a energia a deixa. Os movimentos do ar atravessados pela energia compensam assim, do ponto de vista do princípio da reação, os movimentos do dispositivo que produziu a energia. Na teoria de Lorentz, essa compensação não acontece. (POINCARÉ, 1900b, p. 261)

Inicialmente Poincaré analisa a influência criação e a destruição de um fluido fictício no momento total dentro da teoria de Lorentz. De suas considerações matemáticas e física, Poincaré chega a seguinte integral:

$$\sum MV_x + \int (\Delta W_x + K_0 J' U'_x) d\tau = const.$$

onde Δ é a densidade do material dielétrico e W_x é a velocidade do dielétrico na direção x. Segundo Poincaré, esta integral deve ser interpretada da seguinte maneira:

Se um dispositivo irradia energia em uma única direção no vácuo, ele sofre um recuo que, do ponto de vista do princípio da reação, é compensado apenas pelo movimento do fluido fictício. Mas se, em vez disso, a radiação ocorrer em um dielétrico, o recuo será compensado em parte pelo movimento do fluido fictício e em parte pelo movimento do material dielétrico, e a fração do recuo do dispositivo que será assim compensada pelo movimento do dielétrico. (POINCARÉ, 1900b, p. 266)

À seguir, Poincaré passa a revisar a teoria de Hertz. Ele mostra que a teoria de Hertz está incorreta, pois ela prevê um arrastamento total do éter na experiência de Fizeau, sendo que o experimento indica um arrastamento parcial.

Portanto, na teoria de Hertz, a velocidade de arrasto será V , o que equivale a dizer que o arrasto será completo. Essa consequência, que é contrária ao resultado de Fizeau, é suficiente para condenar a teoria de Hertz, de modo que a consideramos pouco mais que uma curiosidade. (POINCARÉ, 1900b, p. 268)

Por outro lado, enquanto, aparentemente, a teoria de Lorentz, viola o princípio da ação e reação, na teoria de Hertz, ocorre uma compensação que se aplica somente à matéria. Deste modo Poincaré chega à seguinte conclusão:

Para demonstrar experimentalmente que o princípio da reação é realmente violado na realidade, como é na teoria de Lorentz, não é suficiente mostrar que o dispositivo que produz a energia recua, o que já seria muito difícil, é necessário mostrar também que o recuo não é compensado pelo movimento do dielétrico e, em particular, pelo movimento do ar atravessado pelas ondas eletromagnéticas. Isso claramente seria ainda muito mais difícil. (POINCARÉ, 1900b, p. 269)

Contudo, Poincaré descobre um argumento teórico bastante forte em defesa do princípio da ação e da reação: ela é uma consequência direta do princípio da relatividade e da conservação da energia. Esta discussão constitui a terceira parte da comunicação de Poincaré. Como observamos anteriormente, é nesta sessão que Poincaré interpreta o tempo local de Lorentz como o tempo registrado por estações móveis que tentam sincronizar seus relógios usando sinais luminosos, discute o significado da contração longitudinal dos corpos materiais e apresenta pela primeira vez o seu princípio da relatividade. Por meio desta análise de Poincaré consegue responder a seguinte questão: como a teoria de Lorentz pode violar o princípio da ação e reação, se este princípio é uma consequência direta da conservação de energia e do princípio da relatividade?

Se, portanto, na teoria de Lorentz, o recuo pode ocorrer sem violar o princípio da energia, é porque a energia aparente medida por um observador transportado junto com os eixos móveis não é igual à energia real. Vamos supor, então, que o nosso excitador recua e que o observador é levado junto com esse movimento ($v' = v < 0$). O excitador pareceria imóvel àquele observador e, para ele, pareceria que a energia irradiada era igual à energia irradiada por um excitador em repouso. Mas, na realidade, irradiava menos, e essa diferença é o que compensa o trabalho de recuo. (POINCARÉ, 1900b, p. 277)

Durante sua análise, Poincaré descobre que esta diferença de energia (e por conseguinte, a violação do princípio da ação e reação) ocorre devido à necessidade de se levar em consideração a existência de forças complementares e que o recuo não se aplica somente a matéria, mas também a radiação eletromagnética.

A existência da força complementar aparente é, portanto, uma consequência necessária do fenômeno do recuo. Assim, de acordo com a teoria de Lorentz, o princípio da reação não deve se aplicar apenas à matéria; o princípio do movimento relativo também não deve se aplicar somente à matéria. É importante notar que existe uma conexão íntima e necessária entre esses dois fatos. (POINCARÉ, 1900b, p. 278)

Neste trabalho, Poincaré não teceu considerações mais detalhadas sobre estas forças. De fato, isso só ocorreria cinco anos depois, quando Poincaré relacionaria estas forças complementares com as forças não-elétricas de estabilidade do elétron: as Tensões de Poincaré. Em 20 de Janeiro de 1901, Lorentz escreveu uma carta saudando Poincaré e elogiando a sua análise. Porém Lorentz se mostrava bastante cético.

Devo confessar que é impossível para eu modificar a teoria de tal forma que a dificuldade que você aponta desaparece. Parece-me muito improvável que tenha sucesso; Creio que sim - e este é também o resultado para o qual as suas observações são atendidas - que a violação do princípio da reação é necessária em todas as teorias que podem explicar a experiência de Fizeau. Mas nós realmente nos importamos?

Há certa conexão entre suas considerações e uma questão levantada, como você sabe, por Helmholtz em uma de suas últimas memórias. Na verdade, suas fórmulas mostram que o éter contido em uma superfície fechada não estará em equilíbrio sob a influência das pressões de Maxwell exercidas nesta superfície, já que o vetor Poynting é uma função do tempo. Por isso Helmholtz conclui que o éter será posto em movimento nesse caso pretende estabelecer as equações que determinam este movimento. Eu prefiro ver de outro modo. Tendo sempre em vista os fenômenos de aberração, admito que o Éter está absolutamente imóvel - quero dizer seus elementos de volume não se movem, embora possam ser o local de certos movimentos internos. Agora, se um corpo nunca se move, não há razão para se falar das forças exercidas sobre esse corpo. Por isso fui levado a não falar mais de forças que atuam sobre o éter. (LORENTZ, 1901)

Embora Poincaré também não atribuísse efeitos ponderáveis ao éter, Lorentz critica a modelagem de Poincaré, pois ele atribui um momento a radiação eletromagnética. Para Lorentz, uma vez os campos eletromagnéticos são fenômenos associados ao éter, atribuir um momento a radiação, poderia levar à conclusão que o éter também tem um momento e, portanto, um estado de movimento (DARRIGOL, 1995). Essa é uma das principais razões para Lorentz não aceitar as modificações propostas de Poincaré e minimizar o princípio da ação e reação.

Eu digo que o éter atua nos elétrons, mas não digo que experimente uma reação do seu lado; eu, portanto, nego o princípio da reação nessas ações elementares. Nesse sentido, não posso falar de uma força exercida por uma parte do éter em outros corpos; as pressões de Maxwell não têm mais existência real, e são apenas ficções matemáticas, que servem para calcular de forma simples a força que atua sobre um corpo ponderável. Obviamente, não tenho mais que me preocupar que as pressões que atuem na superfície de uma porção limitada do éter que não estejam em equilíbrio. Quanto ao princípio da reação, não me parece que deve ser considerado como um princípio fundamental da física. É verdade que, em todos os casos em que um corpo adquire certa quantidade de movimento "p", nossa mente não ficará satisfeita desde que não possamos indicar uma mudança simultânea em algum outro corpo e que em todos os fenômenos em que o éter não intervém, a alteração consiste na aquisição de uma quantidade de movimento "-p". Mas eu acredito que alguém poderia estar igualmente satisfeito se essa mudança simultânea não fosse à produção de um movimento. (LORENTZ, 1901)

Por fim, Lorentz especula sobre hipótese proposta por Larmor de que a matéria poderia ser efeito da condensação do éter, e como ela poderia solucionar o problema da ação-reação em sua teoria:

Como as quantidades dependentes do éter são essencialmente "equivalentes" a uma quantidade de movimento. Seu teorema nos dá, para cada modificação da quantidade de movimento da matéria ponderável, uma modificação simultânea dessa quantidade equivalente; eu acho que podemos estar satisfeitos com isso. Não pretendo fingir que

essa visão é tão simples como se poderia desejar; então, eu não teria sido levado a essa teoria se os fenômenos de aberração não me forçassem a fazê-lo. Além disso, é evidente que a teoria deve ser considerada apenas provisória. O que acabei de chamar de [...] "equivalência" pode algum dia parecer-nos como uma "identidade"; Isso pode acontecer se conseguirmos considerar a matéria ponderável como uma modificação do próprio éter. É quase inútil dizer que também seria uma solução atribuímos ao éter uma massa infinitamente (ou muito grande). Então, os elétrons podem reagir no éter sem que esse meio se mova. Mas essa questão me parece bastante artificial. (LORENTZ, 1901)

Infelizmente, não sabemos qual foi a resposta de Poincaré à Lorentz. Porém, podemos extrair algumas lições sobre esse episódio, a partir da análise fleckiana. O primeiro fato diz respeito ao estilo de pensamento de Poincaré. Diferente de Lorentz, Poincaré não utiliza a notação vetorial do eletromagnetismo que havia sido introduzida pelo engenheiro inglês Oliver Heaviside. Essa conexão passiva de Poincaré teve consequências importantes nos seus trabalhos subsequentes. Ao manter a harmonia das ilusões de um formalismo de escrita matemática cartesiana, Poincaré não conseguiria estabelecer importantes relações entre o espaço-tempo, delegando essa tarefa a H. Minkowski (WALTER, 2007). Outro fato importante é analogia que Poincaré emprega entre a energia e um fluido fictício. Novamente, Poincaré realiza uma circulação intracoletiva, desta vez entre o eletromagnetismo, composto por Maxwell, Helmholtz, Cremieu, Hertz, Larmor, Lorentz, e a mecânica dos fluidos, formado por Daniel Bernoulli, Leonard Euler, D'Alambert, Chevalier de Borda, Abbé Bossut, Du Buat e Charles Coloumb. Os primeiros trabalhos de Poincaré de impacto no campo da física foram sobre equilíbrio de massas fluidicas. A frente do Bureau das Longitudes, Poincaré discutiu a forma da Terra a partir da análise do equilíbrio dinâmico dos fluidos internos do manto e do núcleo. Não seria absurdo dizer que no final do século XIX, Poincaré era um dos maiores especialistas em mecânica dos fluidos (DARRIGOL, 1995, 1996). Ao lidar com problemas do eletromagnetismo, Poincaré havia desenvolvido uma estratégia que se mostrou extremamente fecunda: estabelecer um equivalente com os elementos da mecânica do fluido (DARRIGOL, 1995, 1996). Por essa razão em seu ensaio de 1900, Poincaré trata o fluxo eletromagnético como um fluido fictício e deriva as relações fundamentais que conservariam o princípio da reação. O método de Poincaré corresponde a uma circulação intercoletiva entre o eletromagnetismo e a mecânica dos fluidos que tornava latente as conexões ativas.

Por fim, convém registrar como a circulação intercoletiva entre Lorentz e Poincaré transformou o estilo de pensamento desse último. Embora pouco saibamos sobre a vida

peçoal de Lorentz, a sua carreira acadêmica foi bem delineada (MARTINS, 2015). Lorentz iniciou seus estudos em física na Universidade de Leiden e já no início de sua formação resolveu se dedicar ao campo teórico, evitando ao máximo qualquer área experimental (MARTINS, 2015). Um estudo na correspondência de Lorentz, mostra que suas circulações eram mais restritas a coletivos de pensamento de físicos, portanto, de acordo com a leitura fleckiana, seriam circulações majoritariamente intracoletivas. No seu trabalho sobre eletromagnetismo, Lorentz não estava preocupado no significado físico das transformações de coordenadas, Lorentz acreditava que eram apenas ficções matemáticas desprovidas de significado preciso (DARRIGOL, 1995). A única relação que Lorentz buscou propor um significado era a contração do comprimento que ele atribuía a interação do éter com as moléculas. Lorentz não estava familiarizado com a coordenação de relógios e problemas mais técnicos. Poincaré, por outro lado, buscava uma interpretação física e operacional das transformações de Lorentz (MARTINS, 2015). Whittaker (1953) considera este um fato extraordinário na história da ciência, pois fez com que Lorentz, o físico, assumisse o papel de um matemático, e Poincaré, o matemático, assumisse o papel de um físico. Essa troca de papéis (coletivos de pensamento) favoreceu que Lorentz e Poincaré realizassem uma circulação intercoletiva. Essa circulação se mostrou mais fecunda em Poincaré do que em Lorentz, já que este último ainda se prendia a harmonia das ilusões do éter e espaço absoluto (DARRIGOL, 1995, 1996).

Até 1900, Poincaré mantinha uma harmonia das ilusões a respeito da lei da ação e da reação, acreditando que fosse possível concilia-la a Teoria de Lorentz. A correspondência de 1901 de Lorentz à Poincaré é a primeira carta compartilhada que temos conhecimento, portanto não podemos inferir que antes dessa correspondência, os dois pesquisadores tivessem compartilhado suas ideias a respeito do princípio da reação. Apesar dos elogios que Lorentz faz a Poincaré, sua posição a respeito do princípio da reação é enfática: ele deve ser rejeitado. Em 1902, em *A Ciência e a Hipótese*, Poincaré republica seu ensaio sobre a mecânica e passa a tratar as leis de Newton como convenções úteis. Em 1904, na conferência de Saint Louis, Poincaré propõe a rejeição do princípio da reação. A rejeição do Princípio da Reação se torna ainda mais enfática em 1908 em *La Dynamique de L'Électron* e *Science et Methode*. Podemos concluir que a opinião de Lorentz (circulação intercoletiva) foi importante para instauração um período de complicação que fez Poincaré superar a harmonia da ilusão e instaurar um novo estilo de pensamento: a rejeição do princípio da reação.

4.2.6. Poincaré e a Teoria Eletromagnética (1901-1904)

Resta-nos apenas analisar a produção de Poincaré até 1905, quando ele escreveu sua tese sobre a dinâmica do elétron. No mesmo ano em que Lorentz escreveu sua carta, foi publicado seu livro *“Électricité et optique: la lumière et les théories électrodynamiques”* que trazia aulas em Souborne e *papers* de eletromagnetismo publicados por Poincaré entre 1888 e 1900. Em 1902, Poincaré publicou dois artigos sobre o telégrafo sem fio, que estava associado ao seu trabalho Bureau des Longitudes, e um artigo sobre a polêmica teoria de Crémieu: *“Sur les expériences de M. Crémieu et une objection de M. Wilson”*

O envolvimento de Poincaré no episódio de Crémieu mostra a extensão de suas dúvidas em relação aos fundamentos existentes da eletrodinâmica. O experimentador jovem e hábil acreditava ter encontrado, em uma versão aprimorada do experimento de Rowland, que discos eletrizados giratórios não produziam nenhum campo magnético. O resultado contradizia quase todas as teorias conhecidas de eletricidade, bem como as interpretações atuais de eletrólise e raios catódicos. Ainda assim, Poincaré levou o resultado a sério, defendeu Crémieu da crítica de outros físicos e analisou cuidadosamente as teorias passadas de convecção elétrica. (DARRIGOL, 1995, p. 21)

O interesse de Poincaré sobre as experiências de Crémieu ficam bastante claras em carta trocada com Larmor, (POINCARÉ, 1901b):

Meu caro colega. Você me escreveu há algum tempo que os experimentos de Crémieu estavam sendo repetidos em Cambridge e Glasgow. Você poderia me dar alguns detalhes sobre isso? Qual é o método usado? Já obtivemos resultados? Eles confirmaram os de Crémieu? Desculpe incomodá-lo desta maneira, mas o assunto me interessa muito. Seu colega muito devotado, Poincaré.

Porém, Poincaré não era otimista com a teoria de Crémieu, como vemos na carta trocada com o matemático italiano Túlio Levi-Civita no final do mesmo ano:

No experimento de Crémieu, a carga não está concentrada em um ponto, é distribuída por toda a superfície de um setor de estanho; os intervalos entre esses setores são pequenos em relação ao tamanho dos próprios setores; a passagem de cargas desses setores pode então ser assimilado a uma corrente contínua, a corrente de retorno também é contínua. Seu fluxo é igual e de sinal oposto. É apenas sobre sua velocidade e a velocidade não importa. Não há uma única descarga disruptiva. Além disso, sua explicação não se aplicaria aos fenômenos de indução. Eu não acho que essa seja a explicação real. Ou, como afirma Crémieu, a teoria está incompleta. Ou, como dizem seus oponentes, há uma falha que ele não viu. Ele está refazendo sua experiência, vamos ver. (POINCARÉ, 1901c)

Em 1903, Poincaré publicou um artigo de 11 páginas discutindo o trabalho Macdonald sobre a difração de ondas elétricas, intitulado “*Sur la diffraction des ondes électriques: A propos d'un article de M. Macdonald*”. O objeto do trabalho envolvia uma análise matemática um tanto avançada das funções de Bessel, associadas as soluções das equações de potencial. Poincaré não faz conexão com seus trabalhos anteriores. Em 1904, Poincaré publicou três novos livros sobre eletricidade, magnetismo e telegrafia sem fio: “*Cours d'électricité théorique étude de la propagation du courant en période variable, sur une ligne munie de récepteur*”, “*Maxwell's Theory and Wireless Telegraphy*”, “*La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes; La télégraphie sans fil*” e um artigo “*Étude de la propagation du courant en période variable sur une ligne munie de récepteur*”. Os livros de Poincaré voltavam a discutir problemas contemporâneos do eletromagnetismo e as teorias concorrentes. Nesse mesmo ano, Lorentz apresentaria seu famoso *memoir* estabelecendo as transformações exatas do espaço, tempo e do eletromagnetismo (há exceção das densidades de carga e corrente, como veremos na próxima sessão), a explicação do resultado negativo da experiência de Michelson-Morley, a covariância do eletromagnetismo e o cálculo das massas transversais e longitudinais do elétron.

Poincaré estudou detalhadamente esse trabalho de Lorentz e apresentou um resumo dele no congresso de Saint Louis, em 1904, em sua palestra: “*L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique*”. Nessa palestra Poincaré volta a discutir o problema da reação na teoria de Lorentz. Sua conclusão é que a teoria admite muitas hipóteses de compensação para a reação violada, todas igualmente satisfatórias que explicam tudo e por isso são inúteis, já que não podem ser testadas. Em síntese, a situação no final de 1904 e no começo de 1905, era a seguinte:

Assim, por volta de 1904, Abraham e Lorentz afirmaram ser capazes de explicar a dinâmica do elétron em uma base puramente eletromagnética. Fundamental para ambas as teorias foi a suposição de que a energia e o momento do elétron eram idênticos com a energia e momento (auto) eletromagnéticos. No entanto, para "derivar" a segunda lei de Newton e, assim, calcular inequivocamente a massa do elétron, parecia necessário levar em conta apenas o movimento quase-estacionário. Na teoria de Abraham, G é calculado a partir do Lagrangeano do campo eletromagnético na suposição de que o elétron seja uma esfera rígida que sofre uma contração imaginária em um sistema imaginário de coordenadas, enquanto na teoria de Lorentz G é calculada a partir de sua definição eletromagnética sob a suposição de que o elétron deformável sofre uma contração real na direção do movimento, mas mantém sua forma esférica em um sistema imaginário de coordenadas. As partes de ambas as teorias passíveis de

experimental ($m_{\perp}$) estavam de acordo com os dados disponíveis, embora Kaufmann afirmasse que o de Abraham concordava melhor. Havia, no entanto, duas falhas básicas com a teoria de Lorentz, que era claramente a mais ambiciosa das duas: 1) As equações de Maxwell-Lorentz não são, em geral, deixadas inalteradas sob a transformação (33). Isto foi, como Poincaré descobriu, um problema técnico. 2) Mais grave é a instabilidade do elétron deformável causada pela repulsão de Coulomb de suas partes constituintes. Portanto, parece necessário adicionar forças mecânicas coesivas ao modelo de Lorentz. (MILLER, 1973, p. 230)

A solução desta crise viria em junho de 1905, em “*Sur la dynamique de l’électron*”. Neste artigo, Poincaré não só supera os principais problemas teóricos do modelo de Lorentz, como mostra que de todas as teorias disponíveis, ela era compatível com Princípio da Relatividade, e portanto a única capaz de explicar as experiências para medir a velocidade da Terra em relação ao éter.

5. CONSTRUÇÃO DA RELATIVIDADE DE POINCARÉ: ANÁLISE DA TESE DE POINCARÉ: “SUR LA DYNAMIQUE DE L'ÉLECTRON” (1905-06)

Em 1905, Poincaré escreveu um artigo intitulado “*Sur la dynamique de l'électron*” que pode ser considerado sua maior contribuição para a formulação da Teoria da Relatividade (MILLER, 1973, 1986, 1997, MARTINS, 2015). O artigo foi escrito entre o final o de 1904 e maio de 1905. Como já observamos, Poincaré produziu duas versões desse artigo: uma versão resumida que foi publicada no dia 05 de Junho de 1905 no *Comptus Rendus*, exatamente 25 dias antes de Einstein submeter seu *paper* da relatividade ao *Anallen*. A versão completa (ou detalhada) foi submetida a revista italiana *Circolo de Palermo* em Julho de 1905, mas por um erro editorial só foi publicado no começo de 1906 (AUFFRAY, 1998).

O nosso recorte são os trabalhos de Poincaré conectados a Teoria da Relatividade produzidos entre 1895 e 1905. Incluímos a versão detalhada de “*Sur la dynamique de l'électron*”, pois ainda que o artigo tenha sido publicado em 1906, ele foi escrito e submetido em 1905, portanto se encaixou no escopo do *corpus* da pesquisa. Outra razão para incluir este trabalho é que se nos restringíssemos apenas as considerações a versão resumida, publicada em 1905, teríamos que constantemente fazer referência ao *paper* de 1906 para explicar quais foram as hipóteses e os caminhos que Poincaré tomou em suas deduções.

5.1 Construindo a Dinâmica do Elétron

Em 1905, Poincaré já era acometido pela enfermidade que o levaria a óbito em 1912. Mesmo com a saúde fragilizada, Poincaré estava estudando detalhadamente o último trabalho de Lorentz e esperava poder discutir alguns detalhes pessoalmente com Lorentz em Paris, durante um evento na Sociedade de Física. Em uma carta de 27 de Abril, Poincaré escreveu à Lorentz:

Eu esperava até o último momento para fazer a viagem de Paris para atender sua recepção na *Société de Physique*, na Foyot's. Infelizmente, houve um imprevisto. Eu sinto muito, mas espero vê-lo amanhã na *Academia*. Agradeço os últimos ensaios que me enviou e que são de grande interesse. (POINCARÉ, 1905b)

Infelizmente, Poincaré não pode comparecer ao encontro na Academia e conversar pessoalmente com Lorentz. Por isso, Poincaré, enviou três cartas discutindo o *memoir* de Lorentz. Na epistemologia fleckiana, essa comunicação é parte essencial para o desenvolvimento de novas conexões e a modificação de estilos de pensamento. Nas palavras de Fleck (1986, p. 90): “é um mau observador, quem não percebe que uma conversa estimulante entre as pessoas pode produzir um estado, no qual cada pessoa expressa pensamentos, que talvez não expressasse sozinha ou em outra companhia”

Iremos analisar cada uma delas. Nenhuma das cartas está datada, mas provavelmente foram escritas no decorrer de maio²⁸ daquele ano. Poincaré inicia sua segunda carta com a seguinte escusa:

Lamento muito as circunstâncias que me impediram de ouvir sua conferência e depois conversar com você durante a sua estadia em Paris. Há algum tempo, estudei em maior detalhe seu trabalho “*Fenômenos eletromagnéticos em um sistema movendo-se com qualquer velocidade menor que a da Luz*”, cuja importância é extrema e eu já tinha mencionado os principais resultados em minha palestra em St. Louis. Eu concordo com você em todos os pontos essenciais; no entanto, existem alguns pequenos detalhes divergentes. (POINCARÉ, 1905c, ITÁLICO NOSSO)

A divergência que Poincaré encontrou é justamente a transformação da densidade de carga e que junto com a correção da densidade de corrente irá compor a primeira sessão do seu artigo. Lorentz (1904, p. 813) havia encontrado a transformação (conexão passiva):

$$\frac{1}{kl^3} \rho = \rho'; \quad k^2 u_x = u'_x; \quad k^2 u_y = u'_y \quad 29$$

Onde o fator k corresponde ao fator de Lorentz:

$$k = \left(1 - w^2/c^2\right)^{-1/2} \quad 30$$

Poincaré percebeu que esta transformação não garante a conservação de carga. Em uma leitura fleckiana, temos aqui uma conexão passiva que se tornou uma conexão ativa e que levará Poincaré a estabelecer uma nova conexão passiva, como veremos a seguir.

²⁸ Como vimos, Poincaré iria recepcionar Lorentz em 27 de abril, mas não pode comparecer e esperava encontra-lo no próximo dia, 28 de abril. Poincaré também não pode comparecer. Nesta carta, como veremos, Poincaré também não pode acompanhar Lorentz em sua estadia em Paris. Considerando que Lorentz não tenha partido de Paris antes de 29 de abril, ele não estava em Leiden antes de maio.

²⁹ Em notação moderna: $\frac{1}{\gamma l^3} \rho = \rho'; \quad \gamma^2 u_x = u'_x; \quad \gamma u_y = u'_y; \quad \gamma u_z = u'_z$

³⁰ Atualmente usamos letra v , mas para sermos coerente com a notação empregada por Poincaré usaremos a letra w .

Esta condição apenas satisfeita se a transformação da densidade de carga for escrita da seguinte maneira (POINCARÉ, 1905c):

$$\begin{aligned}\frac{1}{kl^3} \rho(1 + \varepsilon v_x) &= \rho, \\ \frac{1}{kl^3} \rho(v_x + \varepsilon) &= \rho' u'_x\end{aligned}\quad 31$$

onde $\varepsilon = -(w/c)$ ou em unidades próprias (com $c = 1$), $\varepsilon = -w$. Outra a equação que precisa ser modificada para garantir o princípio da conservação de carga, é a equação (10) do *memoir* de Lorentz (1904, p. 813)

$$l^2 \frac{w}{c^2} (u'_y d'_y + u'_z d'_z), \quad -\frac{l^2}{k} \frac{w}{c^2} u'_x d'_y, \quad -\frac{l^2}{k} \frac{w}{c^2} u'_x d'_z$$

Onde d' são as componentes do campo elétrico no referencial S' . Poincaré mostra que esta equação deve ser substituída por:

$$l^2 \frac{w}{c^2} (u'_x d'_x + u'_y d'_y + u'_z d'_z), \quad 0, \quad 0$$

Que é segundo Poincaré (1905g) a força de Liénard, que Lorentz também encontrou, mas com algumas diferenças. Deste resultado Poincaré levanta a seguinte conexão ativa: esta força é compensada? Após uma breve análise usando o princípio das forças virtuais de D'Alambert, Poincaré chega a uma nova conexão passiva: se as forças forem apenas de origem elétrica não haverá compensação, mas se elas forem de origem não eletromagnética, ocorre a compensação. Observe que, embora já se soubesse que a estabilidade do elétron contraído exigisse forças de origem não elétrica, mas como Poincaré modificou as transformações de Lorentz, era preciso analisar novamente se haveria uma compensação. O resultado permanecia negativo, portanto era necessário introduzir forças não elétricas sobre o elétron contraído. Essa é a suposição básica que irá nortear o desenvolvimento das tensões de Poincaré. Ao fim da carta, Poincaré faz uma observação bastante importante sobre o fator l que Lorentz introduz em suas transformações:

Mas há outra coisa. Você assumiu $l = 1$. Langevin³² assumiu $kl^3 = 1$. Eu tentei $kl = 1$ [equivalente ao modelo de Abraham] para preservar a

³¹ Em notação moderna: $\frac{1}{\gamma l^3} \rho(1 - \beta u_x) = \rho'$ $\frac{1}{\gamma l^3} \rho(u_x - \beta) = \rho' u'_x$

³² P. Langevin (1905) La physique des électrons. *Revue générale des sciences pures et appliquées* 16, pp. 257–276.

unidade de tempo, mas isso me levou a consequências inaceitáveis. Por outro lado, chego a contradições (entre as fórmulas de ação e energia) com todas as hipóteses além das de Langevin. O raciocínio pelo qual você estabelece que $l = 1$ não parece ser conclusivo, ou melhor, não é conclusivo e torna-se indeterminado quando olho para o cálculo que modificaram, como eu lhe disse, as equações na página 813. O que você acha disso? Quer que eu lhe dê mais detalhes ou os que eu lhe dei são suficientes para você? (POINCARÉ, 1905c)

Alguns dias depois, Poincaré enviou uma nova carta, mostrando novas descobertas a respeito do trabalho de Lorentz: “meu estimado colega, obrigado por sua carta amável³³. Desde que te escrevi, minhas ideias mudaram em alguns pontos. Como você eu achei l , mas por outro caminho.” (POINCARÉ, 1905d). Tanto Lorentz como Poincaré irão chegar a mesma conexão passiva, porém por caminhos diferentes: o caminho utilizado por Poincaré foi a teoria de grupos. Ele provou que as transformações de Lorentz formam um grupo infinitesimal se, e somente se, $l = 1$. Tratava-se de um argumento matemático, mas como veremos, este argumento tem consequências físicas bastante importantes. Ao final da carta, Poincaré apresenta uma conexão ativa que exprime que dificuldades da teoria de Lorentz com princípios de conservação:

Por outro lado, não encontro concordância entre o cálculo das massas por meio momento linear eletromagnético e, por meio do princípio de mínima ação, e por meio da energia na hipótese de Langevin. Espero esclarecer brevemente essa contradição e vou mantê-lo informado dos meus esforços. (POINCARÉ, 1905d)

Entre as contradições que Poincaré ainda precisava esclarecer era o valor da massa do elétron deformável de Lorentz (MILLER, 1973, 1986, DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005). Parece claro que nesta ocasião Poincaré ainda não havia estabelecido as tensões de Poincaré. Como ele provaria, dias depois, os modelos de Abraham e Bucherer-Langevin apenas são compatíveis com forças elétricas, enquanto o modelo de Lorentz exige a existência de forças não elétricas. Essas considerações aparecem na última carta (até onde sabemos) que Poincaré enviou a Lorentz antes de publicar seu paper. A carta é bastante curta e por isso vamos reproduzi-la integralmente:

Continuei a pesquisa que havia dito a você. Os meus resultados confirmam plenamente o seu, no sentido de que a compensação perfeita (que impede a determinação experimental do movimento absoluto) só pode ser feita completamente na hipótese $l = 1$. Só que para que esta hipótese seja admissível, devemos admitir que cada elétron é submetido a forças complementares cujo trabalho é proporcional às variações de seu volume. Ou se você preferir, cada elétron se comporta como se fosse uma capacidade oca sujeita a uma pressão interna constante (também negativa) e independente do volume. Nestas circunstâncias, a

³³ Infelizmente essa carta não parece ter sido preservada.

compensação está completa. Estou feliz em encontrar-me em perfeita harmonia com você, e assim ter chegado à perfeita inteligência de seus bons trabalhos. (Poincaré, 1905e).

Esta carta mostra que Poincaré já estava em posse de seu conceito de tensões de Poincaré e havia demonstrado que a teoria de Lorentz era a única compatível com o princípio da relatividade. Em outras palavras, Poincaré mostrou que qualquer teoria que não seja a do elétron contraído da de Lorentz permitiria detectar o movimento da Terra em relação ao éter e, portanto, entraria em contradição com as diversas experiências realizadas como a de Tromble, Raylengh e Michelson-Morley. O final da carta revela que Poincaré estava bastante eufórico com seus resultados, é provável que ele tenha escrito essa carta logo após ter deduzido estes resultados.

Um dos aspectos mais interessantes do paper de Poincaré são suas hipóteses (conexões ativas) e conclusões preliminares (conexões passivas) sobre a gravitação. Como veremos, depois de estudar a dinâmica do elétron, Poincaré impõe seu princípio da relatividade à gravitação. Essa ideia vinha desde seu artigo de 1900, onde ele discutiu o problema da ação e reação na teoria de Lorentz. Nas teorias vigentes, a interação gravitacional era instantânea, portanto seria possível realizar sincronização absoluta de relógios em movimento por meio de efeitos gravitacionais. Infelizmente não sabemos se Poincaré comunicou a Lorentz esses novos resultados, não há nenhum documento que permita nos discernir a respeito.

Supondo que Poincaré não tenha comunicado Lorentz, quais seriam as razões possíveis? Uma possibilidade é que estas hipóteses foram desenvolvidas tardiamente e acrescentadas pouco antes da submissão do trabalho e Poincaré esperava que Lorentz lesse essa comunicação. Outra possibilidade, embora pouco provável, é que o tema não estava relacionado aos problemas que Lorentz estava se focando (eletrodinâmica), portanto Poincaré não quis desviar a atenção do pesquisador. Também podemos supor que Poincaré considerasse um trabalho imaturo, que seria mais interessante publica-lo para que outros pesquisadores desenvolvessem estas ideias, do que discuti-las em particular.

5.1.1 Construindo a Dinâmica do Elétron: Análise Fleckiana

Um fato importante sobre a contribuição de Poincaré a Teoria da Relatividade é que ela se deu principalmente em resposta aos trabalhos de Lorentz e outros pesquisadores (MARTINS, 2015). Isso implica que o princípio da relatividade para Poincaré não era

uma preocupação central de sua pesquisa acadêmica e que o estilo de pensamento de Poincaré a respeito desse tema foi sendo instaurado e expandido por circulações intercoletivas. Quando Lorentz apresentou seu *memoir* em 1904, sugerindo a covariância de Lorentz para o eletromagnetismo, ao que indicam os estudos históricos (DARRIGOL, 1995, 1996) ele teria enviado uma cópia para avaliação de Poincaré.

Nesse mesmo ano, Poincaré fez parte da comitiva francesa que iria apresentar os recentes avanços nas ciências e na matemática para um público misto na conferência de Saint Louis. Poincaré apresentou duas palestras: uma sobre superfícies mínimas e geodésicas e a famosa conferência sobre o atual estado e o futuro da física teórica. Nessa conferência, Poincaré menciona alguns resultados obtidos por Lorentz, mas não chega a se aprofundar, o que indica que ele ainda não havia feito uma leitura detalhada do *memoir*. Poincaré pretendia discutir detalhes do trabalho de Lorentz durante a sua vinda à Paris em abril de 1905, mas como vimos, sua saúde frágil o impediu³⁴. O principal ponto que incomodava Poincaré no trabalho de Lorentz era a demonstração de que o fator de escala γ nas transformações de Lorentz deveria ser igual a unidade. Embora, a dedução de Lorentz fosse praticamente um trabalho de matemática operacional, Lorentz não via problema em usar argumentos “heurísticos” para facilitar suas deduções (conexões ativas). Sendo um matemático, extremamente rigoroso, Poincaré se sentiu incomodado com a abordagem de Lorentz. Em outras palavras, a circulação intracoletiva do estilo de pensamento de Lorentz à Poincaré gerou uma confrontação. No processo de superar essa confrontação (harmonia das ilusões), Poincaré decidiu usar um método alternativo, porém muito mais rigoroso para deduzir as transformações de Lorentz: a teoria de grupos infinitesimais de Lie (conexão ativa). Esse método mostrou muitas conexões passivas que de outra forma não poderiam ser descobertas. Além de provar a unicidade do fator γ , Poincaré construiu a forma quadrática fundamental do espaço-tempo (conexão passiva), derivou a álgebra de Lie e seus geradores e escreveu as grandezas físicas como invariantes de quatro dimensões (conexões passivas).

Outro problema que Poincaré resolveu foi a estabilidade do elétron, usando novamente a circulação intracoletiva entre o eletromagnetismo e a mecânica dos fluídos. Ao transformar o problema da massa do elétron em um problema de equilíbrio de uma massa fluida, Poincaré descobriu a existência de distensões na superfície do elétron que

³⁴ Da perspectiva histórica esse foi um evento oportuno, pois gerou pelo três cartas que nos revelam detalhes do pensamento de Poincaré. Se o encontro tivesse acontecido, talvez esses detalhes teriam sido perdidos.

vieram a ser chamadas de tensões de Poincaré. A capacidade de Poincaré visualizar problemas da eletrodinâmica como problemas de massas fluídicas é o que se chama, na epistemologia fleckiana, de Gestalt.

A percepção da forma (*Gestaltsehen*) imediata exige experiência numa determinada área do conhecimento: somente após muitas vivências, talvez após uma formação prévia, adquire-se a capacidade de perceber, de maneira imediata, um sentido, uma forma e uma unidade fechada. Evidentemente, perde-se, ao mesmo tempo, a capacidade de ver aquilo que contradiz a forma (Gestalt). Mas essa disposição à percepção direcionada é a parte mais importante do estilo de pensamento. Sendo assim, a percepção da forma é uma questão que pertence marcadamente ao estilo de pensamento (FLECK, 2010, p. 146).

Por fim, Poincaré também fez uma circulação intercoletiva entre a astronomia e o princípio da relatividade, chegando a um programa relativístico da gravitação e prevendo a existência de ondas gravitacionais.

5.2 A Dinâmica do Elétron: Notação

Para compreendermos o artigo de Poincaré, novamente precisamos falar sobre a notação empregada por Poincaré. As mesmas observações que tecemos para seu ensaio de 1900, valem para seu ensaio de 1905-1906. Enfatizamos, novamente, A primeira delas é que Poincaré usa a mesma notação para derivadas parciais e derivadas ordinárias, pois o símbolo ∂ é usado para designar a variação dos funcionais. A figura abaixo exemplifica as diferenças de notações:

Tabela 4. Dicionário de notação ampliado (SCHWARTZ, 1971, p. 1289)

Quantidade	Notação de Poincaré	Notação Contemporânea
Campo Elétrico	(f, g, h)	E
Campo Magnético	(α, β, γ)	B
Potencial Escalar	ψ	ϕ
Potencial Vetor	(F, G, H)	A
Densidade de Corrente Elétrica Total	(u, v, w)	I
Velocidade do Elétron	(ξ, η, ζ)	U
Vetor Deslocamento	(U, V, W)	ξ
Força por Unidade de Volume	(X, Y, Z)	F
Força por Unidade de Carga	(X_I, Y_I, Z_I)	F
Velocidade Relativa entre Dois Sistemas de Referências Inerciais	ε	$-\beta$
$(1 - \beta^2)^{-1/2}$	K	γ

$$\begin{aligned}
 (I) \quad & \left\{ \begin{aligned} u &= \frac{df}{dt} + \rho \xi = \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\rho}{dz}, & \alpha &= \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz}, & f &= -\frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx}, \\ \frac{d\alpha}{dt} &= \frac{dg}{dz} - \frac{dh}{dy}, & \frac{d\rho}{dt} + \sum \frac{d\rho\xi}{dx} &= 0, & \sum \frac{df}{dx} &= \rho, & \frac{d\psi}{dt} + \sum \frac{dF}{dx} &= 0, \\ \square &= \Delta - \frac{d^2}{dt^2} = \sum \frac{d^2}{dx^2} - \frac{d^2}{dt^2}, & \square\psi &= -\rho, & \square F &= -\rho\xi. \end{aligned} \right. \\
 (I) \quad & \left\{ \begin{aligned} \vec{g} &= \rho\vec{v} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H}, & \vec{B} &= \nabla \times \vec{A}, & \vec{E} &= -\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \nabla\varphi, \\ \frac{\partial\vec{B}}{\partial t} &= -\nabla \times \vec{E}, & \frac{\partial\rho}{\partial t} &= \nabla(\rho\vec{v}) = 0, & \nabla\vec{D} &= \rho, & \mu\varepsilon \frac{\partial\varphi}{\partial t} + \nabla\vec{A} &= 0, \\ \square &= \Delta - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} = \nabla^2 - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2}, & \square\varphi &= -\frac{\rho}{\varepsilon}, & \square\vec{A} &= \mu(\rho\vec{v}). \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Figura 2. Equações de Maxwell: na notação adotada por Poincaré (1906, p. 132) (superior). Contemporizadas com auxílio de Schwartz (1971) e Logunov (2004) (inferior)

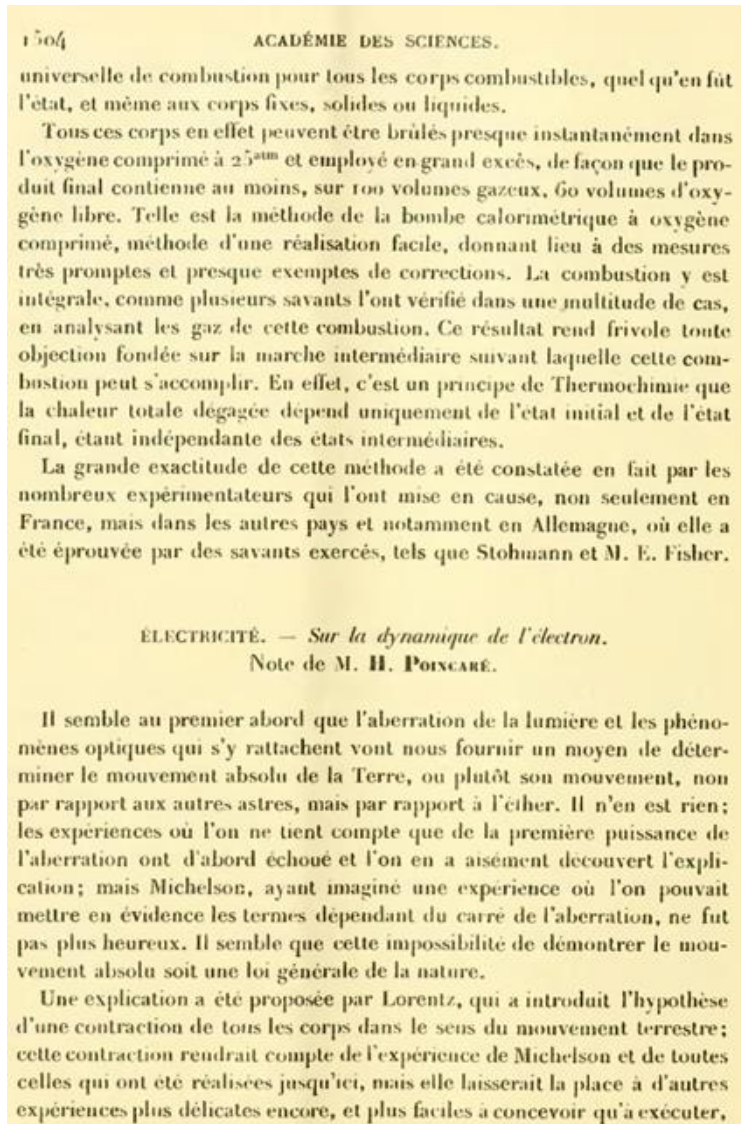


FIGURA 3. A primeira página de *Sur la dynamique de l'électron* publicado no *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, em 05 de Junho de 1905, exatos 25 dias antes de Einstein submeter seu *paper*.

5.3 A Dinâmica do Elétron: Introdução

Poincaré inicia seu artigo discutindo as tentativas de se medir a velocidade da Terra em relação ao éter. Trata-se de uma abordagem muito semelhante a que Einstein irá dar ao seu artigo que foi submetido a publicação 25 dias depois da publicação do artigo de Poincaré. Na versão publicada em 1905, ele escreve:

Parece à primeira vista que a aberração da luz e os fenômenos ópticos associados proporcionam um meio de determinar o movimento absoluto da Terra, ou melhor, seu movimento, não em relação a outras estrelas, mas em relação ao éter. Este não é o caso: as experiências em que consideramos apenas a primeira ordem da aberração foram inicialmente mal sucedidas e uma explicação foi facilmente encontrada; mas Michelson, que imaginou um experimento através do qual os termos que dependem do quadrado da aberração poderiam ser medidos, também não foi bem-sucedida. Parece que essa incapacidade de demonstrar movimento absoluto é uma lei geral da natureza. (POINCARÉ, 1905g, p. 1504).

Na versão de 1906, Poincaré acrescenta a essa introdução que Fresnel tinha provado ser válido o princípio da relatividade para refração e reflexão e as experiências envolvendo telescópios cheios de água. Ainda na versão de 1906, encontramos a seguinte passagem envolvendo o Princípio da Relatividade:

Naturalmente, somos levados a admitir esta lei, que chamaremos de o Postulado da Relatividade e a admitiremos sem restrições. Sobre este postulado, que está até agora de acordo com experiências, pode ser confirmado ou refutado posteriormente por experiências mais precisas, porém é, de qualquer modo, interessante ver quais as consequências que se seguem dele (POINCARÉ, 1906, p. 129).

Assim como Einstein, Poincaré adota o termo postulado da relatividade ao se referir ao princípio da relatividade. Não há nenhuma explicação do porquê Poincaré ter adotado essa nomenclatura. Também observamos que o uso do termo postulado tanto por Einstein e Poincaré é uma curiosa coincidência, pois essa passagem não aparece na versão de 1905, apenas na versão de 1906, invalidando a possibilidade de Einstein ter tido conhecimento desse manuscrito enquanto escrevia o seu próprio³⁵. Na sequência Poincaré discute uma controversa conexão ativa: a hipótese de FitzGerald e Lorentz para a experiência de Michelson-Morley de 1887. E faz a seguinte observação:

³⁵ Mesmo a especulação mais radical de que alguém poderia ter vazado esse manuscrito de Poincaré para Einstein, essa hipótese também é insustentável. O artigo de Einstein foi submetido no dia 30 de junho de 1905, o artigo de Poincaré foi submetido em julho de 1905, ou seja, depois de Einstein. É verdade que há uma estranha conexão entre Einstein e Poincaré como mostra o trabalho de Darrigol (2004), mas este fato, em particular, é apenas uma coincidência.

Essa contração, que chamaremos de contração de Lorentz, daria conta do experimento de Michelson e de todos os que foram realizados até agora. A hipótese tornar-se-ia insuficiente, no entanto, se alguém assumisse o postulado da relatividade como uma lei geral. Lorentz procurou complementá-la e modificá-la para que ela concordasse perfeitamente com este postulado. Ele conseguiu fazê-lo em seu artigo intitulado *Fenômenos Eletromagnéticos em um Sistema que se Move com Qualquer Velocidade Inferior à da Luz* (Proceedings de l'Académie d'Amsterdam, 27 de maio de 1904). (POINCARÉ, 1906, p. 129).

E um pouco mais frente, Poincaré reforça essa afirmação, afirmando que:

Langevin procurou modificar a ideia de Lorentz; Para ambos os autores, o elétron em movimento toma a forma de um elipsoide achatado, mas para Lorentz dois dos eixos do elipsoide permanecem constantes, enquanto que para Langevin, pelo contrário, é o volume do elipsoide que permanece constante. Além disso, ambos os cientistas mostraram que essas duas hipóteses estão de acordo com as experiências de Kaufmann, bem como a hipótese original de Abraham (elétron esférico indeformável). A vantagem da teoria de Langevin é que ele usa apenas forças eletromagnéticas e forças de ligação; mas é incompatível com o postulado da relatividade; isto é o que Lorentz mostrou e o que eu demonstrarei novamente de outra maneira, com base nos princípios da teoria de grupos. (POINCARÉ, 1906, p. 130).

Aqui precisamos fazer uma observação bastante importante: Lorentz não se preocupou em conciliar sua eletrodinâmica com o princípio da relatividade e nem demonstrou que ela era compatível como este princípio. É verdade que Lorentz ponderou sobre as críticas de Poincaré que a hipótese da contração dos corpos era uma hipótese *ad hoc* e que se deveria construir uma nova eletrodinâmica. Poincaré insistia que essa eletrodinâmica deveria ter como base o princípio da relatividade, mas Lorentz não impôs essa condição de forma explícita como podemos ver no próprio *memoir* de 1904 de Lorentz, em particular na seguinte passagem:

A experiência da qual falei não é a única razão pela qual um novo exame dos problemas relacionados com o movimento da Terra é desejável. Poincaré se opôs a teoria existente de fenômenos elétricos e ópticos dos corpos em movimento que, para explicar o resultado negativo de Michelson, foi necessário a introdução de uma nova hipótese, e que a mesma necessidade pode ocorrer a cada vez que novos fatos forem trazidos à luz. Certamente, esse método de inventar hipóteses especiais para cada novo resultado experimental é algo artificial. Seria mais satisfatório, se fosse possível mostrar, por meio de certas suposições fundamentais, e sem negligenciar termos de uma ordem de grandeza ou de outra, que muitas ações eletromagnéticas são inteiramente independentes do movimento do sistema. Há alguns anos, eu procurei desenvolver uma teoria desse tipo. Eu acredito que agora eu sou capaz de tratar o assunto de forma mais satisfatória. *A única restrição no que diz respeito à velocidade será que ela seja menor que a da luz.* (LORENTZ, 1904, p. 811, **ITALICO NOSSO**).

E no ensaio “*Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique*”, Lorentz é ainda mais explícito:

Mais tarde, pude ver no artigo de Poincaré que, ao proceder de forma mais sistemática, poderia ter alcançado uma simplificação ainda maior. Não tendo notado isso, não consegui obter a invariância exata das equações; minhas equações permaneceram sobrecarregadas com certos termos que deveriam ter desaparecido. Esses termos eram muito pequenos para ter um efeito apreciável nos fenômenos e, assim, poderia explicar a independência do movimento da Terra que foi revelado pelas observações, mas não estabeleci o princípio da relatividade como rigorosamente e universalmente verdadeiro. Poincaré, pelo contrário, obteve uma invariância perfeita das equações da eletrodinâmica e formulou o “postulado da relatividade”, termos que ele foi o primeiro a empregar. (LORENTZ, 1921, p. 298).

Nas cartas que Poincaré enviou à Lorentz, vemos que foi Poincaré que descobriu que o único modelo eletrodinâmico compatível com o princípio da relatividade era o de Lorentz. Então por que Poincaré faz essa atribuição à Lorentz? Provavelmente porque Poincaré sempre achou que o mérito da criação da Teoria da Relatividade era de Lorentz e que ele apenas complementou em alguns aspectos. Essa hipótese é corroborada no seguinte trecho de uma conferência que Poincaré deu acerca do éter e da matéria, em 1912, onde Poincaré discute o espalhamento da luz pelas moléculas:

As moléculas são muito pequenas para causar uma reflexão regular; elas só produzem uma difusão. O que é essa difusão, quando não levamos em conta os movimentos das moléculas, sabemos disso, e pela teoria e experiência; é ela quem produz o azul do céu. Essa difusão não altera o comprimento de onda, mas é mais intensa à medida que o comprimento de onda é menor. Agora é necessário passar da ação de uma molécula em repouso para a ação de uma molécula em movimento, a fim de levar em conta a agitação térmica; é fácil, temos apenas que aplicar o *princípio da relatividade de Lorentz*. (POINCARÉ, 1912, p. 358, **ITALICO NOSSO**).

Mas como o próprio Lorentz disse e nossa investigação histórica mostrou, o Princípio da Relatividade foi proposto por Poincaré. Por isso somos forçados a concluir que essas atribuições de Poincaré são, na verdade, reflexos de uma abnegação da prioridade no desenvolvimento da teoria dando o mérito à Lorentz. Curiosamente, Lorentz também faz um ato de abnegação atribuindo a prioridade da teoria da relatividade ora a Poincaré, ora a Einstein (KESWANI, 1965). Continuando a nossa análise da introdução, Poincaré depois comenta sobre a sua descoberta: a existência de uma pressão no elétron que não é de natureza eletromagnética, as tensões de Poincaré.

É, portanto, necessário retornar daqui para a teoria de Lorentz; mas se alguém quiser preservá-la e evitar contradições intoleráveis, é necessário supor uma força especial que explica, ao mesmo tempo, a

contração e a constância de dois dos eixos. Procurei determinar essa força, descobri que *ela pode ser comparada a uma pressão externa constante, atuando sobre o elétron deformável e compressível, e cujo trabalho é proporcional às variações do volume do elétron*. Então, se a inércia da matéria é exclusivamente de origem eletromagnética, como é geralmente admitida desde a experiência de Kaufmann, e exceto que a pressão constante da qual eu venho falar, todas as forças são de origem eletromagnética, o postulado da relatividade pode ser estabelecido de maneira rigorosa. É o que mostro por um cálculo muito simples, baseado no princípio de mínima ação. (POINCARÉ, 1906, p. 130).

Poincaré termina sua introdução afirmando que o princípio da relatividade como uma lei universal, exige que as transformações de Lorentz se apliquem a todas as forças da natureza, sejam elas de origem eletromagnética ou não. Na época, só eram conhecidas dois tipos de força: as de natureza eletromagnética e as de natureza gravitacional. A gravitação, segundo a visão ortodoxa³⁶ de sua época, era um fenômeno instantâneo. Mas o princípio da relatividade exige que as interações ocorram a velocidade da luz, nessas condições Poincaré afirma que:

Nós descobrimos que, à primeira vista, somos forçados a supor que a propagação da gravitação não é instantânea, mas ocorre à velocidade da luz. Pode-se acreditar que esta é uma razão suficiente para rejeitar a hipótese, pois Laplace mostrou que isso não pode ocorrer. Mas, na verdade, esse efeito de propagação é completamente compensado por uma causa diferente, de modo que não ocorra mais uma contradição entre a lei proposta e as observações astronômicas. É possível encontrar uma lei que satisfaça as condições impostas por Lorentz e que, ao mesmo tempo, corresponde à lei de Newton quando as velocidades das estrelas são bastante pequenas, de modo que se podem negligenciar seus quadrados (bem como o produto da aceleração e da distância) em relação à velocidade da luz ao quadrado? Para esta questão, como será visto posteriormente, responderemos que sim. (POINCARÉ, 1906, p. 131).

E a extensão aos fenômenos gravitacionais revela a Poincaré a importante conexão dos fenômenos da natureza com a velocidade da luz no vácuo:

Se admitimos o postulado da relatividade, encontraríamos na lei da gravitação e nas leis eletromagnéticas um número comum que seria a velocidade da luz; e ainda a encontraríamos em todas as outras forças de qualquer origem, o que só poderia ser explicado de duas maneiras: ou não haveria nada no mundo que não seja de origem eletromagnética. Ou essa parte que seria, por assim dizer, comum a todos os fenômenos físicos, seria apenas aparente, algo que seria devido aos nossos métodos de medição. Como realizamos nossas medidas? Por transporte, de um lado para o outro, de objetos chamados de corpos rígidos, que reagem instantaneamente; mas isso não é mais possível na teoria hodierna, se a contração de Lorentz for admitida. Nesta teoria, dois comprimentos

³⁶ Existiam hipóteses heterodoxas como as de Le Sage e Quirino Majorana, para detalhes ver Edwards (2002).

iguais são, por definição, dois comprimentos para os quais a luz leva o mesmo tempo para atravessa-los. (POINCARÉ, 1906, p. 132).

Poincaré sabia que esta hipótese sobre a gravitação era algo bastante arriscado já que a teoria de Lorentz não estava ainda bem estabelecida nos cânones da física e o programa de escrever uma teoria nova para gravitação poderia ser descartado a qualquer momento. Porém, Poincaré argumenta, recorrendo aos exemplos históricos de Ptolomeu, Copérnico e Kepler, que mesmo que um empreendimento seja rejeitado no futuro, de modo algum ele é inútil.

Talvez seja necessário desistir dessa definição, de modo que a teoria de Lorentz seja tão completamente rejeitada quanto o sistema de Ptolomeu pela intervenção de Copérnico. Se isso acontecer um dia, não provará que o esforço feito por Lorentz foi em vão; porque Ptolomeu, não importa o que pensemos sobre ele, não foi inútil para Copérnico. Também não hesitei em publicar esses poucos resultados parciais, embora nesse momento, mesmo a teoria inteira parece estar em perigo pela descoberta de raios magnetocatódicos. (POINCARÉ, 1906, p. 132).

Estas considerações tem um grande valor histórico, pois a conciliação do princípio da relatividade com a gravitação só seriam ser resolvidas uma década depois com desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral. Após estas breves considerações, vamos analisar cada sessão de *Sur La dynamique de l'électron*. Esta análise foi feita consultando os artigos originais de 1905 e 1906 (fonte primária) e o importante trabalho da literatura secundária: *Sur les article de Henri Poincaré* (Lognov, 2004) e *A Study of Henri Poincaré's "Sur la Dynamique de l'Électron"* (Miller, 1973).

5.4 Transformações de Lorentz

A primeira sessão (parágrafo) do *paper* de Poincaré tem como objetivo corrigir as transformações da densidade de carga e da densidade de corrente. Como já vimos na sessão 5.1, esse assunto havia sido parcialmente tratado por Poincaré em correspondência com Lorentz. Na ocasião ele havia apenas corrigido a densidade de carga. Neste trabalho, ele também descobriu que a densidade de corrente também deveria ser modificada. O principal objetivo dessa sessão é corrigir essas transformações e estabelecer a invariância das equações de Maxwell. Por essa razão, Poincaré começa apresentando as equações de Maxwell do eletromagnetismo. O sistema de unidades que Poincaré utiliza é o mesmo de Lorentz e nesse sistema desaparecem os termos de 4π e a velocidade da luz no vácuo é igual a unidade. Poincaré, usando as transformações de Lorentz, começa a desenvolver

sua análise acerca do movimento de um elétron, que no repouso, tem forma esférica. A respeito das transformações de Lorentz apresentadas por Poincaré, Miller faz a seguinte observação:

É simétrica em relação à aparência das coordenadas espaço-tempo devido à omissão de Poincaré do sistema Σ . Deve ser comparado à versão de Lorentz, que evoluiu de seus trabalhos de 1892 e 1895. No entanto, logo se tornará aparente que essa simetria não implica a equivalência de S e Σ' . Poincaré, como Lorentz, tomou o sistema fixo de éter S como o verdadeiro; Σ foi considerado um sistema fictício usado para simplificar o cálculo de campos e forças (MILLER, 1973, p. 250).

Aqui vemo-nos obrigados a discordar da colocação de Miller³⁷ que Poincaré considerava o referencial em repouso em relação ao éter como verdadeiro. Como apontou Darrigol (1995), Giannetto (1999) e Logunov (2004) e é conformato por nossa pesquisa histórica, Poincaré rejeitava a existência de um espaço absoluto e tinha dúvidas sobre a existência do éter. Pesa em favor desse argumento o fato que em momento algum neste artigo Poincaré defende a existência de um sistema verdadeiro de coordenadas. Além disso, decorre do grupo de Lorentz que não é possível estabelecer um referencial privilegiado. Essa é uma das razões pela qual Poincaré enunciou *a lei da relatividade* em A Ciência e a Hipótese justamente no capítulo onde ele discute os grupos de deslocamentos. Após estudar a transformação do elétron em um elipsoide achatado, Poincaré deriva uma importante conexão passiva (muitas vezes atribuída somente a Einstein): a transformação relativística das velocidades (POINCARÉ, 1906, p. 133):

$$\xi' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d(x + \varepsilon t)}{d(t + \varepsilon x)} = \frac{\xi + \varepsilon}{1 + \varepsilon \xi},$$

$$\eta' = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{kd(t + \varepsilon x)} = \frac{\eta}{k(1 + \varepsilon \xi)}, \quad \zeta' = \frac{\zeta}{k(1 + \varepsilon \xi)}$$

Esse é um resultado muitas vezes atribuído a Einstein, porém, como está claro, o primeiro a obtê-lo foi Poincaré. Além disso, em seu *paper* de 1905, Einstein apenas conseguiu deduzir a fórmula de velocidade relativística para o movimento longitudinal, enquanto Poincaré obteve a lei geral.

Tendo em posse as transformações para forma do elétron e da velocidade, Poincaré apresenta sua divergência com a transformação da densidade de carga e a densidade de

³⁷ Esta perspectiva de Miller é apoiada por outros historiadores como Goldenberg (1950, 1969), Holton (1960, 1969) e Cuvaj (1968) que, embora reconheçam as contribuições de Poincaré, creditam a prioridade da teoria da relatividade de Einstein.

corrente. Para obter as transformações corretas e garantir a invariância das equações de Maxwell, Poincaré utiliza a equação da continuidade e o estudo das forças sobre o elétron para estabelecer uma nova conexão passiva: um novo gauge de Lorentz (POINCARÉ, 1906, p. 134):

$$f' = -\frac{dF'}{dt'} - \frac{d\psi'}{dx'}, \quad \alpha' = \frac{dH'}{dy'} - \frac{dG'}{dz'}$$

Que em notação moderna, assume a seguinte forma:

$$\vec{E}' = -\frac{\partial \vec{A}'}{\partial t'} - \nabla \phi' \quad \vec{B}' = \nabla \times \vec{A}'$$

Por meio de sua análise matemática, Poincaré obtém as transformações corretas da densidade de carga e da densidade de corrente, e mostra que essas alterações além de garantirem a invariância das equações de Maxwell, não alteram as transformações do campo elétrico e o campo magnético. Com estes resultados em mão, Poincaré começa a estudar as forças por unidade de carga. Ele obtém uma fórmula para as forças por unidade de carga que diverge da encontrada por Lorentz.

Antes de seguirmos adiante, é importante investigar a causa dessa discrepância significativa. É óbvio que as equações para ξ', η', ζ' não são as mesmas, enquanto as fórmulas para os campos elétrico e magnético são as mesmas. *Se a inércia dos elétrons é exclusivamente de origem eletromagnética, se, além disso, estão sujeitos apenas a forças de origem eletromagnética, a condição de equilíbrio exige que dentro dos elétrons tenhamos: $X = Y = Z = 0$. [...] Essas relações são equivalentes a: $X' = Y' = Z' = 0$. As condições de equilíbrio dos elétrons não são alteradas pela transformação.* (POINCARÉ, 1906, p. 136)

Embora a hipótese seja atraente, ela leva a uma contradição inaceitável: se as velocidades forem nulas, então as forças por unidade de carga também são nulas. Essa condição leva a um campo elétrico nulo e portanto a divergência do campo é zero, em linguagem matemática, podemos escrever:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$

Que só é satisfeita se a densidade de carga ρ for nula. O que seria o equivalente a concluir que o elétron não possui carga e, portanto, é um absurdo.

Chegamos a resultados semelhantes no caso mais geral. Devemos, portanto, admitir que existam, além de forças eletromagnéticas, outras forças ou ligações. É necessário procurar condições que devem satisfazer essas forças ou ligações, de modo que o equilíbrio do elétron

não seja perturbado pela transformação. Este será o assunto de um parágrafo posterior. (POINCARÉ, 1906, p. 136)

No paper de 1905, a conclusão de Poincaré para a parte equivalente a esse parágrafo, é um pouco mais detalhada:

Lorentz também foi levado a assumir que o elétron em movimento assume a forma de um esferoide oblato; esta é também a hipótese feita por Langevin, no entanto, enquanto Lorentz assumiu que dois eixos do elipsoide permanecem constantes, o que é consistente com a hipótese $l = 1$, Langevin assumiu que o volume permanece constante. Ambos os autores mostraram que essas duas hipóteses são consistentes com os experimentos de Kaufmann, bem como a hipótese original de Abraham (elétron esférico). A hipótese de Langevin teria a vantagem de ser autossuficiente, porque basta considerar o elétron como deformável e incompressível, e explicar que ele toma uma forma elipsoidal quando se move. Mas eu mostro, de acordo com Lorentz, que é incapaz de concordar com a impossibilidade de um experimento que mostre o movimento absoluto. Como eu disse isso é porque $l = 1$ é o único caso para o qual todas as transformações de Lorentz formam um grupo. Mas com a hipótese de Lorentz, a concordância entre as equações não está isolada; obtemos ao mesmo tempo uma possível explicação para a contração do elétron, assumindo que *o elétron, deformável e compressível, é submetido a uma pressão externa constante, cujo trabalho é proporcional às mudanças de volume*. (POINCARÉ, 1905g, p. 1506)

Concluimos a análise deste parágrafo salientando que foi neste artigo que Poincaré batizou as transformações do espaço, tempo, dos campos elétricos e magnéticos e das densidades de carga e de corrente de Transformações de Lorentz (LORENTZ, 1921, MARTINS, 2015).

5.5 O Princípio de Mínima Ação

No segundo parágrafo, Poincaré começa advertindo seu leitor que ele não traz nenhum resultado significativamente novo, apenas um novo modo de se obter as equações do elétron. Para ser mais exato, Poincaré escreve:

Sabemos como Lorentz deduziu suas equações do princípio de mínima ação. Voltarei a esta questão, apesar de não ter nada de substancial para adicionar à análise de Lorentz, porque prefiro apresentá-la de forma ligeiramente diferente, o que será útil para o meu propósito. (POINCARÉ, 1906, p. 137)

Novamente Poincaré comete um anacronismo: Lorentz não realizou uma derivação de suas equações a partir do princípio de mínima ação.

A derivação "bem conhecida" de Lorentz de suas equações realmente não era de forma alguma uma derivação e, além disso, não era para ser

uma delas. Lorentz declarou em "Contribuições à Teoria dos Elétrons" (1903) que ele apenas queria ilustrar "que as equações fundamentais podem ser transformadas de tal maneira que chegamos a teoremas da mesma forma matemática que os princípios gerais da mecânica." Esse era o limite dos esforços de Lorentz para uma explicação mecânica das equações fundamentais. No entanto, este tipo de formulação deve ser possível para completar o programa reducionista de uma imagem eletromagnética do mundo. Se Lorentz tivesse tentado formular sua teoria dessa maneira em 1904, ele teria notado, e possivelmente corrigido, o defeito que foi quantitativamente apontado por Abraham em 1905. No mesmo artigo, Lorentz continuou a expressar seu descontentamento com uma imagem do mundo mecânica. (MILLER, 1973, p. 137)

Historicamente, a primeira dedução das equações de Maxwell por um princípio de mínima ação foi feita pelo físico-matemático alemão Karl Schwarzschild, em 1903, que calculou as variações da seguinte lagrangeana (MILLER, 1973):

$$L = \int \rho \vec{A} \cdot \vec{v} d\tau - \int \rho \phi d\tau + \frac{1}{2} \int (E^2 - B^2) d\tau$$

A derivação que Poincaré desenvolve em seu artigo segue as regras usuais do cálculo das variações, contudo há alguns pontos que gostaríamos de chamar a atenção. O primeiro fato é que Poincaré define a lagrangeana de forma diferente ao convencional, ele escreve (POINCARÉ, 1906):

$$L = U - T,$$

essa alteração não promove nenhuma mudança nos resultados, pois a corrente total definida em termos do rotacional do campo magnético induzido compensa a mudança de sinal (MILLER, 1973).

O outro ponto está na forma como Poincaré desenvolve os funcionais eletromagnéticos. Como observou Miller (1973), Poincaré não segue o método "germânico" empregado por Schwarzschild. O método de Poincaré faz uma analogia entre o eletromagnetismo e a hidrodinâmica. Neste método Poincaré usa a equação da continuidade e postula que o elétron se comporta como um fluido newtoniano. Esta técnica não era exatamente nova, Poincaré já havia feito nos artigos "*A propos de la théorie de M. Larmor*" (1895), "*La théorie de Lorentz et le principe de réaction*" (1900) e no seu livro "*Électricité et Optique*" (1901).

Sobre a dedução em si, há pouco a ser observado, porém, há uma passagem curiosa, onde Poincaré parece ter sofrido um pequeno lapso de pensamento. Durante análise, Poincaré impõe a seguinte condição:

$$\frac{\partial \rho \Delta}{\partial t} = 0$$

afirmando que ela é verdadeira, pois “a massa do elétron é constante” (POINCARÉ, 1906). Porém, como observa Miller, embora essa equação na hidrodinâmica se aplique a um elemento de massa do fluido, no eletromagnetismo a massa deve ser substituída pela carga elétrica. Assim Poincaré deveria ter escrito que a condição é garantida desde que “a carga do elétron é constante”. Também é fortuito observar que trabalhos experimentais conduzidos por Kauffmann mostravam que a massa do elétron não é constante.

Conduzindo sua análise matemática, Poincaré estabelece a equação da força por unidade de volume aplicada sobre o elétron.

$$X = f - \beta \zeta + \gamma \eta$$

Ou em notação vetorial moderna:

$$\vec{f} = \rho (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Que é a expressão para força por unidade de volume sobre o elétron em um campo eletromagnético que foi deduzida por Lorentz. Se multiplicarmos ambos lados da equação pelo elemento de volume, obtemos a expressão da força de Lorentz:

$$\vec{F}_{em} = e (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Não se trata de um resultado novo. Essa forma nova de deduzir a força de Lorentz, embora muito mais sofisticada e elegante, transcenderá seu caráter, até agora, puramente estético, e se tornará vital, nos próximos parágrafos, como observa Miller (1973, p. 259):

Até então, Poincaré fez apenas uma elegante exposição do procedimento variacional de Lorentz. No entanto, nas seções seguintes, ele demonstrou a importância, do ponto de vista do princípio da relatividade, de expressar a teoria do campo eletromagnético em uma formulação Lagrangiana; uma importância que transcende a afirmação de que se um T e um U podem ser encontrados para o campo eletromagnético, então explicações mecânicas são possíveis. A utilidade da formulação de Lagrange foi demonstrada por Abraham, mas seu significado completo e a simetria que ela continha foi descoberta pela primeira vez por Poincaré usando a afirmação matemática do princípio da relatividade, a transformação de Lorentz.

Nos próximos parágrafos, veremos as vantagens do método variacional e como ele conduziu Poincaré construir importantes simetrias que são a base da relatividade.

5.6. A Transformação de Lorentz e o Princípio de Mínima Ação

Poincaré inicia seu artigo fazendo a seguinte afirmação: “vamos ver se o princípio de mínima ação nos revela o motivo do sucesso da transformação de Lorentz.” (POINCARÉ, 1906, p. 137) Poincaré, inicialmente apresenta a ação eletromagnética, definida pela seguinte integral:

$$J = \int dt d\tau \left(\frac{\sum f^2}{2} - \frac{\sum \alpha^2}{2} \right)$$

Para estabelecer que os elementos de volume e de tempo em um novo sistema de coordenadas devem respeitar a seguinte igualdade:

$$dt' d\tau' = l^4 dt d\tau$$

Poincaré não demonstra porque esta igualdade deve ser satisfeita, porém ela decorre do jacobiano da transformação de coordenadas, como demonstraremos. Iremos usar o mesmo processo exposto por Miller (1973, p. 260) na nota de rodapé 170. A transformação dos elementos de volume e tempo de um sistema de coordenadas para o outro é dado pelo jacobiano da transformação:

$$dt' d\tau' = J_{t'\tau'}(t, \tau) dt d\tau$$

Onde $J_{t'\tau'}$ é o determinante jacobiano definido por:

$$J_{t'\tau'} = \frac{\partial(x', y', z', t')}{\partial(x, y, z, t)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x'}{\partial x} & \frac{\partial x'}{\partial y} & \frac{\partial x'}{\partial z} & \frac{\partial x'}{\partial t} \\ \frac{\partial y'}{\partial x} & \frac{\partial y'}{\partial y} & \frac{\partial y'}{\partial z} & \frac{\partial y'}{\partial t} \\ \frac{\partial z'}{\partial x} & \frac{\partial z'}{\partial y} & \frac{\partial z'}{\partial z} & \frac{\partial z'}{\partial t} \\ \frac{\partial t'}{\partial x} & \frac{\partial t'}{\partial y} & \frac{\partial t'}{\partial z} & \frac{\partial t'}{\partial t} \end{vmatrix}$$

Substituindo as transformações de coordenada, obtemos:

$$J_{t'\tau'} = \begin{vmatrix} \frac{\partial(kl(x+\varepsilon t))}{\partial x} & \frac{\partial(kl(x+\varepsilon t))}{\partial y} & \frac{\partial(kl(x+\varepsilon t))}{\partial z} & \frac{\partial(kl(x+\varepsilon t))}{\partial t} \\ \frac{\partial(ly)}{\partial x} & \frac{\partial(ly)}{\partial y} & \frac{\partial(ly)}{\partial z} & \frac{\partial(ly)}{\partial t} \\ \frac{\partial(lz)}{\partial x} & \frac{\partial(lz)}{\partial y} & \frac{\partial(lz)}{\partial z} & \frac{\partial(lz)}{\partial t} \\ \frac{\partial(kl(t+\varepsilon x))}{\partial x} & \frac{\partial(kl(t+\varepsilon x))}{\partial y} & \frac{\partial(kl(t+\varepsilon x))}{\partial z} & \frac{\partial(kl(t+\varepsilon x))}{\partial t} \end{vmatrix}$$

Realizando as derivações parciais, o determinante se reduz à:

$$J_{t'\tau'} = \begin{vmatrix} kl & 0 & 0 & kl\varepsilon \\ 0 & l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l & 0 \\ kl\varepsilon & 0 & 0 & kl \end{vmatrix}$$

Computando esse determinante, obtemos o seguinte valor:

$$J_{t'\tau'} = (1 - \varepsilon^2) k^2 l^4$$

Mas como o fator k é definido como $(1 - \varepsilon^2)^{-1/2}$, então $(1 - \varepsilon^2) = k^{-2}$ e o determinante jacobiano se torna:

$$J_{t'\tau'} = l^4$$

Substituindo na equação de transformação dos elementos de volume e do tempo, obtemos o resultado anteriormente apresentado por Poincaré:

$$dt' d\tau' = l^4 dt d\tau$$

Partindo deste resultado, Poincaré, por meio da transformação de Lorentz, provou a seguinte igualdade

$$\int dt d\tau \left(\frac{1}{2} \sum f^2 - \frac{1}{2} \sum \alpha^2 \right) = \int dt' d\tau' \left(\frac{1}{2} \sum f'^2 - \frac{1}{2} \sum \alpha'^2 \right)$$

Que significa que a ação eletromagnética é um invariante de Lorentz (para qualquer que seja o valor de l):

$$J = J'$$

Sobre essa invariância, Poincaré observa:

No entanto, para justificar essa igualdade, os limites de integração devem ser os mesmos; Até agora, assumimos que t varia de t_0 a t_1 , e x , y , z de $-\infty$ para $+\infty$. Nesta operação, os limites de integração serão afetados pela transformação de Lorentz, mas nada nos impede de assumir $t_0 = -\infty$, $t_1 = +\infty$; Com essas condições, os limites são os mesmos para J e J' . (POINCARÉ, 1906, p. 143)

A seguir, Poincaré estuda a variação das ações J e J' . Seus resultados levam a fórmula de transformação da força por unidade de volume, que ele já havia obtido no primeiro parágrafo e obtém um novo invariante:

$$\sum f'^2 - \sum \alpha'^2$$

ou, em notação moderna:

$$\frac{\varepsilon E^2}{2} - \frac{B^2}{2\mu}$$

Sobre estes resultados, Poincaré faz a seguinte observação: “vemos que $\sum f'^2 - \sum \alpha'^2$ não é afetado pela transformação de Lorentz, exceto por um fator constante; não é o caso da expressão $\sum f'^2 + \sum \alpha'^2$ que representa a energia. (POINCARÉ, 1906, p. 144) Adiante, Poincaré estuda o caso particular em que $\varepsilon(\beta)$ é muito pequeno e implica que o fator de Lorentz é igual a unidade, $k = 1$, e o valor de $l = 1$ (que corresponde a teoria de Lorentz). Neste caso, Poincaré obtém as seguintes transformações para os campos elétricos e magnéticos:

$$\begin{aligned}\sum f'^2 &= \sum f^2 + 2\varepsilon(g\gamma - h\beta) \\ \sum \alpha'^2 &= \sum \alpha^2 + 2\varepsilon(g\gamma - h\beta)\end{aligned}$$

Que em notação vetorial, é escrito como:

$$\begin{aligned}E'^2 &= E^2 - 2\beta(\vec{E} \times \vec{B})_x \\ B'^2 &= B^2 - 2\mu\varepsilon\beta(\vec{E} \times \vec{B})_x\end{aligned}$$

onde o índice subscrito x indica que estamos tomando a norma da componente nesta direção. A partir dessa expressão podemos verificar a expressão de energia, somando os quadrados das componentes dos campos elétricos e magnéticos:

$$\sum f'^2 + \sum \alpha'^2 = \sum f^2 + \sum \alpha^2 + 4\varepsilon(g\gamma - h\beta)$$

Que na notação atualmente empregada no eletromagnetismo, toma a seguinte forma:

$$\varepsilon E'^2 + \frac{B'^2}{\mu} = \varepsilon E^2 + \frac{B^2}{\mu} - 4\varepsilon\beta(\vec{E} \times \vec{B})_x$$

Se subtrairmos, mostramos que esta transformação é invariante:

$$\sum f'^2 - \sum \alpha'^2 = \sum f^2 - \sum \alpha^2 + 2\varepsilon(g\gamma - h\beta) - 2\varepsilon(g\gamma - h\beta)$$

E, portanto:

$$\sum f'^2 - \sum \alpha'^2 = \sum f^2 + \sum \alpha^2$$

Em notação moderna, precisamos levar em consideração os fatores de permissividade elétrica e permeabilidade elétrica e realizando as simplificações, obtemos a expressão equivalente à obtida por Poincaré:

$$\varepsilon E'^2 - \frac{B'^2}{\mu} = \varepsilon E^2 - \frac{B^2}{\mu}$$

Como Poincaré irá demonstrar no próximo parágrafo, a invariância das equações de Maxwell sobre as transformações de Lorentz são uma consequência do princípio da relatividade e do grupo de Lorentz, que permite a construção de um espaço-tempo quadridimensional.

5.7. O Grupo de Lorentz

Uma das contribuições mais significativas de Poincaré para teoria da relatividade foi a descoberta do grupo de Lorentz³⁸. Alguns autores atribuem essa ideia à Albert Einstein, possivelmente motivados por uma célebre afirmação de Abraham Pais em Sútíl é o Senhor: “evidentemente, ele não sabia que, algumas semanas antes, outra pessoa [Albert Einstein] notara independentemente as propriedades do grupo de transformações de Lorentz e derivara por um argumento quase idêntico” (PAIS, 1982, p. 130). Mas como observa Logunov, essa afirmação é completamente anacrônica:

Mas tudo isso é absolutamente incorreto. O artigo [Sur la dynamique de l'électron] de H. Poincaré apareceu em “Comptes Rendus” em 5 de junho de 1905, ao passo que o artigo de A. Einstein foi enviado à editora em 30 de junho de 1905. H. Poincaré, descoberto o grupo e nomeou-o como grupo de Lorentz. Ele escreveu no artigo: “*Todas essas transformações, juntamente com todas as rotações, devem formar um grupo*”. Nos artigos [Sur la dynamique de l'électron] de H. Poincaré, as propriedades do grupo são amplamente utilizadas para a construção de quantidades físicas quadridimensionais, fornecendo a invariância de equações eletrodinâmicas sob o grupo de Lorentz. Enquanto no artigo de A. Einstein apenas o seguinte é dito: “*a partir disso, vemos que tais transformações paralelas formam um grupo - como de fato precisam*”. Não há outra palavra sobre o grupo no artigo de Einstein. (LOGUNOV, 2004, p. 130)

³⁸ Embora seja *arriscado* qualificar uma contribuição científica, o grupo de Lorentz pode ser destacado, já que todo conteúdo qualitativo e quantitativo da teoria da relatividade pode ser extraído desse grupo e sua respectiva álgebra de Lie (JOSIPOVIC, 2019).

É importante observarmos que na época em que Poincaré escreveu seu paper, poucos físicos (e até mesmo matemáticos) estavam familiarizados com a teoria de grupos (PYENSON, 1980), Poincaré era um dos maiores especialistas sobre grupos (KESWANI, 1967). Como vimos, o grupo de deslocamentos foi fundamental no estabelecimento do princípio da relatividade (POINCARÉ, 1899a, 1902a). E agora Poincaré utilizaria esse formalismo para extrair importantes propriedades que só seriam redescobertas três anos depois com os trabalhos do físico-matemático lituano Hermann Minkowski.

Esta parte do trabalho do Poincaré deve ser analisada com mais detalhes. É a partir do grupo de Lorentz que Poincaré vai construir conceitos fundamentais da relatividade restrita e da relatividade geral, como por exemplo: conceito de espaço-tempo, mostrar que a única eletrodinâmica compatível com o princípio da relatividade é a de Lorentz, enunciar que as grandezas dinâmicas da física devem ser expressas em quantidades quadrimensionais, mostrar que não existe referencial privilegiado e achar a base para seu programa de gravitação relativística. Poincaré começa sua análise apresentando as quantidades que serão estudadas (POINCARÉ, 1906, p. 144-145):

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{array}{llll} x' = kl(x + \varepsilon t) & y' = ly & z' = lz & t' = kl(t + \varepsilon x) \\ x'' = k'l'(x' + \varepsilon' t') & y'' = l'y' & z'' = l'z' & t'' = k'l'(t' + \varepsilon' x') \\ k^{-2} = 1 - \varepsilon^2 & k'^{-2} = 1 - \varepsilon'^2 & & \end{array} \right. \end{aligned}$$

Substituindo as relações estabelecidas na primeira equação na segunda equação, obtemos (POINCARÉ, 1906, p. 145):

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{array}{llll} x'' = k''l''(x + \varepsilon''t) & y'' = l''y & z'' = l''z & t'' = k''l''(t + \varepsilon''x) \\ \varepsilon'' = \frac{\varepsilon + \varepsilon'}{1 + \varepsilon\varepsilon'} & l'' = ll' & k'' = kk'(1 + \varepsilon\varepsilon') = \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon''^2}} & \end{array} \right. \end{aligned}$$

Portanto a aplicação contínua de uma transformação de Lorentz gera uma nova transformação de Lorentz. Esse resultado pode ser interpretado da seguinte forma:

Assim, estabelecemos que a transição do sistema de referência x^v para o sistema de referência x''^v e, subsequentemente, para o sistema de referência x'''^v é equivalente à transição direta do sistema de referência x^v para o sistema de referência x'''^v . Precisamente neste caso, pode-se dizer que as transformações de Lorentz formam um grupo. **Poincaré descobriu este grupo e nomeou-o grupo Lorentz. Ele encontrou os geradores de grupo e construiu a álgebra de Lie do grupo Lorentz. Poincaré foi o primeiro a estabelecer que, para a invariância universal das leis da Natureza com respeito às transformações de Lorentz para se manter válidas, é necessário que os campos físicos e outras características cinemáticas e dinâmicas formem um conjunto de quantidades que se transformam sob as transformações de Lorentz de acordo com o grupo, ou, para ser mais preciso, de acordo com uma das representações do grupo de Lorentz (LOGUNOV, 2004, p. 81)**

À seguir, Poincaré supõe que o fator $l = 1$ e o fator ε é infinitamente pequeno, o que implica que o fator de Lorentz é igual a unidade ($k = 1$), e procura pelos geradoras do grupo. Para isso Poincaré toma os acréscimos diferenciais das quatro coordenadas:

$$x' = x + \delta x, \quad y' = y + \delta y, \quad z' = z + \delta z, \quad t' = t + \delta t$$

Como observamos no começo da análise desse artigo, o símbolo delta aqui não indica as variações, mas ao acréscimo infinitesimal. Como l e k são iguais a unidade, as transformações de Lorentz se tornam:

$$\begin{cases} x' = (x - \varepsilon t) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = (t - \varepsilon x) \end{cases}$$

Substituindo estes resultados nas equações dos acréscimos diferenciais δ , Poincaré chega as seguintes relações:

$$\delta x = \varepsilon t, \quad \delta y = \delta z = 0, \quad \delta t = \varepsilon x$$

que é o gerador infinitesimal do grupo de transformação, que Poincaré denomina de transformação T_1 , e que pode ser escrito na notação de Lie da seguinte forma:

$$t \frac{d\varphi}{dx} + x \frac{d\varphi}{dt} = T_1$$

ou em notação moderna:

$$t \frac{\partial \varphi}{\partial x} + x \frac{\partial \varphi}{\partial t} = T_1 \circ \varphi$$

Essa transformação T_1 atualmente é conhecida como “boost” de Lorentz na direção x e é um dos dez vetores de Killing, ou isometrias, do espaço-tempo de Minkowski. Discutiremos essa importante conexão do grupo de Lorentz, descoberto por Poincaré, com as equações de Killing, um pouco mais à frente.

À seguir, Poincaré supõe que l e ε são variáveis independentes e que em especial $\varepsilon = 0$. Definindo o acréscimo infinitesimal do fator l como: $l = 1 + \delta l$. Poincaré obtém as seguintes equações:

$$\begin{cases} \delta x = x \delta l \\ \delta y = y \delta l \\ \delta z = z \delta l \\ \delta t = t \delta l \end{cases}$$

e destas transformações infinitesimal Poincaré um novo grupo cuja transformação infinitesimal, com a notação de Lie, é dada por:

$$T_0 = x \frac{d\varphi}{dx} + y \frac{d\varphi}{dy} + z \frac{d\varphi}{dz} + t \frac{d\varphi}{dt}$$

Poincaré argumenta que atribuindo aos eixos y ou z o mesmo papel foi atribuído o eixo x ; assim, pode-se obter duas outras transformações infinitesimais (boosts de Lorentz) que mantêm a forma das equações de Lorentz:

$$T_2 = t \frac{d\varphi}{dy} + y \frac{d\varphi}{dt} \quad \text{e} \quad T_3 = t \frac{d\varphi}{dz} + z \frac{d\varphi}{dt}$$

Após obter estas transformações, Poincaré propõe a construção de uma álgebra de Lie. Formalmente definimos uma álgebra de Lie como:

Uma **álgebra de Lie real ou complexa de dimensão finita** é um espaço vetorial real ou complexo de dimensão finita $\mathfrak{g}$, juntamente com um mapa $[\cdot, \cdot]$ de $\mathfrak{g} \times \mathfrak{g}$ em $\mathfrak{g}$, com as seguintes propriedades: 1. $[\cdot, \cdot]$ é bilinear. 2. $[\cdot, \cdot]$ é antissimétrica: $[X, Y] = -[Y, X]$ para todos os $X, Y \in \mathfrak{g}$. 3. A **identidade de Jacobi** é válida: $[X, [Y, Z]] + [Y, [Z, X]] + [Z, [X, Y]] = 0$ para todos os $X; Y; Z \in \mathfrak{g}$. Dois elementos X e Y de uma álgebra de Lie $\mathfrak{g}$ **comutam** se $[X, Y] = 0$. Uma álgebra de Lie $\mathfrak{g}$ é **comutativa** se $[X, Y] = 0$ para todos os $X; Y \in \mathfrak{g}$. O mapa $[\cdot, \cdot]$ é chamado como a operação de suporte em $\mathfrak{g}$. Note também que a Condição 2 implica que $[X, X] = 0$ para todos os $X \in \mathfrak{g}$. A operação de **colchetes** em uma álgebra de Lie não é, em geral, associativa; no entanto, a identidade de Jacobi pode ser vista como um substituto para a associatividade (HALL, 2015, p. 49).

Tendo em vista essa definição, Poincaré constrói o seguinte gerador do grupo de Lorentz:

$$[T_1, T_2] = x \frac{d\varphi}{dy} - y \frac{d\varphi}{dx}$$

Que representam as rotações infinitesimais em torno de um eixo fixo, como observa Poincaré:

Mas é fácil ver que essa transformação é equivalente a uma mudança de coordenadas, os eixos estão girando um ângulo muito pequeno em torno do eixo z . Não devemos nos surpreender que essa mudança não altere a forma das equações de Lorentz, obviamente independente da escolha dos eixos. Somos assim levados a considerar um grupo contínuo que chamamos de grupo de Lorentz e que admitem transformações infinitesimais: 1º - a transformação T_0 que é permutável com todas as outras; 2º - as três transformações T_1, T_2, T_3 ; 3º - as três rotações $[T_1, T_2], [T_2, T_3], [T_3, T_1]$. (POINCARÉ, 1906, p. 145-146)

Formalmente, Poincaré mostrou que o grupo de Lorentz é um grupo $SO(1,3)$ com uma álgebra de Lie $\mathfrak{so}(1,3)$ com representação matricial: $\mathfrak{so}(1,3) = \left\{ 4 \times 4 \begin{pmatrix} a_{ij} \end{pmatrix} \mid e^{tX} \in SO(1,3) \forall t \in \mathbb{R} \right\}$. Destas propriedades segue que qualquer transformação do grupo de Lorentz sempre pode ser decomposta na seguinte transformação:

$$\begin{cases} x' = lx & y' = ly & z' = lz & t' = lt \end{cases}$$

E em qualquer transformação linear que não altere a forma quadrática

$$x^2 + y^2 + z^2 - t^2$$

É neste momento que Poincaré introduz pela primeira vez o invariante que, em sua forma diferencial, convencionou-se chamar de métrica de Minkowski e permite estabelecer uma variedade pseudo-euclidiana chamada de espaço-tempo. Neste trabalho, por uma questão de justiça histórica adotaremos o nome métrica de Poincaré-Minkowski.

Para encerrar sua análise, Poincaré demonstra que o fator l no grupo de Lorentz (que ele chama de grupo P) deve ser igual a unidade. Inicialmente ele considera uma transformação da seguinte forma:

$$x' = kl(x + \varepsilon t) \quad y' = ly \quad z' = lz \quad t' = kl(t + \varepsilon x)$$

Para conseguir obter o valor de l , Poincaré utiliza o seguinte argumento:

Devemos assumir que l é uma função de ε , e é uma questão de escolher esta função de tal forma que essa parte do grupo que eu chamo de P ainda forme um grupo. Vamos rodar o sistema 180° em torno do eixo y , devemos encontrar uma transformação que ainda pertencente a P . Mas isso equivale a uma mudança de sinal de x , x' , z e z' . (POINCARÉ, 1906, p. 146)

Realizando a rotação de 180° , as transformações se tornam:

$$x' = kl(x - \varepsilon t) \quad y' = ly \quad z' = lz \quad t' = kl(t - \varepsilon x)$$

Desta rotação, Poincaré conclui que l não sofre alterações quando invertemos ε para $-\varepsilon$. Isso mostra que o espaço-tempo é isotrópico, isto é, não existe uma direção privilegiada. A continuidade do grupo de Lorentz permite concluir que o espaço-tempo é um contínuo e homogêneo. Como observa Logunov, essa é característica que permite concluir que a luz no vácuo se propaga com a mesma velocidade em todas as direções e que permite estabelecer importantes simetrias na Teoria da Relatividade Especial.

Agora Poincaré observa que se P é um grupo, então a substituição inversa também é um grupo. Isso significa que a transformação

$$x' = \frac{k}{l}(x - \varepsilon t) \quad y' = \frac{y}{l} \quad z' = \frac{z}{l} \quad t' = \frac{k}{l}(t - \varepsilon x)$$

Também deve pertencer a P ; isso significa que as transformações rotacionadas e inversas devem ser iguais:

$$kl(x - \varepsilon t) = \frac{k}{l}(x - \varepsilon t) \quad ly = \frac{y}{l} \quad lz = \frac{z}{l} \quad kl(t - \varepsilon x) = \frac{k}{l}(t - \varepsilon x)$$

Todas estas igualdades levam a seguinte equação para l :

$$l = \frac{1}{l}$$

cujos resultados possíveis são $l = +1$ ou $l = -1$. A isotropia do espaço exige que descartemos o valor negativo. Portanto, devemos ter $l = 1$.

Sobre a descoberta do grupo de Lorentz por Poincaré, Logunov faz a seguinte observação:

Se alguém refletir sobre as palavras de H. Poincaré, pode-se perceber imediatamente a profundidade de sua penetração na essência da relatividade física e a relação entre geometria e grupo. Precisamente assim, a partir da invariabilidade das equações de Maxwell-Lorentz sob as transformações do grupo de Lorentz, que forneceu consistência com o princípio da relatividade física, H. Poincaré descobriu a geometria do espaço-tempo, determinada pelo invariante $[x^2 + y^2 + z^2 - t^2]$. Tal espaço-tempo possui as propriedades de homogeneidade e isotropia. Reflete a existência na Natureza das leis fundamentais de conservação de energia, momentum e momento angular para um sistema fechado. Assim, a “nova convenção” não é arbitrária, é baseada nas leis fundamentais da natureza. (LOGUNOV, 2004, p. 101)

Miller (1973) atesta que Einstein teria deduzido, usando argumentos físicos de simetria, o grupo de Lorentz. Essa afirmação é incorreta, pois Einstein apenas conseguiu obter corretamente o valor da função l e as transformações de Lorentz para um caso particular, mas que assumiu como sendo válido para o caso geral. Além disso, Logunov (2004, p. 54-55), acrescenta que:

A. Einstein não observou que o princípio da relatividade juntamente com a eletrodinâmica obrigatória requer uma construção de grandezas físicas quadridimensionais, de acordo com o grupo de Lorentz. Como resultado, isso requer a presença dos invariantes do grupo, testemunhando a geometria pseudo-euclidiana do espaço-tempo. Apenas devido a isso Einstein não conseguiu encontrar equações relativistas da mecânica, porque ele não descobriu a lei da transformação para a força de Lorentz. Ele também não entendeu que a energia e o momento de uma partícula constituem uma quantidade unificada e que se transformam sob as transformações de Lorentz da mesma maneira que ct, x, y, z .

Nas próximas sessões veremos como Poincaré constrói uma dinâmica do elétron com o grupo de Lorentz, obtém as grandezas físicas em função das componentes de um 4-vetor e cria um programa de gravitação relativística, dez anos antes da elaboração da relatividade geral.

5.7.1. Grupo de Lorentz e as Isometrias no Espaço-Tempo

Os seis geradores do grupo homogêneo de Lorentz, correspondem a seis vetores dos dez vetores do Killing, no espaço-tempo de Poincaré-Minkowski. Isso é uma consequência natural da construção de uma álgebra de Lie sobre essa variedade. Podemos

definir a álgebra matricial de um grupo de Lie para a variedade espaço-tempo, como o grupo $SO(1,3)$, cuja álgebra de Lie $so(1,3)$ é definida pela seguinte relação (HALL, 2015):

$$so(1,3) = \left\{ 4 \times 4 \begin{pmatrix} a_{ij} \end{pmatrix} \mid e^{tX} \in SO(1,3) \quad \forall t \in \mathbb{R} \right\}$$

Para a métrica diagonal do espaço-tempo, $\eta_{ab} = (1, -1, -1, -1)$, a matriz da álgebra $so(1,3)$ apresenta a seguinte forma:

$$so(1,3) = \begin{pmatrix} 0 & n_{01} & n_{02} & n_{03} \\ -n_{01} & 0 & n_{12} & n_{13} \\ -n_{02} & -n_{12} & 0 & n_{23} \\ -n_{03} & -n_{13} & -n_{23} & 0 \end{pmatrix}$$

Para verificar que os geradores do grupo de Lorentz correspondem aos geradores das rotações no espaço-tempo, tomemos o transporte de Lie que preserva a métrica da variedade ao longo da congruência em um campo vetorial U^c sobre uma variedade diferenciável M (RODRIGUES, 2009):

$$\mathcal{L}_U(g_{ab}) = 0$$

Calculemos a derivada de Lie do tensor métrico (RODRIGUES, 2009):

$$\mathcal{L}_U(g_{ab}) = U^c \nabla_c(g_{ab}) + g_{cb} \nabla_a U^c + g_{ac} \nabla_b U^c$$

onde ∇_i é a conexão linear ou derivada covariante, conforme definida por Bassalo e Cattani (2009).

Pelo Lema de Ricci, no cálculo da derivada covariante, o tensor métrico opera como uma constante (SANCHEZ, 2009), isso significa que a primeira derivada covariante é nula e as outras duas podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\mathcal{L}_U(g_{ab}) = \nabla_a(g_{cb} U^c) + \nabla_b(g_{ac} U^c)$$

Nestas circunstâncias o tensor métrico atua como operador de rebaixamento dos índices do vetor U^c . levando isso em consideração e igualando a equação a zero, obtemos:

$$\nabla_a U_b + \nabla_b U_a = 0$$

Que é a equação de Killing, cujas soluções U_i são cartas que definem um atlas de isomerias da variedade. Estas cartas também são chamadas de vetores de Killing (BASSALO, CATTANI, 2009). Poincaré construiu o espaço-tempo plano, de forma que um elemento de linha tenha a seguinte forma:

$$ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Como todos os elementos da métrica são constantes, as conexões afins (ou símbolos de Christoffel de segundo tipo) são todos nulos. Nesse caso especial, a derivada covariante coincide com a derivada parcial e a equação de Killing se torna:

$$\partial_a U_b + \partial_b U_a = 0$$

cuja solução geral é dada por³⁹:

$$U_a = \xi_a + n_{ab} x^b$$

onde ξ_i são os 4-vetores da base do espaço-tempo de Poincaré-Minkowski,

$$\xi_a = \begin{cases} \xi_0 = (+1, 0, 0, 0) & \xi_2 = (0, 0, -1, 0) \\ \xi_1 = (0, -1, 0, 0) & \xi_3 = (0, 0, 0, -1) \end{cases}$$

e n_{ij} é uma matriz de rotação sobre os eixos, com componentes constantes. Para obtermos as componentes da matriz, vamos substituir a solução geral na equação de Killing:

$$\partial_a (\xi_b + n_{ba} x^a) + \partial_b (\xi_a + n_{ab} x^a) = 0$$

como os 4-vetores da base são constantes suas derivadas são nulas. Assim, nossa equação se torna:

$$n_{ba} \partial_a (x^b) + n_{ab} \partial_b (x^a) = 0$$

as derivadas parciais das coordenadas x^j são os tensores mistos de Kroenecker:

$$n_{ba} \delta_a^b + n_{ab} \delta_b^a = 0$$

$$n_{ab} = -n_{ba}$$

que mostra que a matriz de rotação é antissimétrica e tem a seguinte estrutura:

$$n_{bc} = \begin{pmatrix} 0 & n_{01} & n_{02} & n_{03} \\ -n_{01} & 0 & n_{12} & n_{13} \\ -n_{02} & -n_{12} & 0 & n_{23} \\ -n_{03} & -n_{13} & -n_{23} & 0 \end{pmatrix}$$

que é a matriz $so(1,3)$ para essa variedade, correspondente ao grupo de Lorentz $SO(1,3)$, descoberto por Poincaré em 1905. Portanto os geradores do grupo de Lorentz são os vetores de Killing do espaço-tempo plano. Vamos verificar esse resultando calculando estes vetores de Killing. Para isso fixaremos uma direção no espaço-tempo e

³⁹ A obtenção formal desta solução é bastante extensa e pouco intuitiva, por isso ela foi colocada nos anexos deste trabalho. Acharmos necessário apresentar sua solução como anexo ao leitor, pois desconhecemos alguma obra que apresente esta solução detalhadamente.

escolheremos e procuraremos os geradores infinitesimais. Assim, as soluções que procuramos apresentam a seguinte forma matricial (KAY, 2003, HALL, 2015):

$$U_{(bc)} = (\eta^{ab} n_{bc} x^c) \partial_a$$

colocamos os índices em parêntesis para deixar claro ao leitor que não se tratam do rank do tensor, mas apenas uma notação prática que adotaremos. O tensor η^{ab} representa a métrica de Poincaré-Minkowski. A matriz n_{bc} deve ser construída para cada direção fixada. Começamos fixando a direção z (que corresponde ao índice 3) e analisemos o que ocorre na direção x (que corresponde ao índice 1) e na direção y (que corresponde ao índice 2).

$$\begin{aligned} n_{12} &= +1 & n_{21} &= -1 \\ \text{Demais entradas} &= 0 \end{aligned}$$

Escolhemos a unidade, pois as entradas da matriz na direção de x e y são arbitrárias, pois como a equação de Killing é linear, qualquer combinação linear das soluções é uma solução, e como estamos interessados apenas no que ocorre nos eixos x e y , as entradas correspondentes a z e t devem ser nulas. Assim, temos a seguinte matriz:

$$n_{bc} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Então, o vetor de Killing $U_{(bc)}$ será determinado pela seguinte equação matricial:

$$U_{(12)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial_t \\ \partial_x \\ \partial_y \\ \partial_z \end{pmatrix}^T$$

Operando as matrizes quadradas, obtemos o seguinte valor:

$$U_{(12)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial_t \\ \partial_x \\ \partial_y \\ \partial_z \end{pmatrix}^T$$

$$U_{(12)} = \begin{pmatrix} 0 \\ -y \\ x \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial_t \\ \partial_x \\ \partial_y \\ \partial_z \end{pmatrix}^T$$

O cálculo de uma matriz coluna por uma matriz linha é o equivalente ao produto canônico de E^n , desta forma obtemos o seguinte vetor de Killing.

$$U_{(12)} = -y\partial_x + x\partial_y$$

E na notação convencional do cálculo elementar:

$$U_{(12)} = x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x}$$

que corresponde a uma rotação em relação ao eixo fixo z . Realizando o mesmo processo para os demais eixos, obtemos os seguintes vetores de Killing:

$$U_{(23)} = y \frac{\partial}{\partial z} - z \frac{\partial}{\partial y} \quad \text{e} \quad U_{(31)} = z \frac{\partial}{\partial x} - x \frac{\partial}{\partial z}$$

que correspondem a rotações em relação ao eixo x e ao eixo y , respectivamente.

Se nossos geradores incluem a direção t e uma direção espacial x^α , nós obtemos os boosts de Lorentz na direção x^α . A construção da matriz de rotação e os cálculos são precisamente os mesmos, por isso não iremos repeti-los. Assim, o boost de Lorentz na direção x é dado por:

$$U_{(01)} = x \frac{\partial}{\partial t} + t \frac{\partial}{\partial x}$$

E os boosts de Lorentz na direção y e na direção z , são respectivamente:

$$U_{(02)} = y \frac{\partial}{\partial t} + t \frac{\partial}{\partial y} \quad \text{e} \quad U_{(03)} = z \frac{\partial}{\partial t} + t \frac{\partial}{\partial z}$$

que são exatamente os geradores do grupo homogêneo de Lorentz descoberto por Poincaré em 1905. Registre que o atlas completo, com dez cartas, de isometrias do espaço-tempo é o grupo não homogêneo de Lorentz ou grupo de Poincaré, que foi descoberto por H. Minkowski em 1908, em *"Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern"*. Abaixo apresentamos os elementos do grupo de Lorentz e os elementos do grupo de Poincaré.

<i>Translações</i>	<i>Rotações</i>	<i>Boosts</i>
$\underline{e}_{(00)} = (+1, 0, 0, 0)$	$U_{(12)} = x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x}$	$U_{(01)} = x \frac{\partial}{\partial t} + t \frac{\partial}{\partial x}$
$\underline{e}_{(11)} = (0, -1, 0, 0)$	$U_{(23)} = y \frac{\partial}{\partial z} - z \frac{\partial}{\partial y}$	$U_{(02)} = y \frac{\partial}{\partial t} + t \frac{\partial}{\partial y}$
$\underline{e}_{(22)} = (0, 0, -1, 0)$	$U_{(31)} = z \frac{\partial}{\partial x} - x \frac{\partial}{\partial z}$	$U_{(03)} = z \frac{\partial}{\partial t} + t \frac{\partial}{\partial z}$
$\underline{e}_{(33)} = (0, 0, 0, -1)$	Grupo de Lorentz	

Grupo de Poincaré

É fácil ver que o grupo de Lorentz é um subgrupo do grupo de Poincaré.

5.8. Ondas de Langevin

Neste parágrafo, Poincaré mostra que é possível deduzir, a partir das transformações de Lorentz, as ondas de velocidade e as ondas de aceleração de um elétron, que haviam disso descobertas por P. Langevin, em 1905, em um ensaio chamado: "*Sur l'origine des radiations et l'inertie electromagnetique*". Naquela época, o trabalho de Langevin era bem conhecido, por isso Poincaré não contextualiza o seu leitor (MILLER, 1973). Porém, atualmente, essa contribuição de Langevin caiu no ostracismo, por isso convém discutirmos brevemente do que se tratava o trabalho de Langevin sobre as ondas de velocidade e aceleração.

LANGEVIN demonstrou, utilizando os potenciais LIENARD-WIECHERT, que os campos elétrico e magnético de uma carga pontual móvel (uma carga cujas dimensões são insignificantes comparadas a todas as outras distâncias que entram no problema) são compostos de duas partes: a onda de velocidade, dependente a velocidade do elétron; a onda de aceleração, dependente da aceleração do elétron. A energia devido à onda de velocidade depende da distribuição de carga: i. e. a massa eletromagnética é independente da aceleração, concentra-se na vizinhança do elétron e é transportada junto com ela. A energia devida à onda de aceleração é independente da distribuição de carga, assim como a posição do ponto de observação, e é diretamente proporcional ao quadrado da aceleração do elétron. Consequentemente, é a energia irradiada pelo elétron. Além dessas duas ondas, há uma terceira que resulta da interferência entre as ondas de velocidade e aceleração. (MILLER, 1973, p. 101)

Poincaré se preocupa em estudar as ondas de velocidade e de aceleração e não faz qualquer referência as ondas de interferência. Esse fato é compreensível, pois uma vez

que as outras duas ondas forem deduzidas, o trabalho de composição da terceira onda não depende dos detalhes da teoria. Portanto, bastaria Poincaré deduzir os aspectos básicos da teoria de Langevin usando a teoria de Lorentz, para garantir a validade os demais resultados. Poincaré começa a sua análise estudando a teoria de Langevin a partir os potenciais de retardo que atuam sobre uma carga em movimento. Depois de mostrar que as derivadas parciais dos potenciais vetor e escalar tanto da velocidade quanto da aceleração, Poincaré escreve:

Langevin foi assim conduzido a distinguir os termos do campo elétrico e magnético que não dependem da aceleração (isto é o que ele chama de onda de velocidade) e aqueles que são proporcionais à aceleração (é o que ele chama de onda de aceleração). O cálculo dessas duas ondas é facilitado pela transformação de Lorentz. Na verdade, podemos aplicar essa transformação ao sistema, de modo que a velocidade do único elétron em consideração se torne zero. (POINCARÉ, 1906, p. 148)

A partir deste ponto, Poincaré analisa o movimento quase-estacionário usando as transformações de Lorentz para passar de um referencial S para um referencial S' em que o elétron esteja em repouso. Primeiro Poincaré propõe obter a expressão de Langevin para a onda de velocidade. Para tornar o estudo ainda mais simples, ele usa o seguinte argumento:

Podemos, portanto, reduzir o cálculo das duas ondas para o caso em que a velocidade do elétron é zero. Vamos começar com a onda de velocidade, primeiro observamos que essa onda é a mesma se o elétron estiver em movimento retilíneo uniforme. (POINCARÉ, 1906, p. 148)

Depois de realizar toda a análise, Poincaré usa a transformação de Lorentz inversa, e retorna ao referencial S e obtém as expressões para onda de velocidade.

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0, \quad \beta = \varepsilon h, \quad \gamma = -\varepsilon g, \\ \frac{\mu_1 k l^3}{4\pi r'^3} (x + \varepsilon t - x_1 - \varepsilon t_1), \\ \frac{\mu_1 k l^3}{4\pi r'^3} (y - y_1), \\ \frac{\mu_1 k l^3}{4\pi r'^3} (z - z_1) \end{array} \right.$$

Agora Poincaré precisa estudar a onda de aceleração de Langevin. Para tal, ele usa um artifício semelhante ao empregado a onda de velocidade:

Tomando a onda de aceleração, podemos, através da transformação de Lorentz, reduzir sua determinação no caso de velocidade zero. Este é o caso se imaginarmos um elétron cuja amplitude de oscilação é muito pequena, mas muito rápida, de modo que os deslocamentos e as velocidades são muito menores, mas as acelerações estão finalizadas.

Nós, portanto, voltamos ao campo que foi estudado no famoso trabalho de Hertz intitulado *Die Kräfte elektrischer Schwingungen nach der Maxwell'schen Theorie*, e isso para um ponto a uma grande distância. Nessas condições: 1° Tanto os campos elétricos como os magnéticos são iguais. 2° Eles são perpendiculares uns aos outros. 3° São perpendiculares ao vetor normal da onda esférica, ou seja, à esfera cujo centro é o ponto. Eu digo que essas três propriedades permanecerão, mesmo que a velocidade não seja zero, e para isso basta mostrar que elas não são alteradas pela transformação de Lorentz. (POINCARÉ, 1906, p. 148)

A análise leva Poincaré que as propriedades ondas de aceleração são invariantes de Lorentz. Ele demonstra essas particularidades usando a homogeneidade do espaço.

Assim, em um ponto muito distante, uma onda de aceleração é predominante e, portanto, pode ser considerada como sendo semelhante à onda total. Além disso, a lei de homogeneidade mostra que a onda de aceleração é semelhante a si própria à distância e em qualquer ponto. É, portanto, em qualquer ponto, semelhante à onda total em um ponto remoto. Mas em um ponto distante, o distúrbio pode se propagar como ondas planas, de modo que os dois campos sejam iguais, mutuamente perpendiculares e perpendiculares à direção de propagação. (POINCARÉ, 1906, p. 148)

Poincaré termina o parágrafo sem maiores considerações, apenas indicando ao leitor o trabalho de Langevin, *"Sur l'origine des radiations et l'inertie electromagnetique"*. Como observamos, Poincaré sabia que se mostrasse que é possível derivar pela teoria de Lorentz, as ondas de Langevin, então todos resultados que delas resultam estão presentes na teoria de Lorentz.

5.9. Contração dos Elétrons

Como observou Miller (1973), este parágrafo e os próximos dois correspondem ao núcleo do trabalho de Poincaré, pois é onde ele desenvolve sua dinâmica do elétron propriamente dita. Neste parágrafo, Poincaré análise os três modelos sobre a dinâmica do elétron e prova que o único modelo consistente com o princípio da relatividade, é o modelo de Lorentz de 1904. Na versão resumida de 1905, Poincaré resume esse estudo com a seguinte declaração:

Lorentz também foi levado a assumir que o elétron em movimento assume a forma de um esferoide oblato; esta é também a hipótese feita por Langevin, no entanto, enquanto Lorentz assumiu que dois eixos do elipsoide permanecem constantes, o que é consistente com a hipótese $l=1$, Langevin assumiu que o volume permanece constante. Ambos os autores mostraram que essas duas hipóteses são consistentes com os experimentos de Kaufmann, bem como a hipótese original de Abraham (elétron esférico). A hipótese de Langevin teria a vantagem de ser auto-

suficiente, porque basta considerar o elétron como deformável e incompressível, e explicar que ele toma uma forma elipsoidal quando se move. Mas eu mostro, de acordo com Lorentz, que é incapaz de concordar com a impossibilidade de um experimento que mostre o movimento absoluto. Como eu disse isso é porque $l = 1$ é o único caso para o qual todas as transformações de Lorentz formam um grupo. (POINCARÉ, 1905g, p. 1506)

O raciocínio completo empregado por Poincaré é apenas encontrado no paper de 1906. Poincaré inicia o seu sexto parágrafo com a seguinte declaração:

Suponha um único elétron em movimento retilíneo uniforme. Pelo que vimos, podemos, por meio da transformação de Lorentz, reduzir o estudo do campo determinado pelo elétron para o caso em que o elétron está em repouso; A transformação de Lorentz substitui o elétron real em movimento por um elétron ideal sem movimento. (POINCARÉ, 1906, p. 151)

Sobre esta última frase, “substitui o elétron real em movimento por um elétron ideal sem movimento”, Miller (1973) afirma que revela que Poincaré não havia compreendido o significado essencial das transformações de Lorentz e, por conseguinte, da Teoria da Relatividade. Segundo Miller (1973), para Poincaré existiria um referencial real e outro ideal, mas essa afirmação parece ser insustentável com a doutrina do convencionalismo e do princípio da relatividade (LOGUNOV, 2004). É mais provável que a ideia do elétron ideal seja apenas um “abuso de linguagem” para tornar a questão mais simples. Poincaré, usando as transformações de Lorentz, obtém as equações para o campo elétrico e magnético do elétron ideal (em repouso) e o elétron real (em movimento), respectivamente:

$$\begin{cases} \alpha' = \beta' = \gamma' = 0 \\ \alpha = 0, \quad \beta = \varepsilon h, \quad \gamma = -\varepsilon g \end{cases} \quad \begin{cases} f = -\frac{d\psi'}{dx'}, \quad g = -\frac{d\psi'}{dy'}, \quad h = -\frac{d\psi'}{dz'} \\ f = l^2 f', \quad g = kl^2 g', \quad h = kl^2 h' \end{cases}$$

Após escrever essas equações, Poincaré se prepara para estudar as características dinâmicas do elétron em movimento:

Determinemos agora a energia total devido ao movimento do elétron, a ação correspondente e o momento eletromagnético, para calcular a massa eletromagnética do elétron. Para um ponto distante, basta considerar o elétron como reduzido a um único ponto; somos trazidos de volta às equações (04) do § precedente, que geralmente podem ser adequadas. Mas aqui não basta, porque a energia está localizada principalmente nas partes do éter mais próximas do elétron. Sobre este assunto, podemos fazer várias hipóteses. De acordo com o de Abraham, os elétrons são esféricos e não deformáveis. Então, quando aplicamos a transformação de Lorentz quando o elétron real é esférico, o elétron se torna um elipsoide perfeito. (POINCARÉ, 1906, p. 152)

O objetivo de Poincaré é realizar um estudo pioneiro do que ocorre justamente na vizinhança do elétron, sem impor uma condição de que a carga é pontual.

Uma vez que os campos são conhecidos, a energia total do elétron, a LAGRANGIANA (e consequentemente) e o momento podem ser determinados. A massa eletromagnética pode então ser calculada a partir do momento do campo. Os potenciais LIÉNARD-WIECHERT são insuficientes para este cálculo porque levam em conta apenas os pontos de observação suficientemente longe do elétron que aparece como uma carga pontual. No entanto, a porção da energia do elétron em sua vizinhança imediata agora merece estudo. Essa energia, proveniente da onda de velocidade, é assumida como a fonte da massa do elétron. (MILLER, 1973, p. 267)

Após estudar as transformações do elétron real e o elétron ideal, Poincaré observa que a teoria de Lorentz exige que o elétron se contraia na direção do movimento. De acordo com Lorentz, essa contração ocorreria devido a interação do elétron com éter, enquanto para Einstein esse efeito seria cinemático. Sobre essa questão registremos o comentário de Miller (1973, p. 267-268):

A transformação de coordenadas empregada na solução de certos problemas potenciais pode ser interpretada como uma transformação para um sistema fictício S' em que o elétron esférico real é substituído por um imaginário que é dilatado na direção do movimento. Esta é a interpretação que LORENTZ usou para as equações de transformação de acordo com a teoria da relatividade. Similarmente, POINCARÉ interpretou $x' = \gamma(x - vt)$ como produzindo uma dilatação na direção x' e mostrou que a equação para a forma do elétron em S' é K . Como os eixos do elipsóide são klr , lr lr o elipsóide é dilatado na direção do movimento. Isso constitui a teoria de ABRAHAM. No entanto, LORENTZ postulou uma contração na direção do movimento, uma vez que o teorema dos estados correspondentes afirma que o elétron imaginário também deveria ser uma esfera. Portanto, os eixos do elétron real são r/lk , r/l , r/l . Assim, para LORENTZ e POINCARÉ a hipótese de contração é independente da hipótese das equações para a transformação de LORENTZ.

A seguir, Poincaré estabelece as equações para energia longitudinal e a energia transversal e escreve a fórmula geral para a lagrangeana do campo eletromagnético. Por meio das relações de momento canônico, Poincaré consegue estudar as três principais hipóteses sobre a contração do elétron em movimento: o elétron esférico não deformável de Abraham, o elétron contraído com volume constante de Langevin e o elétron contraído arbitrário de Lorentz:

A conclusão é que, se o elétron estiver sujeito a uma ligação entre seus três eixos, e se nenhuma outra força atuar, exceto as forças de ligação, a forma desse elétron, quando é dada uma velocidade uniforme, pode ser tal que o elétron ideal corresponde a uma esfera, exceto o caso em que a ligação é tal que o volume é constante, de acordo com a hipótese

de Langevin. Nós somos levados desta maneira a colocar o seguinte problema: quais forças adicionais, além das forças de ligação, cujas aplicações são necessárias para explicar a lei de Lorentz ou, mais geralmente, qualquer lei que não seja a de Langevin? hipótese mais simples, e a primeira que devemos considerar, é que essas forças adicionais derivam de um potencial especial dependendo dos três eixos do elipsoide e, portanto, em θ e em R. (POINCARÉ, 1906, p. 157).

Poincaré deduz que seu potencial F , que define um campo de tensões denominadas de tensões de Poincaré, é nulo nos modelos de Langevin e Abraham, mas deve ser proporcional a $r^3\theta^2$, na teoria de Lorentz. Com esse novo potencial de natureza não elétrica, soma-o a lagrangeana do campo eletromagnético e toma a variação a ação definida por estes dois termos.

Essa tensão de Poincaré pode ser interpretada como uma pressão negativa sobre o elétron, que o mantém estável. Além disso, o trabalho realizado por essa pressão negativa, obriga subtrair da inércia total do sistema $1/3$. Levando em conta esse fator, as relações massa-energia obtidas por Hasenöhrl e Abraham (MARTINS, 2005), se tornam:

$$m = \frac{4}{3} \frac{E}{c^2} - \frac{1}{3} \frac{E}{c^2} \rightarrow m = \frac{E}{c^2}$$

que é a relação massa-energia usual da teoria da relatividade. Na próxima sessão Poincaré irá estudar melhor essa nova força, a tensão de Poincaré, e provar que o único modelo do elétron compatível com o princípio da relatividade é o de Lorentz. Qualquer outro modelo permitiria detectar o movimento absoluto. Antes de encerrarmos essa seção, gostaríamos de discutir uma afirmação feita por Miller (1973) sobre a análise empregada por Poincaré no estudo da contração do elétron. O historiador faz a seguinte afirmação:

Vimos que essa aparente falta de generalidade da transformação de LORENTZ pode ser rastreada até sua descrição puramente matemática. Foi EINSTEIN, em 1905, quem descobriu o significado da transformação de LORENTZ, derivando-a dos dois postulados de sua teoria. Ele então demonstrou que uma de suas consequências é o fenômeno puramente cinemático da contração de objetos em movimento quando visto de um sistema inercial que está em movimento relativo. (MILLER, 1973, p. 268)

Somos forçados a discordar desta afirmação de Miller, por várias razões. Como provou Fock (1959, p. 377-384), os dois postulados não são suficientes para deduzir as transformações de Lorentz. Essa dedução exige ainda mais dois princípios: o da forma invariante da equação da onda eletromagnética e o princípio da inércia. Mesmo incluindo estes princípios não declarados, Logunov (2004, p. 52-55) mostrou que Einstein não deduziu as transformações de Lorentz para o caso geral:

Mas, mais adiante, no texto do artigo, A. Einstein explora a forma geral das transformações de Lorentz sem justificá-la. A. Einstein não observou que o princípio da relatividade juntamente com a eletrodinâmica obrigatoriamente requer uma construção de grandezas físicas quadridimensionais, de acordo com o grupo de Lorentz. Disso resulta a necessidade da presença dos invariantes do grupo, indicando a geometria pseudo-euclidiana do espaço-tempo. Justamente por isso Einstein não conseguiu encontrar as equações relativistas da mecânica, porque ele não descobriu a lei da transformação para a força de Lorentz. Ele também não entendeu que a energia e o momento de uma partícula constituem uma quantidade unificada e que se transformam sob as transformações de Lorentz da mesma maneira que ct , x , y , z . Deve-se enfatizar especialmente que Einstein, em seu trabalho de 1905, em contraste com Poincaré, não estendeu as transformações de Lorentz a todas as forças da natureza, por exemplo, para a gravitação. (LOGUNOV, 2004, p.55).

Além disso, Einstein utiliza incorretamente as transformações de Lorentz, em algumas passagens de seu artigo, como foi mostrado por Keswani (1965b) e Cullwick (1981). Em seu paper original, Einstein (1905) observa que a forma esférica da onda luminosa é um invariante. Mas quando Einstein discute a transformação de energia por um raio de luz, ele escreve:

Vamos procurar saber qual é a quantidade de energia contida dentro dessa superfície quando ela é observada do sistema k , isto é, qual a energia do complexo luminoso relativamente ao sistema k . Ora, quando é observada do sistema móvel, *a superfície esférica transforma-se em uma superfície elipsoidal*. (Itálico nosso). (EINSTEIN, 1905a, p. 913)

Cullwick (1981) que detectou inconsistências na eletrodinâmica do paper de Einstein. Segundo o historiador esses ocorrem porque Einstein viola duas condições:

Ao usar a Teoria da Relatividade Especial para determinar fenômenos físicos associados a corpos em movimento, duas condições devem ser satisfeitas: (a) Na expressão matemática de uma lei física, somente aquelas medidas físicas relativas a um *determinado* sistema de referência, isto é, o sistema cujas coordenadas são usadas nas equações, deve ser utilizado. (b) Se, para simplificar o problema, o ponto de vista é transformado no sistema de referência em que o corpo em movimento está em repouso, os resultados devem então ser transformados de volta ao sistema original no qual o corpo está se movendo. Em algumas partes de seu artigo, Einstein não conseguiu aderir a essas condições. (CULLWICK, 1981, p. 169)

Foi justamente a violação destas condições que fez Einstein deduzir incorretamente a massa transversal do elétron. Portanto, todas essas considerações pesam contra a afirmação de Miller que Einstein foi o primeiro a compreender as transformações de Lorentz. Podemos até concordar que Poincaré ainda não tivesse compreendido integralmente o significado destas transformadas, mas tão pouco Einstein parece ter tido essa compreensão.

5.10 – Movimento Quase Estacionário

Nesta sessão, Poincaré desenvolve uma análise geral do movimento quase estacionário que permite que ele discuta as diferenças entre os modelos de Abraham, Langevin e Lorentz:

Resta ver se esta hipótese da contração de elétrons reflete a incapacidade de demonstrar movimento absoluto, e começarei por estudar o movimento quase estacionário de um elétron isolado, ou que está sujeito apenas à ação de outros elétrons distantes. Sabe-se que o chamado movimento quase estacionário é o movimento onde as mudanças de velocidade são lentas o suficiente para que a energia elétrica e magnética devido ao movimento do elétron difira pouco do que seria em movimento uniforme; Sabemos também que Abraham derivou as massas eletromagnéticas transversais e longitudinais da noção de movimento quase estacionário. (POINCARÉ, 1906, p. 158)

Podemos resumir o problema central desse parágrafo da seguinte maneira:

O problema é examinar a equação do movimento quase-estacionário de um elétron ou de um que é influenciado pelos campos que surgem de outros elétrons distantes. POINCARÉ observou que a aproximação quase-estacionária corresponde a negligenciar o campo de radiação do elétron, levando em consideração apenas a energia proveniente da onda de velocidade e a onda de reorganização. Esta é a aproximação em que "a energia elétrica e magnética devido ao movimento do elétron difere pouco do que seria para o movimento uniforme". Esta aproximação, que foi originalmente usada pela ABRAHAM (e, como foi notado, é essencial para uma definição inequívoca de massa) é agora examinada em detalhe. (MILLER, 1973, p. 283)

Inicialmente, Poincaré escreve a ação do campo eletromagnético sobre o elétron:

$$H = \frac{1}{2} \int (\sum f^2 - \sum \alpha^2) d\tau$$

onde f são as componentes do campo elétrico e α são as componentes do campo magnético. Por meio das definições de momento canônico D e o módulo da velocidade V do elétron, Poincaré obtém as fórmulas para a massa transversal e massa longitudinal do elétron:

$$m_{\parallel} = \frac{dD}{dV}, \quad m_{\perp} = \frac{D}{V} \quad D = \frac{dH}{dV}$$

A seguir, Poincaré passa a estudar o comportamento do movimento quase estacionário. A análise matemática permite que Poincaré (1906, p. 161) conclua que:

As equações do movimento quase estacionário não são alteradas pela transformação de Lorentz, mas ainda não prova que a hipótese de Lorentz seja a única que leva a esse resultado. Para estabelecer este ponto, nos restringiremos como fez Lorentz, a certos casos particulares;

será obviamente suficiente para nós obtermos uma contra positiva. Como ampliamos as hipóteses subjacentes ao cálculo acima? 1º Em vez de assumir $l = 1$ na transformação de Lorentz, assumimos l arbitrário. 2º Em vez de assumir que F é proporcional o volume e, portanto, que H é proporcional a h , assumimos que F é uma função arbitrária de θ e r , de modo que [depois de substituir θ e r por seus valores como funções de V , a partir das duas primeiras equações] H é qualquer função de V .

Henri Poincaré, começa a procurar quais valores de l satisfazem o princípio da relatividade no movimento quase estacionário. Sua análise leva a seguinte igualdade

$$(\xi + \varepsilon)^{m-1} (1 - \varepsilon^2)^{-\frac{m}{2}} = -\xi^{m-1} (1 - \varepsilon^2)^{-\frac{1}{2}} l^{-2}$$

onde ξ é componente da velocidade do elétron na direção x , m é uma constante a ser determinada e l é uma função de ε (β). Em notação moderna é escrita como:

$$(v_x - \beta)^{m-1} (1 - \beta^2)^{-\frac{m}{2}} = -v_x^{m-1} (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}} l^{-2}$$

Poincaré observa que, como l é uma função apenas de ε , pois se tivermos mais do que um elétron, a função l deve ser a mesma, ainda que a velocidade na direção x , ξ , sejam diferentes. Portanto, essa identidade só é satisfeita com:

$$l = 1 \quad m = 1$$

que corresponde ao modelo de Lorentz.

Assim, a hipótese de Lorentz é a única consistente com a incapacidade de demonstrar movimento absoluto; Se aceitarmos essa impossibilidade, devemos admitir que os elétrons em movimento se contraem e se tornam elipsoides de revolução onde dois eixos permanecem constantes; Deve-se admitir, como mostramos no § anterior, a existência de um potencial adicional que é proporcional ao volume do elétron. A análise de Lorentz é, portanto, totalmente confirmada, mas podemos melhor nos dar conta da verdadeira razão do fato que nos ocupa; e essa razão deve ser buscada nas considerações do §4. *As transformações que não alteram as equações de movimento devem formar um grupo, e isso só pode ocorrer se $l = 1$.* Como não podemos reconhecer se um elétron está em repouso ou em movimento absoluto, é necessário que, quando em movimento, ele sofra uma distorção que deve ser precisamente aquilo que impõe a correspondente transformação do grupo. (POINCARÉ, 1906, p. 164).

Um detalhe bastante interessante, é que neste parágrafo, Poincaré realiza as deduções passo-a-passo, sendo que nos parágrafos anteriores, Poincaré realizava saltos que exigiam que o leitor completasse o raciocínio. Miller (1973, p. 289) apresenta uma possível explicação:

A razão provável para isso é que, tendo em mente o resultado incorreto de LORENTZ, ele queria apontar explicitamente os passos necessários para derivar as equações de transformação de Σ' a S para a aceleração

do elétron. As equações gerais de transformação de POINCARE para a aceleração reduzem-se às de LORENTZ quando, Σ' se torna S' . A apresentação passo a passo do POINCARE sobre este resultado torna desnecessário fornecer detalhes adicionais aqui. O resultado é que as equações de movimento na aproximação quase-estacionária têm as propriedades corretas para uma transformação de LORENTZ; consequentemente, essas equações não podem revelar o movimento absoluto.

Na próxima sessão, Poincaré irá provar, por meio do princípio de mínima ação, que as hipóteses deste parágrafo e a existência de uma força de natureza não elétrica que depende do volume do elétron, permanecem inalteradas quando consideramos o movimento arbitrário.

5.11. Movimento Arbitrário

Neste parágrafo, Poincaré tem dois objetivos: mostrar que os resultados obtidos para um elétron em movimento quase-estacionário são preservados no movimento arbitrário e estudar a natureza do potencial não elétrico que definem o campo das tensões de Poincaré. Para provar que o movimento arbitrário preserva as características fundamentais da teoria de Lorentz para o movimento quase-estacionário, Poincaré escreve a ação do campo eletromagnético:

$$J = \int dt d\tau \left(\frac{\sum f^2}{2} - \frac{\sum \alpha^2}{2} \right)$$

que na notação que empregamos atualmente apresenta a seguinte forma:

$$J = \int dt dV \left[\frac{\varepsilon E^2}{2} - \frac{B^2}{2\mu} \right]$$

por questão de sincronismo, manteremos a notação empregada por Poincaré.

Em seguida Poincaré introduz o termo que representa o potencial adicional F :

$$J_1 = \int dt d\tau \sum (F)$$

Poincaré observa que potencial F é escrito em parêntesis para que não seja confundido com as componentes F, G, H do vetor potencial do campo eletromagnético. A ação total é a soma das ações J e J_1 . Poincaré já provou que a ação J é um invariante de Lorentz, agora ele irá provar que o mesmo é válido para J_1 . Poincaré inicia sua demonstração definindo a seguinte equação geral para o potencial adicional:

$$(F) = \omega_0 \tau$$

onde ω_0 um coeficiente especial do elétron e τ seu volume. Nestas condições,

$$\sum(F) = \int \omega_0 d\tau$$

onde a integral deve ser efetuada sobre todo o espaço, de tal forma que o coeficiente ω_0 se anule para qualquer ponto fora dos elétrons e que para qualquer ponto dentro de cada elétron ω_0 se torne igual ao coeficiente especial daquele elétron. Assim, Poincaré escreve a ação do potencial adicional:

$$J_1 = \int \omega_0 d\tau dt$$

Executando uma transformação de Lorentz, obtemos seguinte integral para a ação:

$$J'_1 = \int \omega'_0 d\tau' dt'$$

Poincaré argumenta que como ω_0 e ω'_0 são coeficientes especiais intrínsecos do elétron, então eles devem se manter invariantes sobre uma transformação de Lorentz. Portanto $\omega_0 = \omega'_0$. Como já foi demonstrado, o jacobiano desta transformação é dado por:

$$d\tau' dt' = l^4 d\tau dt$$

Como Poincaré demonstrou que $l = 1$. Então, a ação no novo referencial, assume a forma:

$$J'_1 = \int \omega_0 d\tau dt \rightarrow J'_1 = J_1$$

o que prova que a ação do potencial adicional é um invariante de Lorentz. Poincaré conclui que:

O teorema é, portanto, geral, nos dá ao mesmo tempo uma solução da questão que colocamos no final do §1: encontrar as forças complementares que não são alteradas pela transformação de Lorentz. O potencial adicional (F) satisfaz esta condição. Então podemos generalizar o resultado anunciado no final do §1 e escrever: *Se a inércia de elétrons é exclusivamente de origem eletromagnética, se eles estão sujeitos apenas a forças de origem eletromagnética ou a forças geradas pelo potencial adicional (F), nenhuma experiência pode demonstrar movimento absoluto.* (POINCARÉ, 1906, p. 165)

Esses resultados são bastante semelhantes aos obtidos anteriormente, mas, como observa Arthur Miller, há diferenças importantes:

Na Seção 1, POINCARÉ demonstrou que um elétron deformável não poderia estar em equilíbrio apenas sob a ação de forças eletromagnéticas. O problema que foi colocado era derivar a forma das forças adicionais necessárias para manter o equilíbrio e ter as propriedades apropriadas sob a transformação de LORENTZ. Por meio de um princípio covariante de menor ação, POINCARÉ provou que a teoria de LORENTZ não poderia ser derivada do puramente eletromagnético LAGRANGIANO (19). Pelo contrário, foi necessário

postular um termo adicional para (19). A forma da energia não eletromagnética F foi obtida exigindo que o elétron seja estável sob uma variação de sua ação. Assumindo uma forma separável para F , POINCARÉ demonstrou que na teoria de LORENTZ, F era proporcional ao volume do elétron. Nesta seção, ele provou que F tinha as propriedades desejadas na transformação LORENTZ. (MILLER, 1973, p. 297)

Após essa demonstração, Poincaré volta a sua atenção em compreender melhor as propriedades do potencial adicional F .

Então, quais são essas forças que geram o potencial (F)? Elas podem, obviamente, ser comparadas a uma pressão que existiria dentro do elétron; tudo ocorre como se cada elétron fosse uma capacidade oca submetida a uma pressão interna constante (independente de volume); O trabalho dessa pressão seria obviamente proporcional às mudanças de volume. Em todo caso, eu preciso observar que essa pressão é negativa. (POINCARÉ, 1906, p. 165)

Poincaré recorda que no parágrafo 6, a expressão para este potencial é dada por:

$$F = Ar^3\theta^2$$

com A tendo sido deduzido por Poincaré no sexto parágrafo, tendo o seguinte valor:

$$A = \frac{a}{3b^4}$$

O fator A é a pressão, que segundo Poincaré deve ser negativa. Por meio dessa expressão, Poincaré se prepara para calcular o valor da massa “experimental” do elétron, isto é, a massa do elétron em baixas velocidades. Para obter esse valor, Poincaré escreve sua lagrangeana e despreza os termos de ordem maior em V/c . Ele obtém a seguinte aproximação para o elétron em baixa velocidade:

$$\mathcal{H} = \frac{a}{b} \left(1 - \frac{V^2}{2} \right)$$

assim tanto a massa longitudinal como transversal valem a/b . Sobre este resultado Poincaré cometa:

Agora a é uma constante numérica que mostra que: *a pressão que gera o nosso potencial adicional é proporcional ao 4ª potência da massa experimental do elétron*. Como a lei de Newton é proporcional à massa experimental, somos tentados a concluir que existe alguma relação entre a causa que gera gravitação e aquela que gera o potencial adicional. (POINCARÉ, 1906, p. 166)

Sobre a dedução de Poincaré, Miller comenta que:

Uma compreensão do significado físico de F teria sido facilitada se POINCARÉ primeiro tivesse avaliado a massa do elétron em termos de a e b , e então tivesse associado uma pressão com F . A forma explícita

de F é necessária para entender o que ela está cancelando. (MILLER, 1973, p. 298)

Outro ponto interessante é que a massa experimental deduzida por Poincaré não coincide com a massa experimental deduzida por Lorentz. A massa de Lorentz é $4/3$ da massa de Poincaré. “Esta declaração é um resultado de observar como H se comporta para $V \ll 1$. É uma declaração peculiar porque, de acordo com a teoria de LORENTZ, a/b não é o valor limite correto para $m_{\parallel}$ e $m_{\perp}$.” (MILLER, 1973, 299).

Sobre este fato, Miller (1973) apresenta duas conjecturas:

1) Poincaré cometeu um equívoco. Ele deveria ter calculado a massa experimental do elétron a partir da seguinte lagrangeana: $H_L = \frac{4}{3} a/b \sqrt{1-V^2}$.

2) Poincaré não cometeu um equívoco, mas percebeu que a definição do momento de Lorentz, $D = \frac{4}{3} m'_e V k$, estava equivocada e deveria ser substituído por $D = m'_e V k$.

Qual destas é a mais sensata? Miller (1973, p. 299) acredita que seja a primeira conjectura.

Estou inclinado para a primeira conjectura, porque nos dias da relatividade pré-EINSTEINIANA não havia razão para se preocupar se a massa eletrostática (massa de repouso) ou algum múltiplo dela ocorria no momento. Supunha-se que o símbolo m no momento representava a "massa experimental". Além disso, era objetivo do POINCARE construir um formalismo LAGRANGIANO para a teoria de LORENTZ, em que o valor de ambos $m_{\parallel}$ e $m_{\perp}$ no limite $V \ll 1$ era $e^2/6\pi r$ e não $e^2/8\pi r$. Além disso, era bem conhecido que $e^2/6\pi r$ era o limite de massa a baixa velocidade para a teoria de ABRAHAM e, em geral, para todas as teorias de elétrons que usavam o momento do campo eletromagnético.

É difícil decidir qual das duas conjecturas é verdadeira. Os argumentos de Miller são razoáveis e seriam muito prováveis se fosse Lorentz, que era um físico mais ortodoxo. Porém Poincaré era um caso à parte. Embora ele pertencesse ao *mainstream* de pesquisadores do século XIX e do século XX, Poincaré mostrava-se cético em relação a alguns tópicos da eletrodinâmica e dava importância a teorias menos ortodoxas como foi caso com Crémieu. Sem outras fontes documentais, é difícil dizer se Poincaré realmente se equivocou. Um argumento em favor da primeira conjectura, é a seguinte observação de Miller:

POINCARÉ finalmente manifesta preocupação com seu uso repetido de símbolos enfatizando que F não deve ser confundido com o componente x do potencial vetor. De fato, parece que "Sur la dynamique ..." foi montado um tanto apressadamente para fornecer apoio à teoria de LORENTZ. (MILLER, 1973, 296).

Se Poincaré realmente estava correndo contra o tempo, não seria absurdo que ele tivesse cometido um equívoco em seu cálculo da massa experimental do elétron. Porém, há um argumento que pesa em favor da segunda hipótese. Há um equívoco sobre a natureza da pressão de Poincaré no *paper* de Junho (POINCARÉ, 1905g, p. 1506):

Mas com a hipótese de Lorentz, a concordância entre as equações não está isolada; obtemos ao mesmo tempo uma possível explicação para a contração do elétron, assumindo que o elétron, deformável e compressível, é submetido a uma pressão externa constante, cujo trabalho é proporcional às mudanças de volume.

Na verdade, a pressão de Poincaré é uma *pressão interna* do elétron e que, por ser negativa, se assemelha como uma pressão externa. Na versão de 1906, submetida à publicação em julho de 1905, Poincaré corrige seu equívoco:

É, portanto, necessário retornar daqui para a teoria de Lorentz; mas se alguém quiser preservá-la e evitar contradições intoleráveis, é necessário supor uma força especial que explica, ao mesmo tempo, a contração e a constância de dois dos eixos. Procurei determinar essa força, descobri que ela pode ser comparada a uma pressão externa constante, atuando sobre o elétron deformável e compressível, e cujo trabalho é proporcional às variações do volume do elétron. (POINCARÉ, 1906, p. 156).

Isso indica que Poincaré tomou um cuidado maior em sua publicação mais longo. Como vimos, boa parte dos resultados desse artigo haviam sido obtidos em maio de 1905. Como Poincaré só submeteu essa versão longa ao *Circolo de Palermo* em julho de 1905, é bastante natural que ele tivesse revisado seu material, com mais cuidado. Portanto, um equívoco no cálculo da massa experimental do elétron não passaria tão facilmente despercebido.

Seja qual for a razão, concordamos com Miller, é difícil mensurar quão longe foi Poincaré. Ele mostrou que não é possível derivar apenas da lagrangeana eletromagnética equações compatíveis com princípio da relatividade, é preciso incluir uma energia suplementar de natureza não eletromagnética, em outras palavras, é preciso construir uma nova teoria mais ampla em conformidade com o princípio da relatividade. Hoje sabemos que esta é a premissa fundamental da teoria da relatividade especial.

5.12. A Gravitação e o Princípio da Relatividade

O último parágrafo do artigo de Poincaré é uma proposta de extensão da covariância de Lorentz para todas as forças da natureza, incluindo a força gravitacional. Nós analisaremos o programa de gravitação de Poincaré com detalhes em uma seção especial,

aqui faremos apenas alguns comentários gerais, tendo em vista a versão de 1905. Sobre a necessidade de se criar uma teoria gravitacional compatível com o princípio da relatividade, Poincaré (1905g, p. 1508) declara:

Era importante examinar esta hipótese mais de perto e, em particular, examinar quais mudanças exigiria que fizéssemos sobre a lei da gravitação. É isso que eu procurei determinar; inicialmente, fui levado a supor que a propagação da gravitação não é instantânea, mas acontece com a velocidade da luz. Isso parece estar em desacordo com os resultados obtida por Laplace, que anunciou que esta propagação é, se não instantânea, pelo menos muito mais rápida que a da luz. Mas, na realidade, a questão colocada por Laplace difere consideravelmente daquilo que nos ocupa aqui. A introdução de uma velocidade finita de propagação foi à única mudança que Laplace introduziu para a lei de Newton. Aqui, pelo contrário, esta mudança é acompanhada por várias outras; é possível, e é o que acontece de fato, que ocorra uma compensação parcial entre eles.

Em Mecânica Celeste, Laplace (1799-1825) havia mostrado que na formulação newtoniana a gravidade deveria ou ser instantânea ou se propagar centenas de vezes mais rápido que a velocidade da luz⁴⁰. Porém, se a gravidade fosse um fenômeno instantâneo, seria possível por meio de sinais gravitacionais, ainda que hipotéticos, violar o princípio da relatividade e garantir a sincronização absoluta de relógios. Portanto, era necessário reformular a teoria da gravitação e exigir que a velocidade de propagação da gravidade seja igual a velocidade da luz. Essa restrição leva a previsão de ondas gravitacionais que se propagam à velocidade da luz no éter.

Quando falamos da posição ou velocidade do corpo atraente, será a posição ou a velocidade no momento em que a *onda gravitacional* deixa o corpo; quando falamos sobre a posição ou a velocidade do corpo atraído, será a posição ou a velocidade no momento em que esse corpo foi atingido e atraído pela onda gravitacional que emana do outro corpo; é claro que o primeiro instante precede o segundo. (POINCARÉ, 1905g, p. 1508).

Poincaré, então determina novas funções gravitacionais que sejam compatíveis com as transformações de Lorentz e calcula os desvios entre seu modelo e o newtoniano.

A diferença para a lei comum da gravitação, como eu disse, é de ordem ξ^2 ; Se assumirmos, como fez Laplace, que a velocidade de propagação é a da luz, essa discrepância é de ordem ξ , isto é, 10.000 vezes maior. Não é, portanto, à primeira vista, absurdo assumir que as observações astronômicas não são precisas o suficiente para detectar uma diferença tão pequena quanto a que imaginamos. Mas isso é algo que somente uma discussão completa nos permitirá decidir. (POINCARÉ, 1905g, p. 1508)

⁴⁰ Para detalhes ver Brown (2015).

Analisaremos o programa da gravitação de Poincaré, além de inovador, ainda precede resultados obtidos por Minkowski, Laue e Planck para teoria da relatividade especial.

5.13. Síntese Fleckiana sobre a Dinâmica do Elétron

Paralelo ao desenvolvimento da cinemática, os avanços eletrodinâmicos encontravam em um estágio bastante avançado, no final do século XIX, três conceitos estavam bem estabelecidos entre os físicos da época (conexões passivas):

- A teoria de Lorentz é incompatível com a terceira lei de Newton.
- O elétron sofre um aumento de sua inércia
- Uma possível relação entre massa e energia.

Embora esses fatos sejam conexões passivas, cada um deles levantava perguntas (conexões ativas) que se tornaram motivo de intensa pesquisa.

- É possível harmonizar a teoria de Lorentz com o princípio da reação?
- É possível estabelecer qual modelo de massa do elétron é mais adequado?
- Qual a relação entre massa e energia?

O diferencial de Poincaré em relação aos seus colegas, principalmente Abraham, Bucherer, Hasenöhrl, Lorentz, Langevin e Larmor, era a sua confiança no princípio da relatividade, que por meio das circulações intercoletivas com a matemática, levaram Poincaré a criar o grupo de Lorentz e a partir dele provar que o único modelo de elétron compatível com o princípio da relatividade era o de Lorentz. A circulação intercoletiva com o coletivo da mecânica dos fluídos, permitiu Poincaré atacar uma objeção de Abraham sobre o elétron de Lorentz: o problema da estabilidade. Ao tratar o elétron como uma massa fluídica em equilíbrio, Poincaré descobriu as tensões de Poincaré. Essa circulação também levou Poincaré a tratar a energia como um fluído fictício e estabelecer a relação $E = mc^2$, cinco anos antes de Einstein. Em suma, as novas conexões passivas de Poincaré para eletrodinâmica foram:

- A teoria de Lorentz é compatível com o princípio da reação se a energia se comportar como um fluído fictício de massa $m = E/c^2$, porém Poincaré considera (a partir de 1904) em rejeitar o princípio da reação.
- O modelo de Lorentz para a transformação da massa do elétron é o único compatível com o princípio da relatividade.

- Existem pressões negativas na superfície do elétron de natureza não eletromagnética que garantem sua estabilidade (pressões de Poincaré).

O poder heurístico do princípio da relatividade iria além da eletrodinâmica, Poincaré sabia que era necessário estudar as consequências desse princípio sobre a gravidade. Seguindo esse princípio, Poincaré iria dar um passo além de Einstein.

6. AS HIPÓTESES SOBRE A GRAVITAÇÃO DE POINCARÉ

Como vimos na seção anterior, depois de analisar as consequências do princípio da relatividade sobre a dinâmica do elétron, Poincaré estuda as consequência deste princípio na gravitação. A preocupação de Poincaré é bastante clara: uma vez que a gravidade se propaga instantaneamente (ou milhões de vezes mais rápido que a luz), seria possível violar o princípio da relatividade e garantir a sincronização absoluta de relógios por meio de sinais gravitacionais. Assim Poincaré precisava buscar modificações na teoria gravitacional de modo a acomodar o princípio da relatividade e mostrar que estas modificações eram compatíveis com os resultados astronômicos conhecidos (dentro da precisão). É importante salientar que Einstein não iria desenvolver um programa para gravitação antes de 1912 e isso torna o programa de Poincaré mais completo.

Ainda assim, a ausência de qualquer tratamento da gravitação na teoria de 1905 de Einstein torna sua discussão da simultaneidade e, portanto, toda a teoria, aberta a dúvidas e objeções, como aquelas que Poincaré levantou em 1904. O tratamento da gravitação fez a teoria relativística de Poincaré de 1905 mais completa que a teoria de Einstein do mesmo ano. (KATZIR, 2005a, p. 30)

Contudo como veremos, que a aceitação do programa de Poincaré poderia se tornar desvantajoso a longo prazo.

No entanto, essa teoria ser mais completa do que a outra não é necessariamente uma vantagem. Poincaré sugeriu uma teoria relativista simples de movimento uniforme que inclui gravitação e concorda com os dados observacionais. O objetivo de Einstein era muito mais ambicioso e, a longo prazo, mais bem-sucedido. A consolidação da gravitação na teoria da relatividade de Poincaré poderia ter desencorajado os físicos de procurar uma teoria alternativa. As exigências de Poincaré da força eram o mínimo necessário para torná-la compatível com o princípio da relatividade e com os dados empíricos conhecidos. Físicos que viram na inclusão da gravitação na nova física relativista uma questão em aberto tinham exigências adicionais que eventualmente levaram a uma teoria muito mais bem-sucedida. Sendo mais completo, menos revolucionário e em melhor acordo com a teoria clássica do que a visão da gravitação de Einstein, o caminho de Poincaré não teria levado à teoria geral da relatividade. Pode-se ter ficado satisfeito com a lei de atração da força indefinida que se propaga pelo espaço. (KATZIR, 2005a, p. 30)

Este é um evento curioso da história da ciência que mostra o caráter não linear da ciência. Esse episódio mostra que nem sempre um programa mais consistente ou mais completo é melhor ou tem maior aceitação da academia. Isso também revela que não é possível reduzir a atividade científica somente a um apanhado de regras objetivas e a

acumulação de conhecimentos. Para entendermos esse episódio analisaremos a versão estendida de 1906, onde Poincaré detalha seu programa para a gravitação, que foi brevemente apresentado na seção anterior a partir de sua comunicação resumida e sem demonstrações de 1905.

6.1. Estado da Arte da Gravitação no Começo do Século XX

A visão popular sobre a história da gravitação nos informa que no final do século XIX os físicos aceitaram a lei da gravitação universal proposta por Isaac Newton, no final do século XVII. A lei de Newton foi verificada em inúmeros testes experimentais e permitiu os astrônomos descobrirem dois novos planetas: Urano e Netuno; porém existia uma anomalia na órbita de Mercúrio que a lei de Newton era incapaz de explicar. A solução desse problema foi dada por Albert Einstein. Inicialmente, Einstein propôs a Teoria da Relatividade Especial (em 1905), que é válida apenas para referenciais não acelerados. Logo após, ele começou a estudar uma forma de estender sua teoria para a gravitação. Somente em 1916, Einstein conseguiu a formular a Teoria da Relatividade Geral que resolveu a anomalia da órbita de Mercúrio e permitiu os físicos preverem a existência de Buracos Negros, Estrelas de Nêutron, Ondas Gravitacionais e originou uma ciência que estuda o Universo, a cosmologia.

Isso, é claro, é apenas a versão didática do que aconteceu. Os historiadores da física sabem que as coisas realmente não acontecem dessa maneira. A relatividade geral foi de fato a teoria gravitacional bem-sucedida, mas muitas outras teorias foram propostas no final do século XIX e início do século XX. Os três "testes clássicos" da relatividade geral são muito significativos, mas havia vários outros efeitos gravitacionais astronômicos e terrestres anômalos (não-newtonianos) que mereceram atenção no início do século XX. De fato, se consultamos revistas científicas do final do século XIX e início do século XX, encontramos um grande número de estudos revolucionários sobre a gravitação. Muitos deles propuseram alternativas gravitacionais. Desde a publicação do livro de Whittaker (1951-53), os historiadores estão bem cientes das teorias gravitacionais alternativas no início do século XX. (MARTINS, 1998c, p. 03)

Destas alternativas, interessa-nos aquela que foi proposta de Poincaré em 1905. Mas para compreendermos qual foi a importância das pesquisas de Henri Poincaré sobre a gravitação precisamos compreender o estado da arte desse campo de pesquisa no final do século XIX e começo do século XX. Como vimos a visão popular, e anacrônica, atribui a Lei Universal da Gravitação um sucesso quase imediato após sua publicação por Newton na metade do século XVII. Muitas obras populares de divulgação científica

tomam por certo que havia um grande respeito e um certo dogma a respeito de Newton e que Einstein foi o primeiro há questionar seriamente a autoridade de Newton. Contudo, a verdade é que a gravitação newtoniana não era muito bem apreciada pelos astrônomos até o século XVIII.

Vimos que, por muitos anos após sua primeira publicação, a doutrina newtoniana da gravitação não foi bem recebida. Mesmo na Universidade de Cambridge, de Newton, o livro de física em geral usado no primeiro trimestre do século XVIII ainda era cartesiano; enquanto todos os grandes matemáticos do continente - Huygens na Holanda, Leibniz na Alemanha, Johann Bernoulli na Suíça, Cassini na França – rejeitaram totalmente a teoria newtoniana. Isso não deve ser atribuído inteiramente a preconceitos: muitos astrônomos bem informados acreditavam, por certo e com razão, que a lei newtoniana não era reconciliável com os movimentos observados dos corpos celestes. (WHITTAKER, 1953, p. 144)

É fato que os contemporâneos também reconheciam que a doutrina newtoniana era compatível com o movimento elíptico dos planetas e permitia prever com exatidão os eclipses solares e a passagem de cometas, porém, existiam anomalias nos movimentos orbitais planetários, que a lei de Newton era incapaz de explicar. Essas anomalias (ou desigualdades, como eram chamadas pelos astrônomos) eram de dois tipos:

Primeiro, havia distúrbios que eram corrigidos depois de um tempo, de modo a não ter efeito cumulativo; essas eram chamadas de desigualdades periódicas. Muito mais sérios eram os desarranjos que se desenvolviam continuamente, cada vez mais se desviando do movimento orbital original; estes eram chamados de desigualdades seculares. O mais conhecido deles é aquele que foi denominado de grande desigualdade de Júpiter e Saturno (WHITTAKER, 1953, p. 144)

Em 1773, Laplace estudou o problema das desigualdades de Júpiter e Saturno e mostrou que o modelo newtoniano podia resolver a questão considerando as perturbações de outros corpos. Esta pesquisa empreendida por Laplace começou a popularizar a lei da gravitação universal de Newton (LAPLACE, 1799-1825, WHITTAKER, 1953). Contudo, a teoria de Newton ainda apresentava problemas.

Após a conclusão triunfante das pesquisas de Laplace a respeito da grande desigualdade de Júpiter e Saturno, ainda havia um problema notável pendente que formou um sério desafio à teoria newtoniana, a saber, a aceleração secular do movimento médio da lua. A partir de um estudo de eclipses antigos registrados por Ptolomeu e os astrônomos árabes, Halley concluiu em 1693 que o movimento médio da lua tem se tornado continuamente mais rápido desde a época das primeiras observações registradas. A distância média de nosso satélite deve, portanto, ter diminuído continuamente, e parecia que, em algum momento no futuro remoto, a lua colidiria com a Terra. A Academia de Ciências de Paris propôs o assunto para o prêmio de 1770, e novamente em 1772 e 1774, e prêmios foram concedidos a Euler e Lagrange que

fizeram valiosas contribuições para a dinâmica geral da astronomia; sobre a questão proposta, no entanto, eles encontraram somente os resultados negativos de que nenhuma desigualdade secular poderia ser produzida pela ação da gravitação newtoniana, quando os corpos celestes eram considerados esféricos, e, além disso, que os fenômenos observados não poderiam ser explicados levando-se em conta deformações na esfericidade da Terra e da Lua. Laplace propôs uma solução, primeiramente, ele mostrou que o efeito não se devia a qualquer retardamento da rotação diurna da Terra devido à resistência do éter: ele então investigou as consequências de outra suposição, a saber, que os efeitos gravitacionais são propagados com uma velocidade que é finita: mas isso também não levou a nenhuma conclusão satisfatória e, finalmente, ele encontrou a verdadeira solução, que pode ser descrita da seguinte maneira: O movimento médio da Lua ao redor da Terra depende principalmente da gravidade entre Lua e a Terra, mas é ligeiramente atenuado pela ação do Sol sobre a Lua. Essa ação solar, no entanto, depende em certa medida da excentricidade da órbita terrestre, que está diminuindo lentamente, como resultado da ação dos planetas sobre a Terra. Consequentemente, a ação média do Sol sobre o movimento médio da Lua também deve estar diminuindo, e, portanto, o movimento médio da Lua deve continuar aumentando, o que é precisamente o fenômeno observado. A aceleração do movimento médio da Lua continuará enquanto a órbita da Terra se aproximar de uma forma circular: mas assim que este processo cessa, e a órbita se torna novamente mais elíptica, a ação média do Sol aumentará e a aceleração da órbita o movimento da Lua será convertido em um retardamento. A desigualdade, portanto, não é verdadeiramente secular, mas periódica, embora o período seja imensamente longo, na verdade, milhões de anos. Essa notável afirmação da teoria newtoniana ocorreu exatamente um século depois da publicação dos *Principia* (WHITTAKER, 1953, p. 146-147).

Esse estudo também levou Laplace a concluir que a gravitação conforme por Newton deveria ser instantânea ou se propagar com uma velocidade da ordem de 1 milhão de vezes da velocidade da luz. (POINCARÉ, 1900b, 1904a, 1905g, 1906). Este é um resultado bastante importante, pois era incompatível com o Princípio da Relatividade, uma vez que este exigia que a velocidade de propagação da informação ocorresse em velocidade iguais ou inferiores a da velocidade da luz no vácuo (POINCARÉ, 1900b, 1904a, 1905g, 1906). Embora a abordagem de Laplace fosse satisfatória, muitos pesquisadores no início do século XX tinham dúvidas a respeito do modelo newtoniano e por isso novas propostas foram sendo discutidas (WHITTAKER, 1953).

Desde o tempo de Newton, muitos autores propuseram modelos mecânicos para explicar as forças gravitacionais (Woodward, 1972). Huygens e Leibniz tentaram explicar a lei do inverso do quadrado supondo que o espaço “vazio” estava cheio de partículas viajando ao redor dos corpos gravitantes. O próprio Newton tentou explicar a gravitação por vários modelos de éter (Aiton, 1969; Hawes, 1968; Rosenfeld, 1969), e uma vez ele pensou que um modelo corpuscular proposto por Fatio de Duillier (Gagnebin, 1949) seria capaz de explicar

todas as características dessas forças. Mais tarde, ele desistiu dessas tentativas e, como resultado de uma má interpretação de sua máxima “*hypotheses non fingo*”, a maioria dos seguidores de Newton no século XVIII supôs que não se deveria tentar explicar as forças gravitacionais. Georges-Louis Le Sage (1784), no entanto, propôs uma teoria muito semelhante à de Fatio que se tornou famosa e deu origem a muitas outras hipóteses análogas no século XIX. No início do século XX, Hugo von Seeliger (1909), Kurt Bottlinger (1912) e Quirino Majorana (1919, 1920) propuseram um novo tipo de modelo, assumindo que todos os corpos emitem em todas as direções. Esses autores enfatizaram que suas teorias implicariam absorção parcial da força gravitacional pela matéria (Martins, 1999). Teorias como Fatio ou Le Sage, no entanto, também levam à mesma consequência. As teorias de Le Sage e Majorana pertencem ao tipo geral de teorias cinéticas da gravitação (Taylor, 1876). (MARTINS, 2002, p. 239)

Outra anomalia que depunha contra a doutrina newtoniana era um avanço irregular na órbita de Mercúrio. Mesmo considerando a perturbação de todos os corpos celestes, ainda havia uma discrepância razoável entre o valor teórico e o observado. Havia duas explicações possíveis: alterar a lei do inverso do quadrado da distância, pela adição de um termo envolvendo as velocidades dos corpos; ou, como propôs H. Seeliger, atribuir o efeito pela atração das massas que formam a luz zodiacal (WHITTAKER, 1953). Contudo, em 1895, Newcomb descobriu outra anomalia: um avanço irregular no nó da órbita de Vênus (WHITTAKER, 1953, DUGAS, 2011).

Em síntese, diferente das narrativas populares, no começo do século XX, a doutrina newtoniana estava longe de ser considerada satisfatória, e por isso, teorias alternativas foram propostas. Entre as mais populares estavam as teorias cinéticas da gravitação, inspiradas nos modelos de Fatio e Le Sage.

Em 1897, Austin e Thwing fizeram o primeiro teste experimental conhecido da existência de uma mudança de força gravitacional devido à interposição de matéria usando uma balança de torção (Austin e Thwing, 1897). Nenhum efeito foi detectado. (MARTINS, 2002, p. 239)

Uma objeção às teorias cinéticas era o fato que os corpúsculos ultra-mundanos deveriam se propagar com velocidades muito maiores que a velocidade da luz no vácuo, mas no final do século XIX, uma série de experiências envolvendo a deflexão de cargas elétricas aceleradas apontavam que a inércia dependia da velocidade e que esta inércia tendia ao infinito à medida que a velocidade da carga tendia a velocidade da luz no vácuo (WHITTAKER, 1953). Ciente dessas dificuldades, o físico holandês, H. Lorentz, tentou construir uma teoria da gravitação que dependia apenas das ações eletromagnéticas que se propagavam com velocidade igual a da velocidade da luz no vácuo

Lorentz apresentou seus resultados em um ensaio intitulado *Considerações sobre a Gravitação*, no dia 31 de março de 1900, durante a reunião da Academia de Ciências de Amsterdã. Em suas investigações Inicialmente, Lorentz trabalhou com uma hipótese prefigurada na teoria da cinética da gravitação, onde os corpúsculos ultra-mundanos eram substituídos por íons. Porém, após efetuar os cálculos, Lorentz concluiu que os resultados não eram satisfatórios e a hipótese deveria ser rejeitada.

Ele então considerou uma segunda hipótese, que pode ser considerada como tendo sido prefigurada na teoria do fluido elétrico de Watson, Franklin e Aepinus. Segundo essa teoria, desenvolvida em 1836 por O. F. Mossotti (1791-1863), a eletricidade é concebida como um fluido contínuo, cujos átomos são cada um deles. Supõe-se que as moléculas materiais também se reajam mutuamente, mas que os átomos de éter tenham uma atração mútua, que é um pouco maior do que a repulsão mútua das partículas que repelem. A composição dessas forças é responsável pela gravitação, exceto em distâncias muito pequenas, onde o mesmo mecanismo é responsável pela coesão. (WHITTAKER, 1953, p. 149-150)

Outra proposta, foi feita pelos físicos alemães Friedrich Zöllner (1834-1882), de Leipzig, e Wilhelm Weber (1804-1891), de Göttingen, este que se tornou pela eletrodinâmica de Weber que uma teoria que aceita por muito tempo, tendo sido superada pela eletrodinâmica de Maxwell quando Hertz detectou ondas eletromagnéticas (WHITTAKER, 1953).

[Eles] desenvolveram sua concepção na ideia de que todas as moléculas ponderáveis são associações de corpúsculos elétricos positivamente e ne ativamente carregados, com a condição de que a atração entre os corpúsculos de sinal diferentemente é um pouco maior que a força de repulsão entre corpúsculos de sinal semelhante. Se a força entre duas unidades elétricas de carga similar a uma certa distância for uma dine, e a força entre uma carga unitária positiva e negativa na mesma distância for γ dinas, então, levando em conta o fato de que um átomo neutro contém como Como uma carga elétrica muito positiva e negativa, verificou-se que $(\gamma - \alpha)/\alpha$ precisa ser apenas uma quantidade da ordem 10^{-35} para considerar a gravitação como devida à diferença entre α e γ . (WHITTAKER, 1953, p. 150)

Haviam também teorias que se propunham a mudar o coeficiente $1/r^2$ da lei da gravitação universal para valores fracionários, muito próximos de 2. Também haviam propostas que substituíam o fator $1/r^2$ por um fator exponencial de base e que teria um contato de primeira ou segunda ordem com $1/r^2$. Outra alternativa foi sugerida por Poincaré e consistia em estender a covariância de Lorentz e o princípio da relatividade para os fenômenos gravitacionais (WHITTAKER, 1953).

6.2. Hipóteses sobre a Gravitação

Em 1899, Poincaré estabeleceu pela primeira vez a universalidade do princípio da relatividade (POINCARÉ, 1899a). Posteriormente, Poincaré demonstrou que uma das implicações do princípio da relatividade é que nenhum sinal ou troca de informação poderia exceder a velocidade da luz no vácuo (POINCARÉ, 1900b). Em 1904, durante uma conferência em Saint Louis, que Poincaré discorreu que a teoria newtoniana da gravitação, tal como havia sido concebida por Laplace, estava em desacordo com o princípio da relatividade.

O que aconteceria se pudéssemos nos comunicar por sinais que não fossem mais luminosos, e cuja velocidade de propagação fosse diferente da velocidade de propagação da luz? Se, depois de acertar os relógios pelo procedimento ótico, quiséssemos verificar o acerto com o auxílio desses novos sinais, constataríamos divergências que poriam em evidência a translação comum das duas estações. E serão inconcebíveis tais sinais se admitirmos, com Laplace, que a gravitação universal se transmite 1 milhão de vezes mais rapidamente que a luz? Assim, nesses últimos tempos, o princípio de relatividade foi valentemente defendido, mas a própria veemência da defesa prova quão sério era o ataque. (POINCARÉ, 1904a, p. 233)

Em seu ensaio de 1905, Poincaré inicia a discussão dissertando sobre a necessidade de se criar uma teoria gravitacional compatível com o princípio da relatividade. Poincaré (1905g, p. 1508) declara:

Era importante examinar esta hipótese mais de perto e, em particular, examinar quais mudanças exigiria que fizéssemos sobre a lei da gravitação. É isso que eu procurei determinar; inicialmente, fui levado a supor que a propagação da gravitação não é instantânea, mas acontece com a velocidade da luz. Isso parece estar em desacordo com os resultados obtida por Laplace, que anunciou que esta propagação é, se não instantânea, pelo menos muito mais rápida que a da luz. Mas, na realidade, a questão colocada por Laplace difere consideravelmente daquilo que nos ocupa aqui. A introdução de uma velocidade finita de propagação foi a única mudança que Laplace introduziu para a lei de Newton. Aqui, pelo contrário, esta mudança é acompanhada por várias outras; é possível, e é o que acontece de fato, que ocorra uma compensação parcial entre eles.

Ao reformular a teoria da gravitação de modo a exigir que a velocidade de propagação da gravidade seja igual a velocidade da luz, Poincaré prevê que a ação gravitacional ocorre devido a emissão e absorção de ondas gravitacionais que se propagam à velocidade da luz no éter.⁴¹

⁴¹ É preciso enfatizar que o conceito de onda gravitacional prevista por Poincaré, é diferente daquele previsto na Teoria da Relatividade Geral. Devido a um erro de cálculo, Einstein previu, em 1916, a

Quando falamos da posição ou velocidade do corpo atraente, será a posição ou a velocidade no momento em que a *onda gravitacional* deixa o corpo; quando falamos sobre a posição ou a velocidade do corpo atraído, será a posição ou a velocidade no momento em que esse corpo foi atingido e atraído pela onda gravitacional que emana do outro corpo; é claro que o primeiro instante precede o segundo. (POINCARÉ, 1905g, p. 1508).

Talvez chame a atenção do leitor que Poincaré mencione a existência de ondas gravitacionais, 10 anos antes de Albert Einstein. É um fato notório que Poincaré foi o primeiro a mostrar que como uma consequência do princípio da relatividade a gravidade deve ser transmitida à velocidade da luz, contudo a ideia de ondas gravitacionais não era uma novidade. O conceito de onda gravitacional não depende dos detalhes da teoria, mas da restrição que a gravidade se propague com velocidade limitada, como ocorria nos modelos derivados da teoria de Le Sage (MARTINS, 1998c, 2002). A esse respeito Katzir (2005a, p. 22) registra que:

O termo “onda gravitacional” apenas enfatiza que a força se propaga em um tempo finito, similarmente às ondas de luz. Outros também empregaram o termo para expressar que a atração se propaga a uma velocidade finita. O resultado de que a gravidade se propaga na velocidade da luz respondeu a questão que Poincaré levantara em 1904: uma teoria da gravitação em que a força [gravitacional] se propaga à velocidade da luz é possível, em contraste com a antiga reivindicação de Laplace.

Poincaré, então determina novas funções gravitacionais que sejam compatíveis com as transformações de Lorentz e calcula os desvios entre seu modelo e o modelo newtoniano.

A diferença para a lei comum da gravitação, como eu disse, é de ordem v^2 ; Se assumirmos, como fez Laplace, que a velocidade de propagação é a da luz, essa discrepância é de ordem ξ , isto é, 10.000 vezes maior. Não é, portanto, à primeira vista, absurdo assumir que as observações astronômicas não são precisas o suficiente para detectar uma diferença tão pequena quanto a que imaginamos. Mas isso é algo que somente uma discussão completa nos permitirá decidir. (POINCARÉ, 1905g, p. 1508)

Os principais detalhes aparecem apenas na versão de Palermo, publicada em 1906. Poincaré não apenas detalha seu raciocínio, como desenvolve uma análise que antecipa

existência de três tipos de ondas gravitacionais: uma longitudinal, uma transversal e um novo tipo de onda (que não era nem transversal e nem longitudinal) ([40], [41]). Em 1917, Levi-Civita apontou que a dedução de Einstein estava errada ([41]). Em 1918, Einstein reconheceu seu erro e apresentou a dedução correta, desta vez obtendo apenas dois tipos de ondas gravitacionais. Curiosamente, embora Einstein afirme que as ondas gravitacionais se propaguem com velocidade igual à da luz no vácuo, ele não provou essa afirmação ([40; 42]). Coube a Eddington, em 1922, mostrar que essas ondas se propagam a velocidade da luz ([43]). Para mais detalhes, ver [44].

resultados obtidos por Minkowski, Laue e Planck para teoria da relatividade especial. Antes de discorrermos sobre o artigo, precisamos fazer uma pequena observação sobre a notação empregada por Poincaré. Diferente de seus contemporâneos, como Lorentz, Poincaré não utiliza o formalismo vetorial de Gibbs-Heaviside, mas um conjunto de símbolos próprios.

Em seu artigo extenso, as *Hipóteses sobre a Gravitação* aparecem na seção 9. Assim como na versão curta, Poincaré enuncia que as diferenças na natureza da força eletromagnética e da força gravitacional faz com que a teoria da relatividade seja parcialmente covariante em Lorentz, pois a completude só pode ser alcançada se o princípio da relatividade for válido para gravidade:

Portanto, a teoria de Lorentz explicaria completamente a impossibilidade de demonstrar o movimento absoluto, se todas as forças forem de origem eletromagnética. Mas há forças que não podemos atribuir uma origem eletromagnética, como por exemplo, a gravitação. Pode acontecer, de fato, que dois sistemas de corpos produzam campos eletromagnéticos equivalentes, isto é, exercendo a mesma ação nos corpos eletrizados e nas correntes, e ainda assim esses dois sistemas não exercem a mesma ação gravitacional sobre a massa newtoniana. O campo gravitacional é, portanto, distinto do campo eletromagnético. Lorentz foi forçado a completar sua hipótese ao assumir que as forças de qualquer origem, e em particular a gravitação, são afetadas pela translação (ou, se preferir, pela transformação de Lorentz) da mesma forma que as forças eletromagnéticas. Agora é conveniente entrar em detalhes e olhar mais de perto nesta hipótese. Se quisermos que a força newtoniana seja afetada desta maneira pela transformação de Lorentz, não podemos aceitar que a força depende apenas da posição relativa do corpo atraente e do corpo atraído no instante considerado. Também dependerá das velocidades dos dois corpos. E isso não é tudo: é natural supor que a força que atua no tempo t no corpo atraído depende da posição e velocidade desse corpo ao mesmo tempo t ; mas dependerá, além disso, da posição e velocidade do corpo atraente, não no tempo t , mas um momento antes, como se a gravitação precisasse de certo tempo para se propagar. (POINCARÉ, 1906, p. 538-539)

Por esta declaração podemos ver que Poincaré queria garantir que não haveriam cissuras para o princípio da relatividade em uma eletrodinâmica estruturada na invariância de Lorentz. Depois de garantir a invariância de Lorentz e explicar a estabilidade do elétron, Poincaré estava pronto para estender o princípio para a gravitação. Mas qual seria o melhor programa de gravitação dentre os que estavam sendo discutidos? Poincaré optou por buscar modificações na lei de Newton. Como vimos, Poincaré estava ciente das diversas propostas, portanto sua escolha não se devia ao desconhecimento de outros modelos, então o que teria motivado sua escolha? Não sabemos, podemos

especular que Poincaré estivesse ciente do insucesso de Lorentz em desenvolver um modelo gravitacional usando a abordagem de Le Sage. Além disso, Poincaré tinha grande admiração pela teoria newtoniana pelo sua precisão empírica, enquanto os outros modelos não haviam ainda conseguido fornecer evidências empíricas. Katzir (2005a), indentifica cinco condições que Poincaré impôs para construir suas hipóteses sobre a gravitação:

1. A existência de uma função invariante de Lorentz das quatro coordenadas e as velocidades que definem a lei da propagação da atração. Este requisito implica uma velocidade finita de atração, como implica o princípio da relatividade. 2. A suposição acima mencionada de que a transformação de Lorentz afeta as forças gravitacionais e eletromagnéticas da mesma maneira. 3. Para corpos em repouso, a lei da força deve coincidir com a lei de Newton. 4. A solução escolhida será aquela que menos altera a lei de Newton para velocidades pequenas. Isso é devido a necessidade de contabilizar os dados astronômicos da mesma maneira que a lei de Newton. Isso mostra que Poincaré estava preocupado com as consequências empíricas da teoria e que não encontrou nenhuma razão empírica para modificar a lei de Newton. 5. A variável tempo nas expressões matemáticas sempre será compatível com o fato físico conhecido que leva um tempo [finito] para a atração [gravitacional] viajar de um corpo para outro. A combinação desse requisito com a condição de invariância garante que a velocidade de propagação da força gravitacional não exceda a velocidade da luz. (KATZIR, 2005a, p. 18)

Uma característica importante da abordagem de Poincaré é que a massa gravitacional e a massa inercial são conceitos distintos, não apenas conceitualmente, mas empiricamente, pois enquanto a massa inercial depende da velocidade do sistema físico, a massa gravitacional de Poincaré era um invariante. Observe que, essa hipótese é uma escolha *a priori* de Poincaré e não uma consequência da teoria da relatividade que ele havia desenvolvido nas seções anteriores. Na época, em 1905, não haviam provas empíricas que mostrassem se havia uma diferença entre a massa inercial e massa gravitacional, estas medidas só foram obtidas em 1909 por Eötvös (WALTER, 2007).

A simplicidade matemática do pressuposto de uma massa gravitacional constante foi provavelmente a principal razão para sua adoção por Poincaré. Além disso, cria uma analogia entre gravitação e eletrodinâmica, na qual a carga - o análogo da massa gravitacional - não varia com a velocidade. Isso permitiu o uso de resultados da eletrodinâmica na discussão da gravitação (como as transformações de força e carga / densidade de massa gravitacional). Além disso, a hipótese de massa constante implicava uma nova força relativista semelhante à lei de Newton, que Poincaré considerava como empiricamente satisfatória e que ele desejava modificar o mínimo possível. (KATZIR, 2005a, p. 19)

Poincaré propõe derivar a transformação da força gravitacional construindo invariantes de Lorentz que satisfaçam a forma quadrática do espaço-tempo. Primeiro

Poincaré escreve três pontos no espaço 4-dimensional e observa que as transformações de Lorentz podem ser interpretadas como rotações nesse espaço. Deste fato ele conclui que existem apenas seis invariantes dependentes de 10 parâmetros, ou seja, há quatro parâmetros livres. Inicialmente Poincaré obtém quatro invariantes distintos (POINCARÉ, 1906, p. 542):

$$\vec{r}^2 - t^2, \quad \frac{t - \vec{r} \cdot \vec{v}}{\sqrt{t - \vec{v}^2}}, \quad \frac{t - \vec{r} \cdot \vec{v}_1}{\sqrt{t - \vec{v}_1^2}}, \quad \frac{t - \vec{v} \cdot \vec{v}_1}{\sqrt{(t - \vec{v}^2)(t - \vec{v}_1^2)}}$$

Sobre estes invariantes, Walter (2007, p. 09) faz uma observação importante:

A inspeção dos sinais desses invariantes revela uma inconsistência, cuja razão é aparente quando os cálculos intermediários são realizados. Em vez de construir seus quatro invariantes a partir de produtos escalares, Poincaré introduziu uma inversão para A, B e C. Essa inconsistência no sinal não teve consequências em sua busca por uma lei relativista da gravitação, embora tenha afetado seu resultado final.

A partir destes invariantes, Poincaré começa a construir as expressões de força.

Poincaré deriva a lei da força em três etapas. Primeiro, ele encontrou funções invariantes das coordenadas e velocidades. Então ele escreveu a força como uma função desses invariantes e alguns coeficientes não especificados, garantindo assim a compatibilidade da força com o princípio da relatividade. Por último, ele encontrou expressões específicas para a força através de uma comparação com a aproximação newtoniana para pequenas velocidades (KATIZR, 2005a, p. 19)

Se baseando nas equações da eletrodinâmica, Poincaré deduz seus novos invariantes por meio da densidade de carga e as transformações de Lorentz.

Poincaré observou uma analogia formal entre os 4 vetores de força e densidade de força, de um lado, e os 4 vetores de posição e velocidade, por outro lado: esses pares de vetores se transformam da mesma maneira, exceto que um membro é multiplicado por $1/k(1+\zeta\epsilon)$. Embora esta analogia possa parecer matematicamente transparente, merece ser notada, já que parece ter escapado a Poincaré no início. Com estes quatro vetores cinemáticos em mãos, Poincaré definiu um quinto quadrupletto Q com componentes de densidade de força (X, Y, Z, $T\sqrt{-1}$). Assim como no caso anterior, os produtos escalares de seus quatro quadrigêmeos P, P', P'' e Q deviam entregar quatro novos Lorentz-invariantes em termos da força que age na massa passiva (X_1 ; Y_1 ; Z_1). (WALTER, 2007, p. 10)

Pelo método de multiplicação dos coeficientes pelos elementos de força, Poincaré consegue obter quatro novos invariantes distintos de força (POINCARÉ, 1906, p. 544):

$$\frac{\vec{F}^2 - F_t^2}{1 - \vec{v}^2}, \quad \frac{\vec{F} \cdot \vec{r} - F_t \cdot t}{\sqrt{1 - \vec{v}^2}}, \quad \frac{\vec{F} \cdot \vec{v}_1 - F_t}{\sqrt{(1 - \vec{v}^2)(1 - \vec{v}_1^2)}}, \quad \frac{\vec{F} \cdot \vec{v} - F_t}{1 - \vec{v}^2}$$

O último invariante é sempre zero, já que nas restrições Poincaré adotou que:

$\vec{F} \cdot \vec{v} = F_t$. Sobre esses invariantes, Katzir (2005a, p. 20) salienta que:

A comparação não leva a uma expressão única para a lei da força e Poincaré ofereceu uma alternativa. Outras considerações envolvendo a propagação da atração e os invariantes levaram-no a concluir que a força deve se propagar à velocidade da luz. Qualquer outra suposição levaria a uma violação da causalidade através da ocorrência de uma influência do futuro.

Assim como aconteceu com os primeiros invariantes, há uma inversão de sinais. Esse é um aspecto importante, pois mostra que Poincaré, ainda que fosse um dos matemáticos mais proeminentes de sua época, ele não estava considerando essas quantidades como quadrvetores, como observa Walter (2007, p. 10-11):

Comparando os sinais dos invariantes cinemáticos com os da força invariante, vemos que Poincaré obteve sinais consistentes apenas para os últimos invariantes. Ele não deve ter computado sua força invariantes da mesma maneira que seus invariantes cinemáticos, por razões que permanecem obscuras. Não é inteiramente improvável que, no curso de sua análise das transformações de velocidade e força, Poincaré tenha percebido que ele poderia calcular a força invariavelmente a partir dos produtos escalares de quatro 4 vetores. Dois fatos, no entanto, argumentam contra essa leitura. Em primeiro lugar, Poincaré não mencionou que seus invariantes de força eram os produtos escalares de posição, velocidade e força de 4 vetores. Em segundo lugar, ele não alterou os sinais de seus invariantes cinemáticos para fazê-los corresponder aos produtos escalares dos quatro vetores de posição e velocidade. O fato de os invariantes cinemáticos de Poincaré diferirem dos produtos dos 4 vetores e 4 velocidades nos leva a acreditar que, ao formar esses invariantes, ele não estava pensando em termos de 4 vetores.

Usando seus invariantes, Poincaré começa a fazer hipóteses físicas para tornar suas equações menos complexas.

Para encontrar uma lei aplicável ao caso geral de dois corpos em movimento relativo, Poincaré introduziu restrições e aproximações destinadas a reduzir a complexidade de seus sete invariantes e recuperar a forma da lei newtoniana no limite do movimento lento. ($\xi_1 \ll 1$). Poincaré naturalmente olhou primeiro para a velocidade de propagação da gravitação. Ele considerou brevemente uma teoria de emissão, onde a velocidade da gravitação depende da velocidade da fonte. Embora a hipótese de emissão fosse compatível com seus invariantes, Poincaré rejeitou essa opção porque violou sua injunção inicial, exceto uma velocidade hiperluminal de propagação gravitacional. Isso o deixou com uma velocidade de propagação da gravitação menor ou igual à da luz, e para simplificar seus invariantes, Poincaré o igualou ao da luz no espaço vazio, de modo que $t = -\sqrt{\sum x^2} = -r$.

Esta estipulação reduziu o número total de invariantes de sete para seis. (WALTER, 2007, p. 11)

ou nas palavras de Poincaré (1906, p. 547):

$r^2 - t^2 = 0$, onde $t = \pm r$, e como t deve ser negativo, $t = -r$. Isso significa que a velocidade de propagação é igual à da luz. No começo, parece que esta hipótese deve ser rejeitada sem consideração. Laplace realmente mostrou que essa propagação é instantânea ou muito mais rápida do que a luz. Mas Laplace considerou a hipótese de velocidade finita de propagação, *ceteris non mutatis*, aqui, no entanto, esta hipótese é complicada por muitos outros fatores, e pode acontecer que haja uma compensação mais ou menos perfeita, já que as aplicações da transformação de Lorentz nos deram já tantos exemplos.

Assim, o próximo passo, consistia em construir uma lei de força para as massas ativas e passivas. Para isso Poincaré apresentou duas abordagens distintas, mas que tinham um núcleo comum: negligenciar as velocidades ao quadrado nos invariantes e comparar com a sua contraparte newtoniana (lei do inverso do quadrado da distância). Na primeira abordagem Poincaré buscou construir a força usando os seus invariantes cinemáticos. Ele obteve três, que ele denotou como M , N , P , que eram funções da velocidade e da distância, porém, Poincaré não ficou satisfeito com a solução, pois em certos casos ela poderia assumir um valor imaginário, mas, segundo Walter (1907, p. 12), essa não era a principal preocupação de Poincaré:

A observação citada parece sugerir que, para valores selecionados das velocidades das partículas, a força se torna imaginária. No entanto, a dificuldade real deriva da equação $M = 1/B^4$, que permite uma força repulsiva. A abordagem geral não conseguiu entregar. O fato de Poincaré ter publicado a derivação precedente pode ser entendido de duas maneiras. Por um lado, há uma explicação psicológica: o hábito de Poincaré, deplorado pelos colegas, era apresentar suas descobertas mais ou menos na ordem em que as encontrava. O caso em questão pode não ser diferente dos outros. Por outro lado, Poincaré pode ter sentido que vale a pena mostrar que a abordagem geral se desfaz. Do último ponto de vista, o resultado de Poincaré é positivo.

Descartando essa abordagem e sabendo porque ela se tornava inconsistente, Poincaré propõe a segunda abordagem. Dessa vez ele adota uma hipótese menos geral, não usando seus três invariantes de força. Inicialmente ele escreve os invariantes A , B , e C como:

$$A = -k_0 (r + \vec{r} \cdot \vec{v}), \quad B = -k_1 (r + \vec{r} \cdot \vec{v}_1), \quad C = k_0 k_1 (1 - \vec{v} \cdot \vec{v}_1)$$

$$r = -t, \quad k_0 = 1/\sqrt{1 - \vec{v}^2}, \quad k_1 = 1/\sqrt{1 - \vec{v}_1^2}$$

Poincaré assume que a força gravitacional sobre a massa passiva em movimento é uma função da distância e as velocidades relativas entre as massas. Ele obtém as seguintes equações:

$$\vec{F}_1 = \vec{r} \frac{\alpha}{k_0} + \vec{v} \beta + \vec{v}_1 \frac{k_1}{k_0} \gamma \quad F_{t1} = -r \frac{\alpha}{k_0} + \beta + \frac{k_1}{k_0} \gamma^{42}$$

onde α , β e γ são invariantes cinemáticos que satisfazem a equação:

$$-A\alpha - \beta - C\gamma = 0$$

Aqui encontramos um fato inconveniente sobre a hipótese gravitacional de Poincaré. A equação acima tem dois parâmetros livres, desta forma existem infinitas soluções e, portanto, infinitas possibilidades de se construir uma lei da gravitação universal. Não existe nenhum argumento físico ou matemático que permita obter de forma única o valor dos invariantes cinemáticos. Por uma questão de simplicidade, Poincaré toma $\beta = 0$ e acha a seguintes solução.

$$\beta = 0, \quad \gamma = \frac{A\alpha}{C}$$

Sobre esta equação, Katzir (2005a, p. 20) enfatiza que:

Esta não é uma solução única; uma alternativa teria levado a uma lei de força diferente. Em seguida, Poincaré empregou a aproximação de baixas velocidades, negligenciando termos contendo os quadrados das velocidades. Então $\alpha = 1/r^3$; na mesma ordem de aproximação, também é o valor de $1/B^3$ (que ele tomou igual a α). Esta não foi a única possibilidade: outras combinações das variáveis dão o mesmo valor nesta aproximação. Inserindo os invariantes A , B , C ao invés de β e γ na equação, ele obteve quatro equações para os quatro componentes da força generalizada.

As quatro equações obtidas por Poincaré foram:

$$\vec{F}_1 = \frac{\vec{r}}{k_0 B^3} - \vec{v}_1 \frac{k_1}{k_0} \frac{A}{B^3 C} \quad F_{t1} = -\frac{r}{k_0 B^3} - \frac{k_1}{k_0} \frac{A}{B^3 C}$$

Substituindo os valores de A , B e C , chegamos a nova expressão para a força gravitacional:

$$\vec{F} = -\frac{1}{k_0 k_1^3 (r + \vec{r} \cdot \vec{v}_1)^3} \left[\vec{r} + \frac{\vec{v}_1 (r + \vec{r} \cdot \vec{v}_1)}{1 - \vec{v} \cdot \vec{v}_1} \right]$$

onde $\vec{v}$ e $\vec{v}_1$ são as velocidades da massa passiva e ativa, respectivamente, $\vec{r}$ a distância entre as massa/ Sobre esta equação, Katzir (2005a, p. 21) ressalta que:

⁴² Aqui γ não é o fator de Lorentz, apenas um invariante a ser determinado.

Essa força gravitacional se assemelha à força eletromagnética de Lorentz. Consiste em dois termos, um paralelo à linha que liga os dois corpos e o outro paralelo à velocidade do corpo que atrai. O primeiro depende da posição dos corpos e é análogo à força eletrostática, enquanto o segundo depende da velocidade da força de atração e se assemelha à força magnética. No entanto, ao contrário do termo magnético da força eletromagnética, esta força é paralela ao invés de ortogonal à velocidade. “Para completar a analogia” (Poincaré, 1905, p. 549) Poincaré elaborou uma lei de força alternativa, baseada em uma expressão diferente para $1/r^3$.

Para esta aproximação, Poincaré escreveu uma expressão geral em função de $1/r^3$:

$$\frac{1}{B^3} + (C-1) f_1(A, B, C) + (A-B)^2 f_2(A, B, C)$$

onde f_1 e f_2 são funções arbitrárias a serem determinadas. Poincaré também analisou uma solução onde o ter $1/B^3$ é substituída por C/B^3 e obteve uma expressão alternativa para força:

$$\vec{F} = -\frac{1}{k_1^2 (r + \vec{r} \cdot \vec{v}_1)^3} \left[(\vec{r} + r \cdot \vec{v}_1) + \vec{v}_1 \times (\vec{v}_1 \times \vec{r}) \right]$$

Assim como a lei anterior, essa nova lei da força também apresenta um análogo com a eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz, como explica Katzir (2005a, p. 21):

A analogia entre essa lei de força e a força entre dois elétrons em movimento é clara; a primeira expressão entre parênteses é semelhante ao efeito do campo elétrico, a segunda ao campo magnético (Poincaré 1905, p. 549). A eletrodinâmica em geral e a força de Lorentz, em particular, forneceram a Poincaré um modelo na elaboração de uma lei de força relativista. No entanto, a derivação da teoria não se baseou no modelo eletrodinâmico. O método de invariância, que Poincaré usou, não foi derivado e nem teve paralelo na teoria eletrodinâmica. Enquanto o segundo termo na força de Lorentz é uma função do campo magnético, na força de Poincaré é um produto vetorial direto da velocidade e da distância. Como na mecânica celeste clássica, a nova teoria gravitacional é também uma teoria pontual massa e não uma teoria de um campo. A este respeito, a única diferença é que a atração leva um tempo finito para se propagar ao invés de ser instantânea. Poincaré não fez nenhuma tentativa de explicar como a atração gravitacional se propaga. Ele não sugeriu nenhum mecanismo ou campo para esse propósito. Ele certamente sabia das tentativas anteriores malsucedidas de uma teoria de campo da gravitação, inspirada pelo eletromagnetismo de Maxwell. Esse não era seu objetivo aqui: ele não tentou fundamentar a gravitação em novas bases. Ele fez uma modificação da teoria da gravitação de Newton, baseada na teoria clássica, em vez de uma nova teoria independente.

Com efeito, ao analisar a própria lei de força que ele obteve Poincaré (1906, p. 576) faz somente um breve comentário:

Primeiro percebemos que a atração corrigida é composta por duas componentes, um paralelo ao vetor que une as posições dos dois corpos,

o outro paralelo à velocidade do corpo atraente. Lembre-se de que, quando falamos sobre a posição ou a velocidade do corpo atraente, é a sua posição ou a sua velocidade quando a onda gravitacional sair; para o corpo atraído, pelo contrário, é a sua posição ou a sua velocidade quando a onda gravitacional atinge-se, espera-se que a onda se propague com a velocidade da luz. Eu acho que ainda é cedo incentivar a discussão dessas formulas.

O que realmente interessava a Poincaré era mostrar que a lei da gravitação universal de Newton poderia ser modificada a fim de preservar a integridade do princípio da relatividade, como fica bastante claro na conclusão de seu artigo.

A principal questão que enfrentamos é se essas leis de força são compatíveis com observações astronômicas; o desvio da lei de Newton é da ordem de ξ^2 [a velocidade ao quadrado], que significa 10.000 vezes menor do que se fosse da ordem de ξ , isto é, se a propagação ocorreu na velocidade da luz, *ceteris non mutatis*; portanto, nos permite acreditar que [o desvio] não será muito grande. No entanto, apenas uma discussão detalhada pode nos ensinar isso. (POINCARÉ, 1906, p. 550).

Infelizmente tal discussão detalhada nunca aconteceu.

Ele não escreveu outro trabalho de pesquisa sobre a teoria da relatividade. Em um curso universitário de 1906-1907 e em apresentações populares posteriores, ele forneceu alguns resultados numéricos sobre os efeitos da força de atração relativista. Os resultados numéricos que ele citou mostram que ele empregou sua segunda expressão da lei de força, que enfatiza a analogia com a eletrodinâmica. Eventualmente, uma discussão detalhada da consequência astronômica da nova lei de força foi publicada em 1911 por Willem de Sitter. De Sitter achou a teoria compatível com os dados observacionais (KATZIR, 2005a, p. 22).

Recentemente, documentos inéditos sobre Poincaré foram descobertos, e ficou provado que embora Poincaré não tenha feito a *discussão detalhada*, ele abordou os problemas gravitacionais em diversas aulas e palestras que ministrou, tendo inclusive calculado o avanço do periélio da órbita de mercúrio usando a força gravitacional que ele deduziu em 1905.

Em várias ocasiões nos sete anos seguintes, Poincaré voltou à questão da gravitação e da relatividade, sem nunca comparar as previsões de suas leis com a observação. Durante suas palestras na Sorbonne de 1906–1907, por exemplo, quando desenvolveu uma fórmula geral para o avanço do periélio, Poincaré usou uma abordagem Lagrangiana, em vez de uma ou outra de suas leis. As notas dos alunos deste curso indicam que ele parou antes de uma avaliação numérica para os vários modelos de elétrons (talvez deixando isso como um exercício). No entanto, Poincaré posteriormente forneceu os números relevantes em uma revisão geral da teoria eletrônica. A teoria de Lorentz previu um avanço extra de 7"00 por século para o periélio de Mercúrio, um valor ligeiramente maior que a da teoria eletrônica não-relativística de Abraham. De acordo com os melhores dados disponíveis, o avanço

anômalo do periélio de Mercúrio foi de 42''00, levando Poincaré a enfatizar que outra explicação teria de ser encontrada para explicar os segundos restantes do arco. Poincaré concluiu sobriamente, que as observações astronômicas não promoveram argumentos a favor da nova eletrodinâmica. (WALTER, 2007, p. 15)

A diferença de 35''00 entre teoria e observação astronômica, não era uma dificuldade na visão de Poincaré, pois ele era adepto da hipótese de Seeliger (WALTER, 2007). Do ponto de vista epistemológico, a maior objeção a hipótese de Poincaré, é que ela permite extrair infinitas fórmulas para força gravitacional, uma vez que é sempre possível escolher β de tal forma que sempre exista um ajuste perfeito entre teoria e experimento. Em outras palavras, é impossível falsificar, no sentido popperiano, a hipótese de Poincaré. Curiosamente, essa não foi a principal razão para o abandono das hipóteses de Poincaré sobre a gravitação. A rejeição da abordagem de Poincaré sobre a gravitação deu-se ao fato que ela não era uma teoria de campo, um requisito que se tornou parte essencial das teorias sobre a gravidade (WALTER, 2007).

6.3. Repercussão das Hipóteses sobre a Gravitação de Poincaré

Sua repercussão foi pequena, tendo sido pouco citado pelos seus contemporâneos, embora tenha chamado a atenção de pesquisadores eminentes como Hermann Minkowski, Henrik Lorentz, Arnold Sommerfeld e Willem De Sitter (KATZIR, 2005a, WALTER, 2007). O primeiro pesquisador eminente a citar o trabalho de Poincaré foi Hermann Minkowski (KATZIR, 2005a, WALTER, 2007).

Em um apêndice de um estudo mais aprofundado da relatividade de 1908, Minkowski tratou a gravitação “de uma maneira totalmente diferente” de Poincaré. Ele nem afirmou condições que a lei tinha para satisfazer nem fornecer uma descrição qualitativa das novas propriedades da lei. Ele desenvolveu a lei de força de uma maneira geométrica altamente abstrata baseada em sua representação geométrica da teoria da relatividade, sem qualquer apelo à experiência. Sua formulação parece derivar de considerações puramente matemáticas. A força é um vetor “espaço-tempo”, uma propriedade que garante sua covariância. No entanto, é expresso por grandezas geométricas, que devem ser traduzidas para serem fisicamente significativas. Essa força depende das “massas de repouso” dos dois corpos, da distância espacial entre eles e do velocidade da massa de atração. Tem dois componentes iguais em magnitude: um na direção da velocidade de quatro vetores da massa de atração (no momento de transmitir a atração), o outro em uma direção perpendicular à velocidade de quatro vetores da massa atraída. A velocidade da massa atraída aparece explicitamente na expressão apenas quando está escrita no espaço tridimensional clássico. Minkowski mostrou brevemente que

as previsões desta lei diferem das de Newton apenas em quantidades insignificantes. Para a Terra, o termo extra é multiplicado por um fator de 10^{-8} . A partir disso, ele concluiu que as observações astronômicas não podem objetar a essa lei. (KATZIR, 2005a, p. 24).

Enquanto as deduções de Poincaré partiam das propriedades do grupo de Lorentz e seus invariantes, Minkowski preferiu empregar uma dedução geométrica. Assim como o ensaio de Poincaré, o trabalho de Minkowski não despertou atenção, tendo a sua primeira menção apenas dois anos depois de sua publicação (WALTER, 2007). Em 1910, Arnold Sommerfeld escreveu um artigo sobre relatividade onde ele mostrou que o modelo de Minkowski era equivalente à lei para força gravitacional que Poincaré havia deduzido em seu artigo de 1906 (SOMMERFELD, 1910). Neste trabalho Sommerfeld mostrou que as leis relativísticas poderiam ser escritas tanto usando 4-vetores como 6-vetores e reescreveu as leis obtidas por Poincaré e Minkowski no novo formalismo matemático (WALTER, 2007)

Ainda nesse trabalho, Sommerfeld criticou as abordagens de Poincaré e Minkowski afirmando que elas eram incompatíveis com o princípio da reação (KATZIR, 2005a, WALTER, 2007, SOMMERFELD, 1910). Como na teoria de Poincaré e Minkowski à gravidade viaja através de ondas gravitacionais, em um tempo finito, a ação e a reação não ocorrem em tempos instantâneos. Poincaré já havia discutido um problema semelhante, mas envolvendo a eletrodinâmica de Lorentz, cuja solução o levou a supor que nos processos de emissão e absorção havia a criação e a destruição de um fluido fictício com inércia $m = E/c^2$ (DARRIGOL, 2004). Nesta época Poincaré parecia não considerar a lei da ação e reação como um princípio fundamental, portanto ele não considerava o argumento de Sommerfeld como uma objeção ao seu programa gravitacional (KATZIR, 2005a, WALTER, 2007, SOMMERFELD, 1910). No mesmo ano que Sommerfeld escreveu seu artigo e suas objeções, Lorentz adotou uma posição favorável à abordagem de Poincaré.

Lorentz, como Poincaré, adotou a segunda expressão para a lei sugerida no artigo de Poincaré. Essa expressão previa diferenças pequenas, mas observáveis, com a lei de Newton. Lorentz relatou o resultado primário para o avanço do periélio de Mercúrio para de Sitter, seu colega em Leiden. De acordo com de Sitter, Lorentz escolheu a segunda expressão da lei, “porque a força newtoniana correspondente não contém a velocidade” da massa atraída. Esta propriedade tornou semelhante à força eletrodinâmica. Essa foi provavelmente a principal razão para sua adoção por Lorentz. Ele elaborou a similaridade entre a força eletrodinâmica e a nova lei da força gravitacional, e mostrou que a segunda nega qualquer evidência de movimento absoluto. (KATZIR, 2005a, p. 25).

Em 1911, De Sitter tentou testar empiricamente a lei da gravitação de Poincaré, calculando os avanços do periélio dos planetas, principalmente Mercúrio e acomodando a hipótese de Seeliger (KATZIR, 2005a, WALTER, 2007, DE SITTER, 1911). Os resultados obtidos por De Sitter não eram suficientes para falsificar a lei gravitacional de Poincaré e mesmo que fossem, ela poderia ser sempre modificada a fim de acomodar as discrepâncias.

As duas leis são as únicas que foram realmente propostas, mas podemos, sem violar o princípio da relatividade, multiplicar a força por qualquer potência de C e, consequentemente, qualquer (múltiplo positivo ou negativo ou mesmo fracionário) das quantidades [do periélio] estará de acordo com esse princípio (DE SITTER, 1911, p. 406).

Do ponto de vista epistemológico, espera-se que uma teoria leva a resultados numéricos que possam ser testados experimentalmente. Contudo seu modelo gravitacional não satisfazia essas condições. Outro ponto, criticado por Sommerfeld e que teve ampla repercussão na academia, é que sua teoria não era uma teoria do campo (KATZIR, 2005a, WALTER, 2007). Além disso, a experiência de Eötvös, Pekar e Fekeem em 1909 e L. Southern em 1910, confirmaram a equivalência da massa gravitacional e inercial (WHITTAKER, 1953), premissa rejeitada por Poincaré. Ainda assim, os estudos históricos indicam que as principais razões para a rejeição da hipótese de Poincaré, por um lado, o desinteresse de quase toda comunidade científica europeia em investir em uma nova teoria da gravitação, por outro lado. A exceção eram os alemães, que atribuíam a criação da relatividade a Einstein (um conterrâneo) e estavam convictos que a nova teoria da gravitação deveria ser essencialmente uma teoria de campo.

6.4. Análise Fleckiana das Hipóteses sobre a Gravitação

No campo dos estudos sobre a natureza da ciência podemos distinguir duas tendências que visam esclarecer qual é o papel da ciência e da produção do conhecimento científico: positivistas e construtivistas. É importante salientar que:

Na tabela abaixo apresentamos de forma bastante resumida, correndo o risco de parecerem caricaturas exageradas, duas tendências e deixamos claro que os termos “positivista” e “construtivista” estão entre aspas, pois tratam de uma simplificação com fins didáticos. Tanto autores mais próximos da tendência “positivista” (como Francis Bacon, Auguste Comte ou Karl Popper) quanto os mais próximos da tendência “construtivista” (como Thomas Kuhn, Paul Feyerabend ou Bruno

Latour) não adotariam, em geral, esse tipo de postura. (BAGDONAS, SILVA, 2013, p. 217)

Tabela 1. Visões extremas sobre a natureza da ciência .

<u>Questão</u>	<u>Tendência “positivista”</u>	<u>Tendência “construtivista”</u>
Realidade	Modelos representam a realidade	Modelos são criações humanas
Verdade	A ciência é constituída de verdades atemporais	Não existe verdade, tudo é relativo.
Razão	A ciência é neutra, objetiva e racional	Conhecimento é opinião, a ciência contém elementos irracionais
Autoridade	O cientista é sempre crítico e duvida de toda autoridade estabelecida	Os cientistas são dogmáticos, sempre se submetem às regras estabelecidas pela comunidade científica
Experimento	A ciência parte de experimentos ou da observação	Toda observação é interpretada à luz de teorias prévias
Método	O método científico é universal e atemporal	Não existe método científico
Demarcação	O método científico caracteriza o que pode ser considerado científico	É impossível dizer “o que é ciência”, essa é uma definição arbitrária de cada sociedade.
Valor	A ciência é superior e mais confiável do que outras formas de conhecimento	Todas as formas de conhecimento são equivalentes

(BAGDONAS, SILVA, 2013, p. 217)

Feitas essas observações, usaremos essa definição simplificada para mostrar que a objetividade e a racionalidade dos positivistas nem sempre é verificado no desenvolvimento histórico da ciência. Mais precisamente, iremos estudar a contração do círculo esotérico do programa gravitacional de Poincaré e determinar as suas causas à luz de Popper (filósofo de tendência positivista) e à luz de Fleck (tendência construtivista). Durante o desenvolvimento da relatividade, existiam propostas de modificação da gravitação newtoniana, entre três coletivos de pensamento se destacam: a teoria de campo, a teoria da absorção e a teoria modificada de Lorentz. A teoria de campo era o coletivo de pensamento que predominava entre os prussianos como Arnold Sommerfeld, Max Abraham, Gunnar Nordström, Gustav Mie, Hermann Minkowski, David Hilbert e Albert Einstein. Essa vertente teria como principal produto a Teoria da Relatividade Geral (WALTER, 2015). A Teoria da Absorção, também chamada de Teoria da Sombra Gravitacional, havia sido proposta no século XVIII por Le Sage e foi testada experimentalmente por Quirino Majorana, Além dos dois pesquisadores mencionados, compunham esse coletivo de pensamento Isenkrahe, Ryšánek, du Bois-Reymond, Kelvin, Tait, Keller e Boisbaudran, (EDWARDS, 2002). A teoria modificada de Lorentz, foi a teoria proposta de Poincaré que estendia a covariância de Lorentz para os fenômenos gravitacionais, seu coletivo de pensamento foi bastante pequeno, tendo atraído em um

primeiro momento A. Sommerfeld e H. Minkowski, e posteriormente De Sitter (KATZIR, 2005a, WALTER, 2007).

Do ponto de vista popperiano, a teoria modificada de Lorentz proposta por Poincaré era de todas a mais fraca e devia ser descartada, pois ela apresentava infinitas soluções e por isso, ela sempre poderia ser ajustada aos resultados experimentais. Em outras palavras, ela não era falsificável. A Teoria da Relatividade Geral apresenta diversos problemas: não é compatível com a conservação de energia, pois não apresenta todas as correntes de Noether (BRADING, 2005). Não explica as flutuações irregulares da Lua e nem a precessão dos nós de Vênus. E, principalmente, havia reprovado em testes experimentais realizados na década de 10 e na década de 20 do século 20 (MARTINS, 1988, EARMAN, GLYMOUR, 1980). Já a Teoria da Absorção parecia incompatível com a eletrodinâmica de Lorentz (WHITTAKER, 1953), porém os efeitos da pressão gravitacional haviam sido constados pelo renomado físico experimental italiano Quirino Majorana (EDWARDS, 2002). Portanto, se a ciência segue a lógica de Popper, o modelo mais adequado seria a Teoria da Absorção. Porém, sabemos que a teoria que se tornou referência não foi outra, senão a Relatividade Geral, apesar de todos os seus problemas. E a razão disso, como mostraremos, deve-se a fatores muito mais culturais e políticos do que científicos, como reclama a epistemologia de Fleck.

O estilo de pensamento de Poincaré sobre a gravidade foi rejeitado, mas não pelas razões exigidas por Popper. Como uma pesquisa de Walter Scott (2007) mostrou, o principal argumento contra a teoria de Poincaré era o fato dela não ser uma teoria de campo. Na Alemanha, um forte coletivo de pensamento de teorias de campo havia sido estabelecido com intuito de fortalecer valores nacionalistas, expandir a cultura alemã pela Europa e garantir a predominância da ciência e tecnologia. Embora os alemães usassem uma teoria inglesa do eletromagnetismo, ela havia sido corroborada e modificada por Hertz, esta é a razão de nossos ensaios de Einstein e outros físicos alemães vermos o nome de Hertz sempre acoplado ao nome de Maxwell. Como observa Walter (2015) a premissa mais importante para o novo programa gravitacional que ele fosse uma Teoria de Campo. Já o estilo de pensamento de Poincaré sobre a gravitação não havia se condensado em um círculo esotérico e tão pouco formado um coletivo de pensamento que fosse tão influente quanto o alemão. Nesse sentido, a teoria da absorção gravitacional tinha um círculo maior, mas ainda inferior ao círculo alemão, que usava os físicos holandeses, como De Sitter e Lorentz, que eram “laicos”, para penetrar em países hostis a cultura alemã como a Inglaterra. Por exemplo, foi através de De Sitter que Arthur

Eddington, astrônomo real inglês, tomou conhecimento da Teoria da Relatividade Geral e convenceu seus colegas a realizar a expedição para medir a deflexão da luz no eclipse de 1919. Posteriormente, Eddington se tornaria um dos maiores divulgadores da Relatividade Geral, garantindo a expansão do coletivo de pensamento alemão (MARTINS, 2015).

Aqui, devemos enfatizar, um importante fato que pesa em favor da epistemologia de Fleck (e dos construtivistas), o papel social sobre a ciência. Poincaré pertencia a vários círculos esotéricos, podendo executar atividades desses círculos com destreza, porém o próprio Poincaré não se motivou em criar seu próprio círculo ou expandir seu estilo de pensamento. Como pesquisador e professor, Poincaré não teve nenhum herdeiro intelectual, embora eleito como membro de várias academias científicas, preferia trabalhar sozinho (MARTINS, 2015): nenhum de seus artigos ou livros apresentou um coautor.⁴³ Outro traço importante é os veículos na qual Poincaré tornava público suas ideias: revistas de baixa circulação e em geral de engenharia ou aspectos técnicos (GALISON, 2003). Como Poincaré não tinha alguém que assistisse a parte social de sua pesquisa científica, seu trabalho acabou tendo pouca circulação. Como aponta Chalmers (1998), a escolha de revistas de impacto, participação em grupos de pesquisa e a formação de herdeiros intelectuais são elementos sociais vitais para a fabricação e expansão da ciência. Nesse sentido Chalmers (2017) concorda com Fleck (1986), não há como expandir um círculo esotérico sem a circulação intercoletiva e a preparação de um contexto social adequado.

Registre que Poincaré foi o primeiro a defender o princípio da relatividade como um estilo de pensamento unificador dos círculos da física, mas quem tem sido lembrado e creditado é Albert Einstein, um físico alemão. Veja que esse fato não é acidental, mas se deve a um processo social de expansão do círculo esotérico da ciência e cultura alemã. Um fato que corrobora essa hipótese é o livro “O Princípio da Relatividade”, organizado por Arnold Sommerfeld. Os ensaístas são: Lorentz, Einstein, Minkowski, Sommerfeld e Weyl. Há exceção de Lorentz, que era holandês, e Minkowski, que era lituano, mas estava radicado na parte prussiana da Suíça, todos os pesquisadores são alemães. E registre que Sommerfeld conhecia os trabalhos de Poincaré. Portanto, verificamos um aspecto fundamental da ciência: o fator social e cultural é fundamental no desenvolvimento da construção do conhecimento científico. Salientamos como a participação do Bureau das

⁴³ Poincaré não pertencia a grupos de pesquisa e nem a institutos como até hoje é bastante comum. Porém, Poincaré mantinha-se informado dos acontecimentos científicos e se correspondia com os colegas.

Longitudes e a guerra pela longitude, que envolvia cálculos da geodésica e sincronização de relógios, levaram Poincaré a buscar a solução de problemas técnicos na física, na matemática, na geometria, na filosofia e na astronomia. Como declara Fleck (1986) quanto maior são as circulações intercoletivas, maior são as transformações dos estilos de pensamento e isso verifica-se na fabricação da relatividade de Poincaré.

O fator social se faz ainda mais presente quando analisamos o desenvolvimento das ideias de Einstein. A semelhança entre a teoria de Einstein e Poincaré tem sido discutida por vários historiadores da ciência, Miller (1997), Holton (1966-1967, 1968) e Goldenberg (1966) acreditam que o trabalho não foi fortemente influenciado pelos trabalhos de Poincaré, embora Giannetto (1999) e Katzir (2005a, 2005b) tenham uma opinião diferente. Mesmo que Einstein tenha tido uma influência de Poincaré, não podemos atribuir apenas a esse fato a semelhança dos estilos de pensamento dos dois pesquisadores. Da perspectiva fleckiana, o fator de grande importância são as condições sociais que devem ser semelhantes. Por exemplo, um exame do contexto histórico de Einstein (GALISON, 2003) mostra que no escritório de patentes, Einstein era obrigado a lidar com problemas técnicos de sincronização de relógios, semelhante aos de Poincaré.

6.5. O Valor das Hipóteses Sobre a Gravitação de Poincaré

A interpretação whiggista da história da relatividade tende a minimizar a importância das hipóteses de Poincaré sobre a gravitação, alegando que, 10 anos depois, Albert Einstein apresentaria a Teoria da Relatividade Geral, uma abordagem fundamentada na geometrização do espaço-tempo, e que é superior à proposta de Poincaré. Em 1905, nenhum pesquisador poderia antever a criação da Teoria da Relatividade Geral. O fato que Poincaré, diferente de Einstein, não negligenciou a divergência entre o princípio da relatividade e a velocidade de propagação da gravidade, que colava em risco a teoria da relatividade.

A ausência de qualquer tratamento da gravitação na teoria de 1905 de Einstein torna sua discussão da simultaneidade e, portanto, toda a teoria, aberta a dúvidas e objeções, como aquelas que Poincaré levantou em 1904. O tratamento da gravitação fez a teoria relativística de Poincaré de 1905 mais completa que a teoria de Einstein do mesmo ano. No entanto, essa teoria é mais completa que outra não é necessariamente uma vantagem. Poincaré sugeriu uma teoria relativista simples de movimento uniforme que inclui gravitação e concorda com os dados observacionais. O objetivo de Einstein era muito mais ambicioso e, a longo prazo, mais bem-sucedido. A consolidação da gravitação na

teoria da relatividade de Poincaré poderia ter desencorajado os físicos de procurar uma teoria alternativa. As exigências de Poincaré da força eram o mínimo necessário para torná-la compatível com o princípio da relatividade e com os dados empíricos conhecidos. Físicos que viram na inclusão da gravitação na nova física relativista uma questão em aberto tinham exigências adicionais que eventualmente levaram a uma teoria muito mais bem-sucedida. Sendo mais completo, menos revolucionário e em melhor acordo com a teoria clássica do que a visão da gravitação de Einstein, o caminho de Poincaré não teria levado à teoria geral da relatividade. Pode-se ter ficado satisfeito com a lei de atração da força indefinida que se propaga pelo espaço. (KATZIR, 2005a, p. 30).

Só por conseguir reconciliar o princípio da relatividade com a teoria gravitacional, já testemunha a importância das hipóteses de Poincaré sobre a gravitação e a necessidade de se estudá-las. Porém, há outro aspecto importante no trabalho de Poincaré. Para estender a covariância de Lorentz para os fenômenos gravitacionais, Poincaré foi construiu, pela primeira vez na história da física, grandezas quadrimensionais. Em seu trabalho ele obteve duas importantes grandezas que atualmente identificamos como as componentes quadrivetor de transformação da força e do quadrivetor momento-energia:

$$\frac{(\vec{F}, \vec{F} \cdot \vec{v})}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \frac{m_0 (\vec{v}, 1)}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

antecipando os trabalhos de Planck. Minkowski e Laue.

Alguém poderia argumentar que a proposta de Poincaré estava fadada ao fracasso porque era “problemática demais” e que somente a Teoria da Relatividade Geral foi capaz de superar todas as dificuldades. Essa afirmação é falaciosa. Como mostraram Fleck (1986), Kuhn (2017), Lakatos (1979) e Feyerabend (2010) um paradigma pode ser aceito, apesar de todas as dificuldades conceituais. Essas dificuldades podem ser resolvidas pelo paradigma em um momento posterior (e se tornam argumentos favoráveis na adoção do paradigma) e, em alguns casos, podem ser deliberadamente ignorados. E foi justamente isso que acontece com a Relatividade Geral. A teoria nunca conseguiu explicar a precessão dos nós orbitais de Vênus, nem as flutuações irregulares da Lua. Além disso, Emmy Noether e Félix Klein (CATTANI, MARIA, 1993, EARMAN, GLYMOUR, 1980, BRADING, 2005) provaram que é impossível conciliar o princípio da conservação de energia com o princípio da covariância geral.

6.6. Considerações Finais

Nesse breve relato, mostramos que em alguns aspectos a abordagem de Poincaré era mais ampla que a abordagem de Einstein. Mas uma abordagem mais ampla, nem sempre se mostra mais vantajosa a longo prazo, como a história da relatividade nos prova. Uma abordagem modesta, como era a proposta original de Einstein, podem ser mais interessante aos pesquisadores, pois são mais flexíveis e permitem um número maior de desdobramentos. Outro fator importante para consolidação de uma determinada abordagem é a comunicação e a propaganda (FLECK, 1986, KUHN, 2017, LAKATOS 1979, FEYERABEND, 2010). Poincaré costumava a publicar em periódicos de pouca circulação e com baixo fator de impacto. Poincaré também nunca foi cegado pela fama acadêmica e nunca se interessou por conflitos de prioridade. Embora seja consensual que Poincaré foi o primeiro pesquisador a defender a universalidade do princípio da relatividade, ele nunca reconheceu sua prioridade e atribuía a Lorentz, que, como já dissemos, só percebeu a importância desse princípio após a publicação dos trabalhos de Poincaré e Einstein. Poincaré também não se preocupou em mobilizar a comunidade científica francesa em investir em suas ideias. Os alemães, por outro lado, formavam um grupo mais coeso, e perceberam, ainda que tardiamente, o potencial do princípio da relatividade.

Um estudo cientométrico realizado por Walter (2011) mostrou que o interesse pela teoria da relatividade foi bastante modesto, até 1912, e ficou concentrada na Alemanha. A Alemanha e a França mantinham uma forte rivalidade cultural e científica (KRAUGH, 2001)⁴⁴, e não seria surpreendente que eles preferissem atribuir a prioridade à Einstein (alemão) ao invés de Poincaré (francês). Duas evidências suportam essa hipótese. A primeira foi que Minkowski deliberadamente omitiu resultados obtidos por Poincaré para aumentar a relevância do seu próprio trabalho (WALTER, 1999). Em 1913, A. Sommerfeld organizou uma coleção de ensaios sobre a Teoria da Relatividade Especial e Geral, com o título de *Das Relativitätsprinzip* (SOMMERFELD, 1913), estranhamente, Sommerfeld não incluiu nenhum dos ensaios de Poincaré.

Outro fator que pode ter contribuído para a comunidade científica preferir a abordagem de Einstein, foi a campanha propagandística empreendida por Arthur

⁴⁴ Um dos episódios mais emblemáticos entre a rivalidade franco-prussiana foi sobre a disputa de prioridade sobre a criação da química moderna. Os franceses alegavam que era mérito de Lavoisier enquanto os alemães reclamavam a prioridade à Paracelso. Além disso, cada nação acusava a outra de produzir uma má ciência [5]. As tensões políticas no começo do século XX, que acabariam desencadeando as duas guerras mundiais, serviu para aumentar ainda mais essa tensão ([54], [55], [56])

Eddington para aceitação da Teoria da Relatividade Geral de Einstein (EARMAN, GLYMOUR, 1980, SPONSEL, 2002, MARTINS, 2015)⁴⁵. Inicialmente, Einstein também não se esforçou em divulgar o princípio da relatividade. Suas principais publicações sobre o assunto ocorreram entre 1905 e 1907 (EINSTEIN, 1905a, 1905b, 1906a, 1906b, 1907a, 1907b, 1911). Entre 1908 e 1911, Einstein se dedicou mais a teoria quântica⁴⁶. Em 1911, Einstein publicou um importante trabalho discutindo a influência da gravidade sobre a luz (EINSTEIN, 1911). Em 1912, quando os alemães passaram a investir em uma teoria relativística da gravitação e adotaram a abordagem de Einstein e Minkowski como ponto de partida que Einstein retomou seu interesse pela relatividade. Até 1919, Einstein era conhecido apenas entre os círculos acadêmicos. Foi Eddington que ajudou a consolidar a fama e a prioridade da Relatividade a Einstein (EARMAN, GLYMOUR, 1980, SPONSEL, 2002, MARTINS, 2015). A partir do seu reconhecimento internacional, Einstein também passou a defender a relatividade como uma criação sua. Em 1922, ele deu uma palestra em Quioto com o nome *How I Created the Theory of Relativity* (EINSTEIN, 1982). Esse comportamento de atribuir a si o mérito da criação da relatividade se repetiu em textos técnicos, de divulgação científica e nas entrevistas. Em suas *Notas Autobiográficas* (EINSTEIN, 1991), Einstein alega ter tido os primeiros insights da Teoria da Relatividade em sua adolescência, contudo, pesquisas históricas colocaram em dúvida a veracidade desse relato (MARTINS, 2015). Seus colegas e amigos, como W. Pauli (1958), M. Born (1968) e A. Pais (1982) construíram narrativas que reforçavam que Einstein era o verdadeiro “pai da relatividade” (BORN, 1968, PAIS, 1982). Esses fatos e a inexistência de uma historiografia sistemática da ciência, ajudaram a construir o mito de Einstein e lançar ao limbo todas as contribuições de Poincaré. Mesmo hoje que dispomos de uma historiografia da ciência, ainda persiste na historiografia da Teoria da Relatividade a visão *whiggista* que tende a estimar o trabalho de Einstein e minimizar as contribuições de Poincaré.

Cegados pelo brilho do pensamento de Einstein, alguns historiadores não conseguiram ver que componentes importantes de sua teoria também estavam presentes em Poincaré. Por exemplo, algumas vezes eles sustentam que o princípio da relatividade pertencia apenas a

⁴⁵ Do ponto de vista historiográfico, a Teoria da Relatividade Geral também foi uma construção coletiva e, portanto, é anacrônico atribuir a prioridade somente a Einstein (MEHRA, 1974). Ocorre que Eddington, um pacifista, preocupado com a tensão política, cultural e científica entre a Alemanha e o resto da Europa, fez uma ampla campanha para aceitação da Teoria da Relatividade Geral, como um exemplo de boa ciência alemã, e atribuiu a prioridade a Einstein, que seria um exemplo de bom cientista alemão. Para detalhes ver (EARMAN, GLYMOUR, 1980, SPONSEL, 2002, MARTINS, 2015)

⁴⁶ Einstein publicou algumas revisões de seus trabalhos anteriores sobre a relatividade nesse período.

Einstein porque Poincaré manteve uma distinção física entre diferentes sistemas de referência inerciais. Embora a última afirmação seja verdadeira, a primeira se segue apenas se o princípio da relatividade for definido como implicando completa equivalência entre diferentes referenciais inerciais; de acordo com a declaração de princípio de Poincaré, no entanto, apenas a equivalência fenomenal, não a equivalência representacional, é necessária. Historicamente, o ponto importante é que esse princípio mais limitado era uma grande novidade quando Poincaré o introduziu. Outro exemplo de viés pró-Einstein é a ignorância ou minimização da interpretação de Poincaré do tempo local de Lorentz. Até muito recentemente, a maioria dos historiadores da relatividade ignorou o fato de que Poincaré ofereceu essa interpretação em 1900, em um livro de ensaios amplamente lido. Mesmo que eles reconhecessem sua ocorrência na palestra de Poincaré em St. Louis em 1904, eles falharam em ver a semelhança estrutural com a derivação de Einstein das transformações de Lorentz. (DARRIGOL, 2004, p. 617)

Alguns comentaristas ainda usam o argumento de que Poincaré era apenas um “matemático” e por isso não conseguiu fornecer uma interpretação física para o princípio da relatividade. Isso é completamente falacioso. Poincaré se formou em Engenharia de Minas, exercendo o ofício, imediatamente após a sua formatura. Após abandonar a carreira de engenheiro de minas, Poincaré se tornou supervisor pelo Bureau das Longitudes do observatório francês onde conduziu diversas comissões tinham como objetivo medir a geodésica francesa (POINCARÉ, 1900c, 1900d, 1903) e construir estações de telégrafo sem fio, que permitisse que as embarcações efetuassem um cálculo mais preciso da longitude (POINCARÉ, 1900e, 1902b, 1902c, 1904b, 1904d); Todas estas atividades exigiam de Poincaré uma perspectiva cognitiva prática e experimental, que contrasta com a perspectiva cognitiva dos matemáticos.⁴⁷

Enquanto professor de Sorbonne, Poincaré adotou uma postura pouco convencional para um professor catedrático, ao invés de ministrar apenas uma disciplina, a cada período, Poincaré trocava de disciplina. Desta forma, Poincaré ministrou eletromagnetismo, óptica, termodinâmica, mecânica celeste, mecânica racional, mecânica dos fluídos. Em seus cursos, Poincaré sempre tentava trazer as novidades daquele campo e apresentava reflexões profundas. Como o próprio Lorentz (1921) reconheceu, Poincaré

⁴⁷ Os aspectos biográficos sobre Poincaré citados nesse parágrafo e no próximo foram retirados das referências (GALISON, 2003, GINOUX, GERINI, 2014, MARTINS, 2015).

foi o primeiro pesquisador a reconhecer o significado físico de suas transformações⁴⁸ e a fazer uma ampla defesa da universalidade do princípio da relatividade.⁴⁹

Portanto, minimizar as contribuições de Poincaré alegando que ele era apenas um “matemático” é uma atitude reducionista e anacrônica, típicas de uma historiografia *whig*. Qualquer avaliação sobre a história da teoria da relatividade deve ser feita esquivando da tendência de enaltecer ou justificar racionalmente o trabalho de Einstein apenas porque este se tornou o paradigma padrão. É preciso reconhecer que os méritos e as diferenças entre as abordagens de Einstein e Poincaré, evitando ao máximo, um julgamento parcial.

Gostaríamos de encerrar esse ensaio com as reflexões de Mccomas (1996) que escreveu um importante trabalho sobre mitos que estudantes, professores e cientistas ainda tem a respeito da ciência e seu processo de construção:

Somente eliminando a névoa das meias-verdades e revelando a ciência em sua plena luz, com conhecimento de ambas as suas forças e limitações, os aprendizes se apaixonarão pela verdadeira exposição da ciência e poderão avaliar com justiça seus processos e produtos. (MCCOMAS, 1996, p. 15).

6.7. Síntese Fleckiana sobre a Gravitação

A última parte de sua tese, *Sur la Dynamique de l'Électron*, é dedicada as consequências do princípio da relatividade sobre a Gravitação. No quarto volume de seu livro, *Mecânica Celeste*, Lagrange calculou que a velocidade da gravidade deveria ser da ordem de milhões da velocidade da luz. Poincaré concluiu, acertadamente, que a gravidade poderia ser usada para fazer a sincronização absoluta de relógios. Portanto, era preciso verificar se era possível modificar as teorias vigentes para acomodar o princípio da relatividade. Em 1905, as conexões passivas sobre a gravitação eram:

- A Teoria da Gravitação de Newton e a Teoria da Sombra (Le Sage)
- As Teorias da Gravitação são Incompatíveis com a Teoria de Lorentz
- Desigualdades de Newcomb e o Anel Zodiacal de Seeling

⁴⁸ Whittaker foi bastante perspicaz ao afirmar que Lorentz e Poincaré inverteram os papéis. Lorentz, apesar de físico, agiu como um matemático vendo as transformações que levam seu nome como truques matemáticos convenientes. Poincaré, que era doutor em matemática, dedicou-se a compreender as implicações física do trabalho de Lorentz.

⁴⁹ O próprio Lorentz (1921) admitiu que, diferente de Einstein e Poincaré, não percebeu o potencial heurístico do princípio da relatividade.

Poincaré, provavelmente ciente das dificuldade de Lorentz em harmonizar sua eletrodinâmica com a teoria da sombra, optou por modificar a lei de Newton. Desta forma, as conexões ativas que Poincaré suscitou eram:

- É possível harmonizar a teoria de Lorentz com a teoria de Newton?
- Os valores da nova teoria são compatíveis com dados astronômicos?
- Quais previsões da nova teoria?

Optando por considerar a massa gravitacional como invariante (dois anos depois, Planck e Eötvös mostraram que ela se transforma como a massa inercial) e utilizando o seu grupo de Lorentz e a estrutura 4-dimensional do espaço-tempo, Poincaré construiu grandezas físicas 4-dimensionais e conseguiu obter o primeiro modelo relativístico da gravitação (novas conexões passivas)

- É possível alterar a lei da gravitação de Newton para acomodar o princípio da relatividade. A luz se propaga em ondas gravitacionais à velocidade da luz.
- A massa gravitacional não sofre transformações como a massa inercial.
- Existem pequenas variações do periélio de Mercúrio compatível com o modelo de Seeling.
- A equação apresenta infinitas soluções.

O número infinito de soluções e o fato da teoria não ser de campo, levaram ao programa de Poincaré sofrer uma degenerescência. Porém, o programa de Poincaré não deve ser descartado. Como efeito colateral, ele permitiu Poincaré compreender a regra de construção de grandezas físicas de 4 dimensões e seus respectivos invariantes. Ele também foi importante para continuidade da Teoria da Relatividade, pois Poincaré mostrou que era possível estender o princípio para a gravitação e manter, no limite clássico, válida a lei de Newton. Se Poincaré tivesse provado que é impossível conciliar a relatividade com a gravitação, isso poderia acabar levando os físicos a buscar uma solução alternativa e degenerando a Teoria da Relatividade.

7. UM ESTUDO COMPARADO ENTRE AS INTERPRETAÇÕES DE LORENTZ-POINCARÉ E EINSTEIN SOBRE A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL

Em 2005, o historiador da ciência Roberto de Andrade Martins, publicou um importante trabalho, intitulado *El empirismo en la relatividad especial de Einstein y la supuesta superacion de la teoria de Lorentz y Poincaré*, onde ele compara as interpretações de Lorentz-Poincaré e Einstein e discute se esta última era de alguma forma superior a primeira. Nesta seção acrescentaremos novos elementos a análise de Martins (2005) e mostraremos que do ponto de vista sincrônico, o programa de Lorentz e Poincaré era mais completo e mais consistente que o de Einstein. Essa análise também irá confirmar que

O estudo adequado de alguns episódios históricos também permite perceber o processo social (coletivo) e gradativo de construção do conhecimento, permitindo formar uma visão mais concreta e correta da real natureza da ciência, seus procedimentos e suas limitações – o que contribui para a formação de um espírito crítico e desmitificação do conhecimento científico, sem no entanto negar seu valor. A ciência não brota pronta, na cabeça de “grandes gênios”. Muitas vezes, as teorias que aceitamos hoje foram propostas de forma confusa, com muitas falhas, sem possuir uma base observacional e experimental. Apenas gradualmente as ideias vão sendo aperfeiçoadas, através de debates e críticas, que muitas vezes transformam totalmente os conceitos iniciais. (MARTINS, 2006, p. XXII).

Inicialmente começaremos revendo os principais pontos discutidos no artigo de Martins (2005) e os seus argumentos, posteriormente compararemos alguns pontos do programa de Lorentz-Poincaré e de Einstein, tentando verificar se há argumentos epistemológicos ou científicos que pesem a favor de um dos programas. Há outros trabalhos que fizeram comparações entre estes dois programas Goldenberg (1970) e Holton (1973), buscaram diferenciar as abordagens e mostrar porque o trabalho de Einstein era superior ao de Lorentz e Poincaré, por outro lado Zahar (1973), Schaffner (1974) e Prokhorovnik (1974) mostraram que o programa de Einstein, Lorentz e Poincaré eram equivalentes, do ponto de vista epistemológico, e buscaram estabelecer as condições históricas para a superação de Einstein. Entretanto há três elementos que diferenciam a nossa análise das demais:

1. Nós consideramos todas as contribuições prévias que Lorentz, Poincaré e Einstein tiveram acesso enquanto escreviam seus *papers*, permitindo saber até que ponto certas ideias e descobertas eram realmente inovadoras.

2. Consideramos os trabalhos de Lorentz e Poincaré desenvolvidos entre 1885 e 1905 como um único programa, já que as contribuições de Poincaré se deram em grande parte em resposta aos trabalhos de Lorentz.

3. Nós comparamos o conteúdo científico dos programas de Einstein e Poincaré, analisando a consistência lógica, matemática e física e apontando erros e falácias lógicas, caso existam, em cada um dos programas, permitindo estabelecer uma qualificação local e global de ambos os programas.

Sobre o primeiro ponto, é importante esclarecer que Einstein não faz citação nenhuma em seus primeiros papers da relatividade, o que torna difícil saber quais foram suas influências. Holton (1965-1966) conduziu uma pesquisa sobre as fontes que Einstein teve acesso. Nesse trabalho Holton evidencia que a experiência de Michelson-Morley não foi crucial para Einstein (talvez ele sequer a conhecesse na época) e dá uma grande ênfase aos textos alemães que Einstein leu e apresentavam uma tendência fenomenológica. Pyenson (1983) estudou a educação superior de Einstein, fornecendo outras influências na formação científica de Einstein, como a aversão de Einstein pela matemática e sua falta de interesse por astronomia, que o levaram a defender que a física deveria fazer um uso mínimo da matemática e prestigiar a intuição. Miller (1983) classificou obras, autores e periódicos que Einstein provavelmente teve acesso, que é pouco provável que ele conhecesse e que com certeza ele desconhecia. O acesso a cartas trocadas entre Einstein e sua primeira esposa Mileva e com seus amigos, também trouxeram à luz a novos trabalhos que Einstein teve acesso. Com base nesses documentos podemos dizer até que ponto as contribuições de Einstein eram pioneiras e originais. Infelizmente a maioria dos autores ao estudarem Einstein não levam em consideração essas influências, tratando o trabalho de Einstein como uma obra realizada livre de interferências externas. Quanto a Lorentz e Poincaré, esse problema é incomum, já que ambos costumavam a creditar outros autores em seus trabalhos. Esta é uma questão essencial para garantirmos o diacronismo histórico em nossa análise.

Sobre o segundo o ponto alguns autores como Miller (1986) costumavam a comparar apenas *Sur la dynamique de l'électron* de Poincaré ou *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light* de Lorentz com os dois papers de Einstein de 1905. Diferente de Einstein que condensou as suas

ideias em *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, e no mesmo ano publicou um pequeno anexo a esse trabalho de quatro páginas onde analisou a relação massa e energia, o trabalho de Poincaré e Lorentz foi sendo gradativamente construído entre 1885 e 1905. É completamente anacrônico escolher o trabalho mais recente deles e comparar com os do Einstein, já que muitos pontos importantes não são discutidos nesses trabalhos justamente por terem sido abordados em outros papers. Por isso, por uma questão de sincronismo, nossa análise leva em consideração toda a produção científica de Lorentz e Poincaré até 1905, ano em que Einstein publicou seus dois trabalhos sobre a relatividade.

Por fim, o terceiro ponto compara as deduções feitas por Lorentz e Poincaré e as propostas por Einstein. Não fizemos uma análise epistemológica entre os dois programas, pois esta já foi feita no trabalho de Roberto de Andrade Martins (2005). Na próxima seção abordaremos os principais tópicos a respeito dessa análise e mostraremos que o programa de Poincaré e Lorentz e o programa de Einstein são equivalentes, isto é, tem as mesmas consequências lógicas, físicas e matemáticas. Porém, muitas vezes os autores empregam argumentos errados, que posteriormente são modificados, cometem erros na dedução, valem-se de saltos lógicos ou princípios de petição. Nossa análise consiste em verificar se as abordagens adotadas por Lorentz, Poincaré e Einstein, dentro da lógica interna da teoria, são consistentes. Por fim, analisaremos qual foi a recepção da teoria de Lorentz e Poincaré e a teoria de Einstein nos anos seguintes e como os próprios autores viam seus trabalhos e de seus colegas. Esperamos com essa análise esclarecer o complexo processo de construção de uma teoria e de sua aceitação pela comunidade científica.

7.1. Equivalência Epistemológica entre a Relatividade de Lorentz-Poincaré e Einstein

Talvez, hoje possamos ver com certa facilidade algumas vantagens da abordagem de Einstein sobre a abordagem de Poincaré, mas quando voltamos ao começo do século XX, essas diferenças vão se tornando cada vez menos perceptíveis. Como observou Darrigol (2004, p. 616):

Tem sido frequentemente argumentado que a abordagem de Einstein tem maior simplicidade lógica, pois distingue claramente entre três tipos de propriedades físicas: cinemática, dinâmica e dependente do modelo. A teoria da relatividade de Einstein de 1905 é deliberadamente uma teoria de princípios que se esquia de características "construtivas" dependentes do modelo, enquanto a teoria de Poincaré é uma "dinâmica do elétron", como afirmam os títulos de suas publicações de 1905 e

1906. No entanto, a diferença não é tão grande quanto parece à primeira vista. Em 1900, Poincaré já entendia que o tempo local de Lorentz poderia ser derivado (em primeira ordem) como uma convenção da medida do tempo próprio entre observadores em movimento. Em suas palestras na Sorbonne de 1906 e em publicações posteriores, ele mostrou que as transformações de Lorentz exatas eram compatíveis com a mesma convenção, junto com a suposição da contração de Lorentz. Embora este não fosse um raciocínio puramente cinemático no sentido de Einstein, Poincaré poderia, portanto, justificar as transformações de Lorentz sem apelar para as equações de Maxwell-Lorentz. Nas mesmas palestras, ele obteve a dinâmica relativística de uma partícula buscando uma generalização covariante da dinâmica newtoniana, independentemente de qualquer modelo específico. Portanto, em 1906 algumas das diferenças estruturais entre as derivações de Einstein e Poincaré das fórmulas relativísticas básicas estavam ausentes, apesar de um contraste persistente na base conceitual.

Estabelecer esse contraste entre as abordagens de Einstein e Poincaré tem sido objeto de discussão dos historiadores da relatividade. O que dificulta a realização destas análises é o fato que

As teorias da relatividade de Einstein e Poincaré são incomensuráveis: alguns dos conceitos básicos e deduções de uma teoria não têm contrapartida na outra. Alguns comentaristas, ignorando esta incomensurabilidade, interpretaram mal as relações entre as duas teorias e concluíram que a abordagem de Poincaré era basicamente inconsistente. Outros, por outro lado, exageraram a incomensurabilidade e, conseqüentemente, subestimaram as semelhanças entre as duas teorias. A dificuldade é que, para comparar teorias incomensuráveis, deve-se identificar um estrato conceitual que elas compartilham implicitamente. (DARRIGOL, 2004, p. 616)

Uma análise dos manuscritos produzidos por Poincaré, entre 1895 e 1905 e os ensaios de 1905 de Einstein permite identificar os seguintes conceitos comuns, entre as duas abordagens:

- 1) O processo de sincronização de relógios por meio da troca de sinais ópticos.
- 2) A relatividade do espaço, do tempo e da simultaneidade.
- 3) A validade universal do princípio da relatividade, segundo o qual as leis da física são as mesmas em todos os referências inerciais.
- 4) A invariância da velocidade da luz medida em todos os referenciais inerciais.
- 5) A covariância de Lorentz do espaço e do tempo
- 6) A covariância de Lorentz equações de Maxwell-Lorentz.
- 7) A exigência de que todas as leis da física sejam invariantes sob as transformações de Lorentz.

8) As leis relativísticas do movimento, em especial, a regra de adição de velocidades.

9) A dependência da inércia com a velocidade que deve se tornar infinita caso o corpo seja acelerado até a velocidade da luz.

10) O princípio da relatividade e o princípio da conservação de energia levam a paradoxos quando aplicados conjuntamente aos processos de radiação.

Sobre essas semelhanças entre as abordagens de Einstein e Poincaré, Darrigol (2004, p. 615) enfatiza que:

Em vários pontos - a saber, o princípio da relatividade, a interpretação física das transformações de Lorentz (de primeira ordem) e os paradoxos da radiação - As publicações relevantes de Poincaré antecederam o artigo da relatividade de Einstein de 1905 em pelo menos cinco anos, e suas sugestões eram radicalmente novas quando surgiram pela primeira vez. Nos demais pontos, a publicação foi quase simultânea.

Reconhecidas as semelhanças entre as duas abordagens, convém identificar as principais diferenças conceituais entre as duas abordagens. Darrigol (2004, p. 616), aponta que as principais diferenças entre as duas abordagens são:

Einstein eliminou completamente o éter, exigiu que a expressão das leis da física fossem as mesmas em qualquer referencial inercial e introduziu uma "nova cinemática" em que o espaço e o tempo medidos em diferentes sistemas inerciais estivessem exatamente iguais. Em contraste, Poincaré manteve o éter como um sistema de referência privilegiado no qual o espaço e o tempo "verdadeiros" eram definidos, enquanto ele considerava o espaço e o tempo medidos em outros sistemas apenas como "aparentes". Ele tratou a contração de Lorentz como uma hipótese a respeito do efeito do movimento de borda de uma haste através do éter, enquanto para Einstein era uma consequência cinemática da diferença entre o espaço e o tempo definidos pelos observadores em movimento relativo. Einstein deu o significado operacional de dilatação do tempo, enquanto Poincaré nunca o discutiu. Einstein derivou a expressão da transformação de Lorentz de seus dois postulados (o princípio da relatividade e a constância da velocidade da luz em um dado sistema inercial), enquanto Poincaré obteve essas transformações como aquelas que deixam as equações de Maxwell-Lorentz invariantes. Considerando que Einstein, tendo eliminado o éter, precisava de um segundo postulado, na visão de Poincaré a constância da velocidade da luz (no referencial do éter) é derivada da suposição de um éter estacionário. Einstein obteve a dinâmica de qualquer partícula em movimento rápido pelo uso direto da covariância de Lorentz, enquanto Poincaré raciocinou de acordo com um modelo específico do elétron construído em conformidade com a covariância de Lorentz. Einstein viu que os paradoxos da radiação de Poincaré só podiam ser resolvidos assumindo a inércia da energia, enquanto Poincaré nunca voltou a essa questão. Por último, Poincaré propôs imediatamente uma modificação relativística da lei da gravitação de Newton e viu as

vantagens de um formalismo de quatro vetores neste contexto, enquanto Einstein esperou alguns anos para resolver este problema complexo.

Ainda podemos acrescentar três conceitos que apenas Poincaré abordou (DAMOUR, 2017):

- 1) A construção da lagrangeana relativística para o elétron;
- 2) Interpretou as transformações de Lorentz como “rotações” em um espaço quadrimensional, com coordenadas “ $x, y, z, t\sqrt{-1}$ ” e desenvolveu o método de construção de invariantes relativísticos;
- 3) A álgebra de Lie do Grupo de Lorentz ($SO(1,3)$);
- 4) As tensões de Poincaré: forças de natureza não elétrica sobre o elétron que garantem a sua estabilidade. É importante frisar que esses resultados também podem ser derivados e interpretados à luz da abordagem de Einstein. Com efeito, por mais que as duas abordagens tenham diferenças radicais, não há uma forma objetiva para se decidir qual é a abordagem mais adequada.

Essas diferenças entre as duas teorias às vezes são consideradas como implicando em diferentes previsões observáveis, mesmo dentro do domínio do eletromagnetismo e da óptica. Na realidade, não existe tal discordância, pois o éter de Poincaré é por suposição perfeitamente indetectável, e toda dedução feita na teoria de Einstein pode ser traduzida em uma dedução na teoria de Poincaré por (artificialmente) decidir que um determinado sistema de referência é o sistema etéreo e por meio da distinção entre o espaço e tempo “verdadeiro” desse sistema e o espaço e tempo “aparente” dos outros. Como o próprio Lorentz comentou certa vez, a diferença entre as duas teorias é meramente epistemológica: diz respeito à quantidade de elementos convencionais e arbitrários que estamos dispostos a introduzir na definição dos conceitos físicos básicos. A abordagem de Einstein é mais econômica, pois evita distinções físicas que não têm contrapartida empírica (como a distinção entre a indução por um ímã em movimento e a indução por um fio em movimento); A abordagem de Poincaré é mais intuitiva, na medida em que mantém conceitos e formas de raciocínio que há muito se reconhecem perfeitamente adaptados à física dos fenômenos cotidianos. (DARRIGOL, 2004, p. 616).

Os argumentos de Darrigol são ratificados por Martins (2005b), que também empreendeu uma análise epistemológica entre as duas abordagens empreendidas. Seja qual for a razão pela qual a abordagem de Einstein “superou” a de Poincaré, não deixa de ser interessante investigar a proposta de Poincaré e em quais pontos ela difere das concepções contemporâneas.

7.2. Um Estudo Comparado entre a Teoria da Relatividade de Lorentz-Poincaré e Einstein

Na seção anterior, mostramos as semelhanças e diferenças entre as abordagens de Lorentz-Poincaré e Einstein e declaramos que as duas abordagens são equivalentes, do ponto de vista epistemológico. Um estudo detalhado sobre essa equivalência foi feito Martins (2005b). Como esse é um aspecto importante da historiografia e epistemologia da Teoria da Relatividade, iremos discutir o artigo de Martins (2005b) e dialogar com os resultados obtidos nos capítulos anteriores e a literatura secundária.

Assim como Darrigol (2004), Martins (2005b) explicita quais foram os resultados antecipados por Poincaré e Lorentz:

- O princípio da relatividade
- A constância da velocidade da luz
- Contração de objetos em movimento
- Mudança do período dos relógios
- Relatividade da simultaneidade
- Transformações de Lorentz
- Transformações de campos e.m.
- Relação entre massa e velocidade

Martins (2005b, p. 509) ainda apresenta quatro contribuições que foram apenas obtidas por Poincaré em julho de 1905 e, por um erro editorial (AUFFRAY, 1998), publicadas apenas em 1906.

- A demonstração de que as transformações de Lorentz formam um grupo.
- O intervalo relativista ($ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$) e outros invariantes espaço-temporais.
- O estudo da dinâmica relativista de corpos extensos com tensões.
- A primeira investigação das consequências do princípio da relatividade sobre a gravitação.

Segundo Martins (2005b), possivelmente a única contribuição de Einstein não antecipada por Einstein tenha sido a famosa relação massa-energia. É verdade que Poincaré já havia estabelecido essa relação para fenômenos eletromagnéticos, associando uma inércia dada pela razão E/c^2 , mas nem Poincaré ou Lorentz associaram a inércia de um corpo ao seu conteúdo energético como fez Einstein em 1905, em seu segundo paper

da relatividade (MARTINS, 2005b). Contudo, como mostraremos, a dedução de Einstein não é satisfatória e em artigos posteriores ele recorreu ao mesmos argumentos empregados por Poincaré em 1900. As principais diferenças entre as teorias de Lorentz-Poincaré e Einstein são sintetizadas no quadro abaixo:

Lorentz-Poincaré	Einstein
Aceitavam o éter	Rejeitava o éter
Os postulados não eram claros nem explícitos	Os postulados eram claros e explícitos
Deduções complicadas, com muitas hipóteses	Deduções simples

Quadro 1. Diferenças entre as teorias de Lorentz-Poincaré e Einstein (MARTINS, 2005, p. 510)

Segundo Martins (2005b) essas diferenças são conhecidas como *vantagens epistemológicas* e justificariam a superioridade do programa de Einstein sobre o programa de Lorentz-Poincaré. Martins (2005b) enumera cinco supostas *vantagens epistemológicas* e discute cada uma delas. A seguir mostraremos quais são estas *vantagens*, os argumentos empregados pelo historiador e algumas considerações adicionais que reforçam os argumentos de Martins.

1. A teoria do Einstein é mais simples, já que se baseia em um pequeno número de postulados.

Sobre essa afirmação, Martins (2005b, p. 511) afirma que:

Na verdade, era mais simples. No entanto, apenas sua cinemática é baseada nos dois postulados, a eletrodinâmica e a dinâmica da teoria de Einstein não têm uma base clara e explícita. Por outro lado, a diferença foi semelhante àquela entre os resultados de uma investigação e sua apresentação didática e, portanto, o trabalho de Einstein foi considerado inicialmente como se fosse uma pedra angular da teoria de Lorentz.

Em 1907, o físico Cunningham mostrou que a única condição necessária para se derivar as transformações de Lorentz é exigir a forma a linearidade e a forma invariante da equação da onda. Caso a linearidade não seja exigida é possível obter outras transformadas como as obtidas por Voigt em 1887 (ERNST, HSU, 2001). Em sua tese de doutorado, V. Fock investigou a estrutura dos postulados e concluiu que os dois postulados são insuficientes para derivar todos os resultados cinemáticos da relatividade (FOCK, 1959). Mais precisamente, Fock mostrou que o postulado da constância da velocidade da luz não é um requisito fundamental da teoria e que ele derivaria ser substituído pela forma invariante da equação da onda, como mostrou Cunningham (1907), e pelo princípio da inércia (FOCK, 1959). Outro ponto problemático na nova

formulação de Einstein era a conciliação do segundo postulado, constância da velocidade da luz, com a rejeição do éter. Como aponta Martins (2015, p.250):

Pode-se dizer que o postulado da constância da velocidade da luz era o menos revolucionário dos pressupostos de Einstein, pois seria aceitável à maioria dos físicos que aceitavam o éter e a teoria ondulatória da luz, a partir de meados do século XIX. No entanto, quando se pensa que Einstein simultaneamente estava negando o éter, torna-se difícil compreender como ele poderia justificar esse postulado.

Em um artigo anterior, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (EINSTEIN, 1905), Einstein tinha defendido a natureza corpuscular da luz, nesse caso a hipótese mais lógica seria defender que a velocidade da luz dependesse do movimento da fonte. Contudo, em seu *paper* de 1905, Einstein trata a luz como uma onda eletromagnética. Não se trata de uma concepção dual da natureza da luz, como alguns poderiam objetar, essa concepção só apareceu anos depois com os estudos de De Broglie. Portanto há uma incoerência lógica entre sua concepção a respeito da natureza da luz. No trabalho de Einstein, a constância da velocidade da luz é assumida como uma verdade à priori sem qualquer justificativa. (MARTINS, 2015), em uma leitura fleckiana, trata-se de uma conexão passiva.

2. É mais científica, porque não tem as suposições *ad hoc* que existiam na teoria antiga

Sobre esta afirmação, Martins (2005b, p. 511) observa que:

As obras de Lorentz e Poincaré tinham uma estrutura mais complexa e tinham muitas hipóteses. No entanto, tais suposições não preservam a teoria de possíveis refutações e, consequentemente, não diminuem o status científico da teoria (de acordo com Popper). Quando surgiram resultados experimentais sobre a massa de elétrons que se parecia com a teoria de Lorentz, ele não mudou sua teoria e declarou que ela parecia incompatível com os fatos. A atitude de Einstein em relação aos mesmos fatos era dizer que o experimento estava errado.

É verdade que a primeira proposta de contração dos comprimentos de Lorentz era uma hipótese *ad hoc*, ou seja, uma conexão ativa, embora Lorentz tenha tentado justificá-la dizendo ser um efeito da ação do éter sobre moléculas do interferômetro de Michelson e Morley (LORENTZ, 1958). Poincaré criticou essa proposta dizendo que se fosse necessário criar uma nova hipótese para cada novo problema que surgisse, a teoria se tornaria inviável (POINCARÉ, 1901a). Lorentz aceitou as críticas de Poincaré, e em seu *memoir* de 1904, ele comenta sobre o caráter *ad hoc* de sua teoria anterior e as reclamações de Poincaré e anuncia que a nova teoria além de ser exata se apoiava em uma única restrição: que a velocidade do sistema fosse menor que a velocidade da luz no vácuo

(LORENTZ, 1904). Além disso, a teoria os núcleos falsificadores da teoria da relatividade de Einstein são idênticos aos núcleos da teoria de Lorentz-Poincaré, já que Poincaré mostrou em *Sur la dynamique de l'électron* que a única teoria compatível com princípio da relatividade é uma teoria que seja gerada pelo grupo de Lorentz. Portanto qualquer experimento que refute a teoria de Lorentz-Poincaré automaticamente refuta a teoria de Einstein (MARTINS, 2012, 2015).

3. É também mais simples porque elimina da física o éter e o espaço absoluto, entidades metafísicas que não têm utilidade na teoria

Sobre essa terceira vantagem epistemológica, Martins (2005b, p. 511) registra que:

É fato que Lorentz e Poincaré aceitaram o éter. No entanto, o éter não era equivalente ao espaço absoluto (eles tinham propriedades diferentes). Lorentz e Poincaré aceitaram que era impossível detectar o éter, mas consideraram que este conceito era útil porque permitia explicar os fenômenos (campos eletromagnéticos, luz, mudanças que ocorriam em sistemas móveis, etc.). É um fato que Einstein rejeitou o éter em sua obra de 1905. No entanto, em 1920, Einstein aceitou a importância do éter na física.

Historicamente Einstein não foi o primeiro a ter uma posição cética a respeito do éter, Bucherer e Cohen já consideravam o éter um conceito inútil (DARRIGOL, 1995). Poincaré também já havia se tornado bastante cético em relação ao éter, considerando-o mais como um conceito útil e metafísico, do que como uma substância com realidade física (POINCARÉ, 1902a). Alguns autores, como Miller (1983) e Goldberg (1967) afirmam que Poincaré acreditava em um referencial privilegiado associado ao éter, mas isso não é verdade (AUFRAY, 1998, LOGUNOV, 2004). Quando Poincaré construiu o grupo de Lorentz, uma consequência imediata da teoria dos grupos, é que qualquer permutação preserva a estrutura do grupo. Portanto, para que o princípio da relatividade seja verdadeiro, todos referenciais inerciais são equivalentes, não podendo existir um referencial privilegiado em repouso absoluto no éter (AUFRAY, 1998, LOGUNOV, 2004). Sobre a mencionada conferência de 1920 de Albert Einstein, intitulada Éter e Relatividade, ele faz a seguinte declaração:

Recapitulando, podemos supor que, de acordo com a teoria da relatividade geral, o espaço tem propriedades físicas; nesse sentido, portanto, existe um éter segundo a teoria da relatividade geral, o espaço sem éter é impensável porque em tal espaço não haveria propagação de luz, nem a possibilidade de padrões de espaço e tempo (regras de medição e relógios) ou intervalos de-espaço-tempo no sentido físico. (EINSTEIN, 1920)

Além disso, a relatividade geral, em certo sentido, traz à tona uma conexão ativa⁵⁰: parece resgatar o conceito de tempo absoluto ou de tempo real de Lorentz ao introduzir o chamado tempo próprio (NOVELLO, 2006)

4. É mais satisfatória do ponto de vista empírico, uma vez que explica fenômenos que não podem ser explicados pela teoria do éter

Essa suposta vantagem epistemológica é na verdade uma falácia, pois como objeta Martins (2005, p. 511): “Isso é simplesmente falso: as duas abordagens têm previsões idênticas para todos os fenômenos observáveis, no entanto, muitos cientistas acreditam que o experimento de Michelson e Morley refutou a teoria do éter.”

A questão do éter e sua importância para teoria da relatividade é um assunto que infelizmente ainda é mal compreendido por divulgadores científicos e livros de física (MARTINS, 1998b, 2015). Como afirmou Martins (2005b) há autores que ainda afirmam que a experiência de Michelson-Morley de 1887 foi um experimento *crucis* para validar a hipótese do éter. O verdadeiro objetivo da experiência era em medir a velocidade da terra em relação ao éter, o resultado negativo da experiência não era uma prova da não existência do éter e poderia ser interpretado de inúmeras formas (MARTINS, 1998b, 2015). Bucherer desenvolveu uma eletrodinâmica sem fazer menção ao éter, mas que como provou Poincaré não era capaz de explicar o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley (DARRIGOL, 1995). Por outro lado, Lorentz e Poincaré criaram uma teoria da relatividade compatível com o éter e que podia explicar os resultados da experiência de Michelson-Morley e tem os mesmos núcleos falsificadores e implicações lógicas da teoria de Einstein (MARTINS, 1998b, 2015).

5. O programa de pesquisa de Einstein teve uma heurística mais forte que a de Lorentz e Poincaré, e produziu a teoria da relatividade geral.

Sobre esse argumento, Martins (2005b, p. 512) objeta que

A teoria da relatividade geral não é uma consequência natural "do desenvolvimento da teoria da relatividade que chamamos de" especial ", uma vez que existem muitas possibilidades de produzir uma teoria da gravitação a partir da relatividade especial, o próprio Einstein que escreveu sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento (em 1905), chegou em 1915 (depois de muitos erros) chegou a uma teoria da gravitação que tem como limite a relatividade especial. Mesmo que a relatividade geral fosse embrionariamente contida na relatividade

⁵⁰ É importante ressaltar que essa conexão ativa, o tempo absoluto, era uma conexão passiva na mecânica racional, que foi substituída por outra conexão passiva na relatividade especial: todo tempo é relativo.

especial, seria anacrônico atribuir a tal potencialidade a vantagem da teoria da relatividade especial sobre a teoria de Lorentz e Poincaré.

Além disso, o próprio Einstein admitiu em sua conferência de 1920, que o programa da Teoria da Relatividade Geral estava mais próximo da interpretação de Lorentz-Poincaré que admitiam a existência do éter do que a interpretação de Einstein que rejeita por completo o éter.

O éter da teoria geral da relatividade é transmutado conceitualmente no éter de Lorentz se substituirmos as constantes pelas funções do espaço que as descrevem, desconsiderando as causas que condicionam seu estado. Assim, podemos também dizer, penso eu, que o éter da teoria da relatividade geral é o resultado do éter de Lorentz, através da relativização. (EINSTEIN, 1920, s.p.).

Portanto, provávamos que os cinco argumentos em favor da interpretação de Einstein são ineficazes. Então, Martins (2005), pergunta se há algo que torna Teoria da Relatividade de Einstein superior à de Lorentz-Poincaré? Os defensores da superioridade de Einstein costumam há usar três argumentos, que analisaremos de forma semelhante ao que fizemos com as cinco vantagens epistemológicas.

A - Eles consideram que existem duas teorias diferentes (ou paradigmas, ou programas de pesquisa), o de Einstein e o de Lorentz e Poincaré.

A respeito dessa hipótese, basta recordarmos que os potenciais falsificadores da teoria da relatividade de Lorentz-Poincaré e a teoria de Einstein são idênticos. Em termos de programa de pesquisa, no sentido empregado por Lakatos (1979) ou Kuhn (2017), as teorias tem o mesmo núcleo duro. Por isso concordamos com Martins (2005b, p. 512): “É difícil aceitar (1), já que as *previsões experimentais* da relatividade especial de Einstein são as mesmas de Lorentz e Poincaré. Seria preferível dizer que Einstein propôs uma interpretação *diferente* da teoria antiga, mas não uma *teoria* diferente.”

B - A análise pressupõe que, tomada como fato, a teoria da relatividade de Einstein superou efetivamente a teoria de Lorentz e Poincaré.

Essa afirmação é completamente anacrônica, pois segundo Martins (2005b, p. 512):

É um fato histórico que não houve aceitação geral da teoria de Einstein e uma rejeição da teoria do éter por dez anos depois de 1905. Se a teoria de Einstein foi melhor, ela não apareceu no consenso dos cientistas ao longo dos anos, somente mais tarde. Do ponto de vista histórico, somente após o ano de 1919 houve uma aceitação geral da importância do trabalho de Einstein e uma diminuição no valor atribuído às obras de Lorentz e Poincaré. Não houve até 1919 um consenso entre os cientistas de que a teoria da relatividade especial de Einstein era superior à teoria de Lorentz e a Poincaré e, portanto; é difícil aceitar (2).

A conclusão de Martins é corroborada pela compreensão de Fleck sobre a gênese de um fato científico: “assim nasce o fato: primeiro um sinal de resistência no pensamento inicial caótico, depois de certa coerção de pensamento e, finalmente, uma forma (Gestalt) a ser percebida de maneira imediata”. Um estudo feito pelo historiador Scott Walter mostra que até 1909, havia poucas publicações sobre teoria da relatividade, foi a partir de 1910 que o número de publicações aumentou.

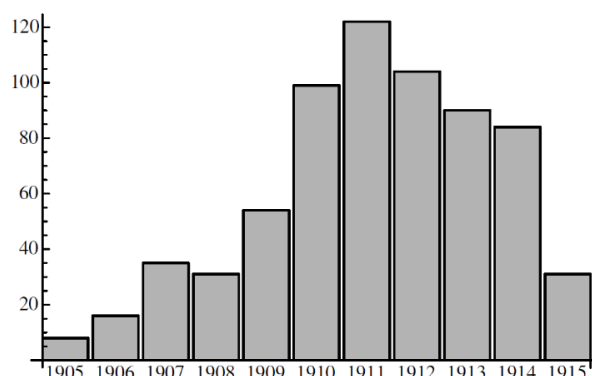


Figura 1. Publicação global de artigos sobre relatividade em periódicos, 1905 - 1916.

N = 662 (WALTER, 2011, p. 531)

Um estudo sobre as publicações por região revela que o país que apresentou o maior interesse em tópicos a respeito da relatividade foi a Alemanha.

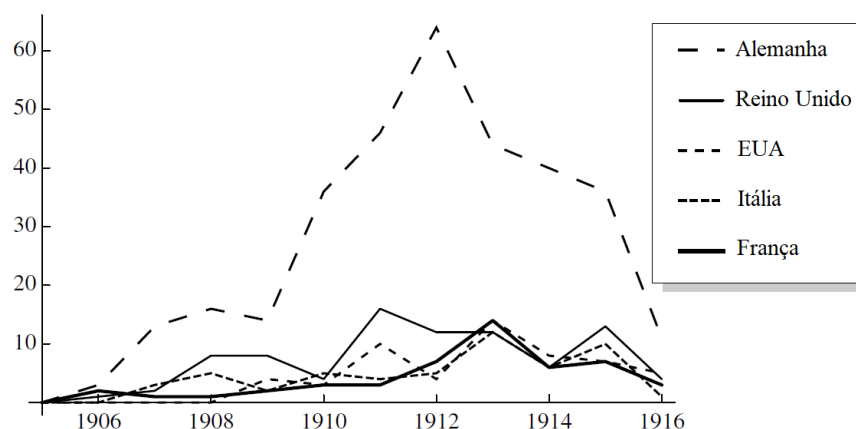


Figura 2. Publicação de artigos sobre relatividade em periódicos, 1905-1916: Alemanha, Reino Unido, EUA, Itália, França. N = 566. (WALTER, 2011, p. 532)

Novamente, vemos traço da resistência a um novo fato, que concorda com Fleck quando ele afirma que:

O fato, assim definido como “sinal de resistência para o coletivo de pensamento”, contém toda a escala dos possíveis modos de constatação: do grito de dor de uma criança, que esbarra em algum objeto duro, passando pelas alucinações de um paciente, até o sistema emaranhado das ciências (FLECK, 2010, p. 153)

Mesmo na Alemanha, o país de origem de Albert Einstein onde houve o maior número de trabalhos sobre relatividade, atingindo o ápice em 1912, em geral, a teoria era creditada a Lorentz atribuindo a Einstein o papel de ter dado complementações ou apresentado de forma mais didática (MARTINS, 2015), portanto a aceitação da relatividade ocorreu devido a ocorrência de outros fatores, como afirma Fleck (2010, p. 153):

Nunca um fato é completamente independente de outros: ou se manifestam como um conjunto mais ou menos coeso do sinal particular, ou como sistema do conhecimento que obedece a leis próprias. Por isso, cada fato repercute retroativamente em outros, e cada mudança, cada descoberta exercem um efeito em um campo que, na verdade, não tem limites: um saber desenvolvido, elaborado na forma de um sistema harmonioso, possui a característica de cada fato novo alterar todos os anteriores, por menor que seja essa alteração. Nesse caso cada descoberta é, na verdade, a recriação do mundo inteiro de um coletivo de pensamento.

Um exame sobre a história da relatividade revela que a sua aceitação em muito foi aprazada pela situação política na Europa (DARRIGOL, 1995, 1996, WALTER, 2011, MARTINS, 2015), e impulsionada a partir de 1919 pelo campanha propagandística de Arthur Eddington (SPONSEL, 2002, MARTINS, 2015).

C – As explicações admitem que é possível compreender a suposta superação sob uma perspectiva epistemológica particular, através da análise de características epistêmicas que só estavam presentes na teoria da relatividade.

Sobre essa afirmação Martins (2005b, p. 512-513) salienta que

As diferenças que se percebiam nos primeiros dez anos após 1905 foram a clareza e simplicidade da abordagem Einstein; e a rejeição do éter por razões epistemológicas. Sob o ponto de vista lógico, é possível reformular e apresentar a teoria de Lorentz e Poincaré com a mesma clareza e simplicidade que Einstein empregou - portanto, não é uma diferença essencial entre suas concepções. O único conflito claro entre as duas abordagens, nos primeiros dez anos após 1905, era de natureza epistemológica (empirista): a rejeição (por Einstein) de entidades que não eram diretamente observáveis, como o éter. Se, nos primeiros dez anos após 1905, a relatividade especial de Einstein tivesse superado a teoria de Lorentz e Poincaré, a única explicação possível seria: por sua postura empirista.

A posição epistemológica de Einstein só se torna verdadeira se duas premissas forem verdadeiras (MARTINS, 2005b):

(P1) A interpretação empírica da teoria da relatividade foi uma vantagem epistêmica.

(P2) A abordagem de Lorentz e Poincaré não teve outras vantagens sobre a de Einstein.

E como uma consequência da primeira premissa, podemos estabelecer uma terceira premissa (MARTINS, 2005b):

(P3) O trabalho de Einstein (1905) satisfaz completamente os critérios empiristas;

Sobre A premissa P1, Martins (2005b, p. 512) discorre que

Essa atitude proíbe o uso de entidades que não são observáveis na ciência e exige que todos os conceitos da ciência possam ser analisados ou associados a fatos observáveis. Tal imperativo foi a base para a rejeição do éter por Einstein. Mesmo nesse caso, qual é o valor da interpretação empírica da ciência e a rejeição de entidades inobserváveis? "Se tal atitude tem valor, ela deve ser usada para avaliar todas as teorias que são verdadeiras, em todos os casos. A teoria da relatividade geral não obedece as restrições empiristas, portanto, se o critério empirista é válido, o A teoria da relatividade geral é inválida: a mecânica quântica tentou obedecer às restrições empiristas, mas nesse momento Einstein não aceitou tais restrições e, portanto, criticou a interpretação de Copenhagen.

De fato, dizer que a natureza do conhecimento científico é puramente empirista foi rejeitado pelos filósofos da ciência e consiste em uma visão deformada do trabalho científico (GIL-PEREZ *et al*, 2001) e em um mito a ser superado na educação científica (MCCOMAS, 1998). Um exemplo que mostra que a visão empírica não é uma vantagem epistêmica é dado por M. Polanyi (1962). Polanyi argumenta que se a experiência de Michelson-Morley tivesse sido realizada na época de Galileu, o resultado nulo seria um argumento empírico bastante em forte em defesa da não mobilidade da Terra. Em outras palavras, as “vantagens empíricas” podem também se tornar “obstáculos epistemológicos” que dificultam o progresso científico.

As premissas P2 e P3 também devem ser rejeitadas, pois segundo Martins (2005b, p. 514),

O trabalho de Einstein (1905) tinha uma descrição detalhada dos procedimentos para medir o tempo e o espaço; mas ele não os descreveu procedimentos de medição dinâmica: ele não especificou como eles foram medidas as magnitudes do campo elétrico e magnético, da força e da massa para corpos em movimento. Portanto, o trabalho de Einstein de 1905 não seguiu rigorosamente os critérios empiristas. Por outro lado, a abordagem de Lorentz e Poincaré tiveram vantagens que foram perdidas na abordagem de Einstein, porque o éter teve um uso como uma explicação causal, sem equivalente na abordagem de Einstein. Para Lorentz e Poincaré, os corpos em movimento mudam de tamanho porque se movem no éter e isso altera as forças entre suas partículas. Quando se rejeita o éter, os campos eletromagnéticos e as ondas eletromagnéticas perdem seu suporte e é igualmente impossível compreender a causa dos efeitos relacionais (como a contração dos

corpos). Para Einstein, a mudança de tamanho é inferida a partir da análise do procedimento de mensuração, mas não tem uma causa

A interpretação de Einstein é a mesma adotada pela escola de Copenhague sobre a mecânica quântica: só importam as medidas, não se deve buscar explicar as causas (HEBERT, 1985). Curiosamente, Einstein se opôs a essa atitude adotando uma postura neorealista (HEBERT, 1985).

Essa breve análise mostra que as abordagens de Lorentz-Poincaré e de Einstein são diferentes interpretações da mesma teoria e, portanto, não é possível dizer qual a abordagem superior. Por outro lado, podemos analisar como cada um dos autores desenvolveu seus argumentos e verificar o desempenho de cada um. Na próxima seção analisaremos como Lorentz, Poincaré e Einstein abordaram cada um dos resultados essenciais da teoria da relatividade especial.

7.3. O Princípio da Relatividade

O princípio da relatividade foi uma consequência explorada apenas por Poincaré e Einstein. Poincaré em seu *paper* de 1906 utiliza a seguinte expressão “o princípio da relatividade de Lorentz” induzindo o leitor a pensar que Lorentz tenha participado da formulação desse conceito. Analisando os principais trabalhos de Lorentz entre 1895 e 1905, não há qualquer menção ao princípio da relatividade. Em um artigo de 1914, porém publicado apenas seis anos depois, intitulado “Dois Papers de Henri Poincaré”, Lorentz (1920) esclarece que não estava convencido da validade do princípio da relatividade e por isso não explorou todo seu potencial. Segundo Lorentz (1920) foi Poincaré que extraiu as principais consequências desse princípio.

O principal argumento dos defensores da superioridade da teoria de Einstein sobre Lorentz e Poincaré se baseia na interpretação de que os programas eram epistemologicamente diferentes e o programa de Einstein levava a conclusões corretas.

Nós desenvolvemos a tese de que Poincaré não previu a TR [Teoria da Relatividade] de Einstein, e que, de fato, Poincaré e Lorentz tinham um programa de caráter completamente diferente em mente. Isto não deve ser interpretado como uma tentativa de menosprezar as contribuições de Poincaré. O fato de que a teoria desenvolvida por ele e Lorentz não triunfou não pode manchar sua reputação merecidamente merecida como um grande matemático e físico matemático. (GOLDBERG, 1967, p. 935).

Para Goldberg, existia uma diferença na compreensão de Poincaré e Einstein sobre o significado do princípio da relatividade:

A abordagem de Poincaré ao princípio da relatividade deve ser contrastada com a de Einstein, que elevou esse princípio a um postulado a priori que estava à frente de sua teoria. Como Holton apontou, essa diferença no tratamento do princípio da relatividade de Poincaré e Einstein é crucial. É um dos elementos que faz a diferença entre desenvolver o TR como o conhecemos e não desenvolvê-lo. Uma vez que, para Poincaré, o princípio da relatividade em si era um “fato”, sujeito à prova experimental, poderia, a qualquer momento, ser mostrado por outra experimentação como incorreta. Seria preciso apenas uma instância contrária bem documentada para forçar Poincaré a questionar o princípio da relatividade. De fato, quando Kaufmann sugeriu em 1906 que sua determinação experimental da carga específica do elétron em altas velocidades favorecia as previsões da teoria de Abraham, ao invés da teoria de Lorentz (ou Einstein), Poincaré imediatamente suspeitou do valor do princípio da relatividade. (GOLDBERG, 1967, p. 937)

Contudo, investigações posteriores mostraram que a hipótese de Goldberg não pode ser sustentada. Um trabalho desenvolvido por Keswani e Kilmister, publicado em 1983, analisou o conceito de relatividade, incluindo seu surgimento na língua inglesa.

Embora, de acordo com o OED (Oxford English Dictionary), a palavra relatividade tenha sido usada pela primeira vez em 1834 pelo poeta Samuel Coleridge, isso foi em um sentido filosófico, não físico. Coleridge estava interessado em ciência como fonte de imaginação, e isso parece tê-lo levado à Naturphilosophie alemã [Levere 1981]. Observações semelhantes aplicam-se a uma referência ao princípio da relatividade nos escritos do filósofo escocês Sir William Hamilton (falecido em 1856). Aparentemente foi James Clerk-Maxwell quem usou as palavras “a doutrina da relatividade de todos os fenômenos físicos” no sentido em que entendemos esta doutrina no presente, pela primeira vez em sua [1877]. (KESWANI, KILMISTER, 1983, p. 343-344)

Ainda, de acordo com Keswani e Kilmister (1983), Poincaré foi o primeiro pesquisador a empregar o termo o Princípio da Relatividade, provavelmente inspirado pela leitura de Maxwell. Outra possibilidade é que Poincaré tenha derivado seu princípio da relatividade como uma consequência de seu convencionalismo matemático. No século XIX, houveram muitas discussões sobre a natureza geométrica do Universo. O desenvolvimento de geometrias não euclidianas por Lobachvesky, Bolyai e Gauss, a rejeição do quinto postulado de Euclides e as generalizações de Riemann e Clifford levaram aos pesquisadores a se perguntarem qual era a geometria mais adequada: a euclidiana ou alguma geometria não euclidiana (MARTINS, 1995, SILVA, 2006). Poincaré lidou com essa questão e concluiu que não existe uma geometria mais adequada, todas são equivalentes, a escolha de geometria não é uma questão empírica, mas de comodidade (POINCARÉ, 1900b). É possível que esse argumento de equivalência tenha levado Poincaré a concluir que o mesmo se aplica a sistemas de referência (JAMMER,

2010). Um indício forte é que a *lei da relatividade* de Poincaré apareceu inicialmente em um trabalho sobre geometria e os grupos de deslocamento.

Sabemos que Einstein estudou os trabalhos de Maxwell. Se assumirmos que origem do primeiro postulado está conectada a “doutrinação da relatividade” de Maxwell, então a hipótese de Goldberg deve ser rejeitada, já que a relatividade de Poincaré como Einstein tem uma origem e sentido comum. Contudo um fato mais significativo foi a descoberta que Einstein e seus colegas da academia Olympia leram e discutiram o livro “A Ciência e a Hipótese” de Henri Poincaré, entre 1902 e 1903 (SOLOVINE, 2011, MARTINS, 2015). Nesse livro Poincaré enuncia explicitamente o princípio da relatividade sobre o nome de *lei da relatividade*. Em 1904, Poincaré apresentou uma palestra em Saint Louis sobre a crise da física teórica e nessa ocasião apresentou de forma clara o Princípio da Relatividade. Goldberg defende explicitamente que:

O status diferente que Poincaré e Einstein deram ao princípio da relatividade teve outras consequências de longo alcance. O princípio da relatividade, ou algum postulado equivalente, é um requisito necessário para a construção do TR de Einstein. De fato, a concepção original de Einstein pode ser vista como uma tentativa de desenvolver uma teoria de medição - um prefácio para todas as outras teorias. Dado o postulado do princípio da relatividade e o postulado da constância da velocidade da luz no espaço livre, ele seguiu (1) que a simultaneidade não era absoluta, e (2) que, desde observadores em diferentes quadros de referência discordariam da simultaneidade de dois eventos, eles também não concordariam com coisas como as medições de comprimentos ou a medição de intervalos de tempo. (GOLDBERG, 1967, p. 938)

Para Goldberg, Poincaré teria uma visão mais empirista sobre o princípio da relatividade enquanto Einstein teria dado uma interpretação operacional. Goldberg inclusive acredita que o fato da definição de Poincaré incluir observadores enquanto a de Einstein não, provaria esse ponto de vista. É difícil considerar que essas diferenças sutis sejam significativas, principalmente quando levamos em conta que Poincaré e Einstein foram influenciados pela relatividade de Maxwell e Einstein estudou a *lei da relatividade* de Poincaré. Além disso, em duas ocasiões diferentes Maurice Solovine confidenciou à Carl Seelig afirma que Einstein leu o livro *O Valor da Ciência* de Henri Poincaré onde sua conferência de 1904 foi reproduzida em integralmente (GIANETTO, 1999). Segundo o biógrafo de Albert Einstein, Albrecht Fölsing, em 1905, Michele Besso apresentou uma cópia da conferência de Poincaré de 1904 ou a versão publicada em *O Valor da Ciência* (FÖLSING, 1993). Considerando esse fato e o enunciado de Poincaré sobre o Princípio da Relatividade, é mais fácil inferir que Einstein apenas reescreveu o seu postulado. Essa

atitude não seria um comportamento atípico de Einstein, inclusive em 1912, ele se envolveu em um conflito de propriedade intelectual com o físico alemão Johannes Stark.

O relacionamento entre Stark e Einstein parece ter se deteriorado depois, porque Einstein publicou em 1912 um artigo deduzindo as leis das reações fotoquímicas a partir da hipótese dos quanta de luz, sem citar um trabalho anterior de Stark (de 1908) que tinha obtido os mesmos resultados. Stark protestou, e Einstein respondeu de forma agressiva. (ROSA, 2004, p. 41)

Dadas as evidências históricas e a própria atitude de Einstein, podemos concluir que o princípio da relatividade de Poincaré é o mesmo adotado por Einstein invalidando a tese de Goldberg. Quanto a abordagem, tanto Poincaré quanto Einstein negavam a concepção de espaço, tempo e simultaneidade absoluta e defendiam a inexistência de um referencial privilegiado. Para Poincaré, o éter deveria ser tratado como um conceito metafísico e imponderável, só seria possível medir o movimento relativos entre corpos materiais (*cf.* POINCARÉ, 1895, MARTINS, 2015). Já Einstein rejeita conceito do éter pela sua imponderabilidade e assume a equivalência de todos os referenciais inerciais (EINSTEIN, 1905a, MARTINS, 2015).

7.4. A Constância da Velocidade da Luz

A constância da velocidade da luz é um dos pontos mais sensíveis na abordagem. Como veremos, Einstein não tinha como justificar esse postulado a partir da rejeição do éter e o próprio Einstein viola esse postulado em sua dedução dos efeitos cinemáticos relativísticos. Segundo Martins (2015, p. 249):

Pode-se dizer que o postulado da constância da velocidade da luz era uma suposição natural e indiscutível para todos os que aceitavam a teoria ondulatória da luz no início do século XX. E pode-se afirmar que essa ideia estava vinculada à crença na existência de um éter como substrato para a propagação da luz e de outras ondas eletromagnéticas. De fato, em qualquer teoria que aceite a existência do éter, é natural que a velocidade da luz não dependa do movimento da fonte, pois trata-se da mesma situação que ocorre na acústica. Se a luz é uma onda no éter, o valor de c deve ser uma propriedade do éter, não dependendo da velocidade da fonte luminosa.

Portanto, a abordagem de Lorentz e Poincaré entendia a constância da velocidade da luz como uma consequência natural da teoria do éter. Em 1887, o físico alemão W. Voigt publicou um trabalho intitulado *Ueber das Doppler'sche Princip* (VOIGT, 1887) investigou o Efeito Doppler da luz como consequência da constância da velocidade da luz e a forma invariante da equação de onda da luz, em uma analogia com acústica. Nesse

trabalho, além do Efeito Doppler para luz, Voigt obteve outros importantes resultados, a saber (VOIGT, 1887, ERNST, HSU, 2001):

- a) o conceito de universalidade da velocidade da luz;
- b) a invariância da equação da onda para um meio elástico incompressível (éter) e que ele usa para derivar o efeito Doppler da luz;
- c) que a mudança de frequência Doppler é incompatível com o conceito de tempo absoluto newtoniano, exigindo a existência de um tempo relativo (ou local);
- d) obteve um conjunto de transformações de coordenadas que podem ser consideradas ancestrais históricas das transformações de Lorentz.

Voigt publicou esses resultados em seu livro de física elementar. Sabemos que Einstein estudou esse livro devido à uma carta Mileva de 1901 onde ele relata que no “tempo livre que me sobra, consagro-o ao estudo da física teórica de Voigt. Já aprendi muitas coisas lendo o seu livro” (EINSTEIN, 1993, p. 117). Desta forma, a teoria do éter não era apenas compatível com a constância da velocidade da luz, como tinha um importante trabalho a esse respeito. É provável que Voigt tenha influenciado Einstein na escolha do seu segundo postulado (AUFRAY, 1998). Einstein sabia que várias consequências importantes eram deduzidas da constância da velocidade da luz e invariância da forma da equação da onda. O problema era como justificar essas duas propriedades?

Sobre a invariância da forma da onda, Einstein a adotou, equivocadamente, como uma consequência das transformadas de Lorentz, só que em sua eletrodinâmica Einstein assume que a luz medida no referencial em movimento se transforma como um elipsoide, contradizendo sua afirmação inicial. Quanto ao postulado da constância da luz, ele simplesmente não apresentou qualquer justificativa.

Pode-se dizer que o postulado da constância da velocidade da luz era o menos revolucionário dos pressupostos de Einstein, pois seria aceitável à maioria dos físicos que aceitavam o éter e a teoria ondulatória da luz, a partir de meados do século XIX. No entanto, quando se pensa que Einstein simultaneamente estava negando o éter, torna-se difícil compreender como ele poderia justificar esse postulado (MARTINS, 2015, p.250)

Como Einstein rejeitava o éter, a única forma de validar esse postulado seria assumir como uma verdade empírica, contudo estas evidências ainda não existiam.

Em 1900 não existiam experimentos terrestres sobre a constância de c , estudando fontes luminosas de alta velocidade. Foi apenas em 1919 que o físico italiano Quirino Majorana (1871-1957) publicou as primeiras evidências de laboratório desse tipo. (MARTINS, 2015, p. 250).

Portanto, em 1905, Einstein não poderia justificar seu segundo postulado e extrair as consequências obtidas por Voigt em seu estudo do efeito Doppler. Portanto, a respeito da constância da velocidade da luz, podemos dizer que até 1919, a abordagem de Lorentz e Poincaré era mais consistente e mais conveniente que a abordagem de Einstein.

O outro problema relacionado à constância da velocidade da luz é como Einstein deduz a contração do comprimento e a dilatação do período dos relógios. Einstein (1905) define dois referenciais, um que assumimos estar em repouso e outro que se movimenta em linha com velocidade constante em relação ao primeiro. Cada referencial é munido de uma haste com extremidades A e B e relógios, para efetuar medidas cinemáticas. Einstein analisa o movimento de um raio de luz que é emitido no corpo móvel na direção vertical e é refletido, retornando a fonte emissora. Adiante ele escreve:

Além disso, imaginamos que nas duas extremidades A e B da haste se colocam relógios que sincronizam com os relógios do sistema estacionário, isto é, que as suas indicações correspondem em qualquer instante ao “tempo do sistema estacionário” no lugares onde eles estão. Esses relógios são, portanto, “síncronos no sistema estacionário”. Além disso, imaginamos que a cada relógio há um observador em movimento e que esses observadores aplicam a ambos os relógios o critério estabelecido no § 1 para a sincronização de dois relógios. Deixe um raio de luz partir de A no momento t_A deixe que ele seja refletido em B no tempo t_B , e alcance A novamente no tempo t'_A . Levando em consideração o princípio da constância da velocidade da luz, descobrimos que: $t_B - t_A = r_{AB}/(c - v)$ e $t'_A - t'_B = r_{AB}/(c + v)$ onde r_{AB} indica o comprimento da haste móvel - medida no sistema estacionário. Observadores movendo-se com a haste móvel, portanto, achariam que os dois relógios não eram síncronos, enquanto os observadores no sistema estacionário declarariam os relógios como síncronos. (EINSTEIN, 1905)

Veja que Einstein enfatiza a constância da velocidade da luz em sua dedução, mas como observa Keswani (1965, p. 27):

Parece-nos, no entanto, que a derivação original de Einstein não é satisfatória. Einstein usa velocidades de propagação de luz iguais a $(c - v)$, $(c + v)$ e $\sqrt{c^2 - v^2}$ em total desrespeito ao seu próprio segundo postulado. Devemos notar que estas velocidades de propagação de luz, na derivação de Einstein, são medidas fisicamente (isto é, observáveis) e não certas quantidades de um cálculo algébrico.

A dedução de Einstein leva aos resultados corretos, pois ela é equivalente a dedução que seria feita supondo a existência de um éter, mas por essa razão ela é inconsistente com a abordagem adotada por Einstein. Para entendermos melhor a questão é necessário investigar a velocidade da luz em diferentes referencias nas abordagens com éter e sem éter.

Em uma teoria de éter como a de Lorentz e Poincaré, a velocidade da luz só é isotrópica (isto é, tem igual velocidade em todas as direções e sentidos) em relação ao éter. Em relação a outros referenciais, que se movam em relação ao éter, sua velocidade “real” é diferente – exatamente como no caso do som no ar. (MARTINS, 2015, p. 251).

A primeira vista poderíamos concluir que é possível inferir variações na velocidade da luz em uma teoria de éter. Esta era a expectativa da experiência Michelson-Morley, porém Poincaré (1900b) mostrou que o processo de sincronização de relógios usando sinais luminosos acabaria por impedir de se obter essa medida real.

Poincaré mostrou que o método mais conveniente de se sincronizar relógios distantes é exatamente utilizando sinais luminosos (ou outros equivalentes como sinais eletromagnéticos). Quando se usa a luz para sincronizar os relógios, qualquer medida da velocidade da luz fica “contaminada” e não poderá indicar a velocidade “real” da luz. Por isso, quando a velocidade da luz medida em relação a um referencial e em movimento em relação ao éter, utilizando relógios sincronizados pela luz, as medidas indicar que a velocidade da luz é sempre a mesma em todas as direções e sentidos. Mas isso não é uma medida “real”, é apenas o resultado de uma convenção adotada para o processo de sincronização dos relógios. (MARTINS, 2015, p. 251).

Veja que a descrição acima feita por Martins, é justamente o método proposto por Einstein. As velocidades $(c - v)$, $(c + v)$ e $\sqrt{(c^2 - v^2)}$ representam as medidas “reais”, mas que não podem ser medidas devido ao processo de sincronização de relógios. Porém, ao final dos cálculos, o resultado “fictício” deve ser consistente com o que deve ser observado e medido por instrumentos reais. Essa é razão pela qual mesmo Einstein violando seu segundo postulado, ele ainda consegue deduzir os valores corretos para a transformação do comprimento e do período. Em teoria de éter, essa dedução estaria correta, mas como Einstein propôs uma abordagem onde o éter é rejeitado, então a sua análise e obtenção dos resultados é inconsistente, pois

Na abordagem de Einstein, a situação é muito diferente. Como não existe o éter, todos os referenciais são idênticos. Se existir um referencial inercial no qual a velocidade da luz se propaga com a mesma velocidade em todos os direções e sentidos, a mesma coisa deve acontecer em todos os outros. Ora, se tivermos um referencial no qual uma fonte luminosa está *parada*, a velocidade da luz deve ser a mesma em todas as direções, *por simetria* – não existe nada que diferencie uma da outra. Além disso, pelo segundo postulado (a velocidade da luz não depende da velocidade da fonte), se houver uma fonte luminosa *em movimento* nesse mesmo referencial a velocidade da luz continuará a mesma e também será isotrópica. Portanto, nesse referencial, qualquer que seja o estado de movimento da fonte luminosa, a velocidade da luz é sempre a mesma e igual a c , em todas as direções. Pelo princípio da relatividade, o mesmo deve ocorrer em todos os referenciais (MARTINS, 2015, p. 251-252).

É possível obter as transformações dos períodos e dos comprimentos sem se referir ao éter. Uma forma consiste em impor a invariância da equação de onda e que as soluções devem ser lineares. Destas condições se deduz as transformações de Lorentz e a partir delas, obtém-se as transformações do comprimento e dos períodos. Essa foi a abordagem adotada por Cuningham (1907). Uma abordagem mais complexa consiste assumir que esferas de luz se transformam em elipsoides para o sistema móvel. A análise cinemática permite obter transformações para réguas e relógios. Essa foi abordagem estudada por Poincaré entre 1906 e 1909 (WALTER, 2014). Porém a forma mais simples é usando um sistema de espelhos e relógios propostos por Feynman.

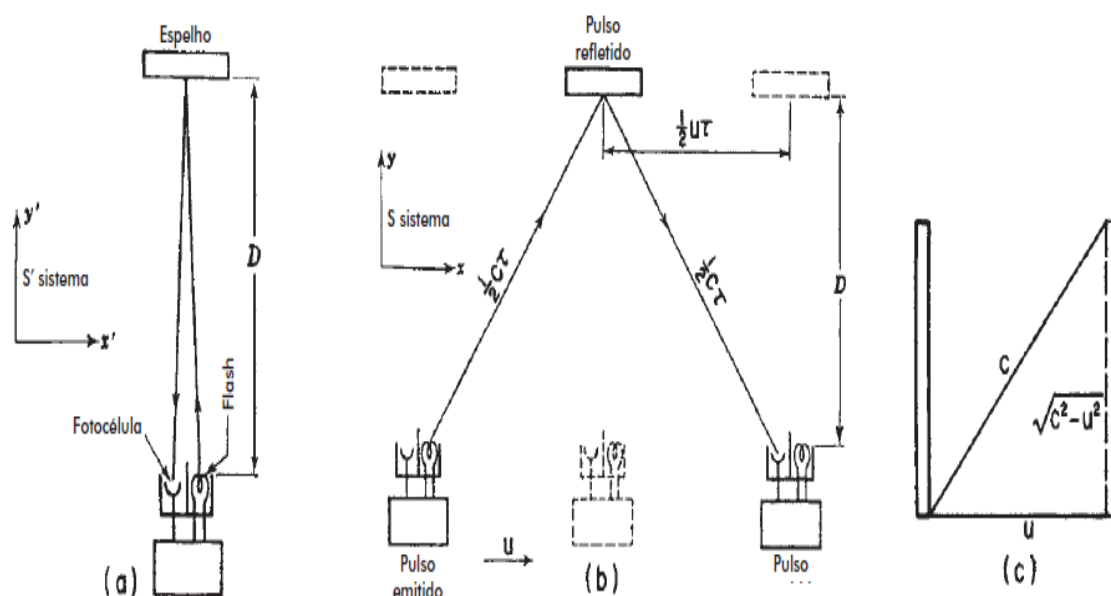


Figura 3. (a) Um “relógio de luz” em repouso no sistema S: (b) O mesmo relógio movendo-se pelo sistema S. (c) Ilustração da trajetória em diagonal percorrida pelo feixe de luz em um “relógio de luz” em movimento (FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS, 2008, p. 15-6).

Por esse mecanismo é possível realizar as deduções propostas por Einstein sem violar a constância da velocidade da luz e supor um sistema de medidas “real” no éter. Seja qual método se adote, é preciso frisar que, em 1905, Einstein não respeitou os critérios de sua própria abordagem em suas deduções. Ele escolheu um caminho mais simples, porém que tinha como exigência a aceitação de um éter. Portanto, Einstein comete uma segunda inconsistência no desenvolvimento de sua abordagem da teoria da relatividade como mostrou Keswani (1965) e Mehra (2001) essas somas de velocidade não são meras operações algébricas, mas fazem parte da medida. Isso mostra que o grau de maturidade de Einstein ainda estava em desenvolvimento. É por essa razão que Poincaré usou teoria de grupos.

7.5. Contração de Objetos em Movimento

Um dos primeiros resultados obtidos na abordagem de Lorentz-Poincaré foi a contração longitudinal dos objetos em movimento. Em 1890, Lorentz propôs que se os braços do interferômetro se contraíssem na proporção de $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ então seria possível explicar completamente o resultado do experimento de Michelson e Morley (LORENTZ, 1958). Poincaré (1900a) criticou essa abordagem, pois se trata de uma hipótese *ad hoc*. Em 1904, Lorentz apresentou uma nova abordagem onde a única restrição fosse que o sistema se movimentasse à uma velocidade inferior a velocidade da luz no vácuo. Usando a força eletromagnética (força de Lorentz) e a hipótese que a interação do sistema com o éter modifica as dimensões das moléculas, Lorentz (1904) conseguiu obter, entre outros resultados, o fator de contração dos corpos em movimento. Em sua conferência de 1904, em St. Louis, Poincaré discutiu as consequências do *memoir* de Lorentz e, sobre a contração dos objetos em movimento, fez o seguinte comentário:

É preciso admitir que os corpos em movimento sofrem uma contração uniforme no sentido do movimento. Um dos diâmetros da Terra, por exemplo, é encurtado de 1/200.000.000 em consequência do movimento de nosso planeta, enquanto o outro diâmetro conserva seu comprimento normal. Assim ficam compensadas as últimas pequenas diferenças. (POINCARÉ, 1904a, p. 311).

Segundo o princípio da relatividade que afirma que “as leis dos fenômenos físicos devem ser as mesmas, quer para um observador fixo, quer para um observador em movimento de translação uniforme; de modo que não temos, nem podemos ter, nenhum meio de discernir se somos ou não levados num tal movimento” (POINCARÉ, 1904a). O mesmo efeito é previsto para observadores que estejam em movimento retilíneo uniforme, porém nesse caso a contração é aparente.

Assim, se tivermos dois objetos idênticos, um parado em relação ao éter e o outro em movimento em relação ao éter, aquele que está em movimento vai *realmente* se contrair e o outro vai continuar do mesmo tamanho. No entanto, se um observador estiver se movendo em relação ao éter, junto com o objeto, ele observará o contrário: o corpo em movimento para ser a ter um tamanho “normal” e o objeto parado em relação entre aparecerá estar contraído. Nesse caso, a contração do objeto parado em relação ao éter é aparente, apenas; mas observador em movimento não terá nenhum modo de descobrir se a contração é real ou aparente. (MARTINS, 2015, p. 252).

Um ponto sensível da contração dos corpos em movimento era sua aplicação a dinâmica dos elétrons, pois em 1905 haviam três modelos para se caracterizar a

eletrodinâmica das cargas elétricas. Abraham propôs um modelo onde o elétron é esférico e mantém sua forma invariante (POINCARÉ, 1906). Bucherer e Langevin (POINCARÉ, 1906) propuseram um modelo que o elétron esférico em movimento sofre uma contração, mas seu volume é conservado. Por fim Lorentz (1904) propôs um modelo onde o elétron esférico em movimento se contraía com o fator $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Poincaré (1905g, 1906) usando o grupo de Lorentz investigou os três modelos de elétron contraído e concluiu que o único modelo compatível com o princípio da relatividade era o modelo proposto por Lorentz (POINCARÉ, 1905g, 1906). Contudo, o modelo de elétron contraído de Lorentz apresentava problemas. Max Abraham mostrou que na hipótese de Lorentz o elétron se tornaria instável e violaria a conservação da energia (MILLER, 1973). Poincaré estava ciente dessa séria objeção e desenvolveu um estudo sobre o equilíbrio do elétron (POINCARÉ, 1906). Para resolver o problema, Poincaré empregou uma analogia entre a eletrodinâmica com a hidrodinâmica, reduzindo o problema do equilíbrio do elétron a um problema das formas de equilíbrio de uma massa fluída (POINCARÉ, 1906, MILLER, 1973, WALTER, 2007). Este era um problema que Poincaré estava muito bem familiarizado, assim ele conseguiu derivar sem maiores dificuldades a solução para o problema. O elétron deveria apresentar uma pressão interna negativa, de natureza não elétrica, proporcional ao volume, que foi denominada de tensão ou pressão de Poincaré. (POINCARÉ, 1906) Por meio das tensões de Poincaré era possível superar a objeção de Abraham. Em síntese: a abordagem de Lorentz e Poincaré previam a contração longitudinal dos objetos em movimento como uma consequência da interação das moléculas com o éter. Previam modificações na forma do elétron, mas que não afetavam a sua estabilidade e eram compatíveis com o princípio de conservação de energia devido a existência das tensões de Poincaré. Como Einstein tratava do mesmo problema?

No caso da abordagem de Einstein, como não existe o éter, não há diferença entre contração real e aparente. A contração é um fenômeno relativo que depende apenas os processos de medidas adotados. Ela não é explicada microscopicamente pelas mudanças das forças entre as partículas da matéria. Em certo sentido, a abordagem do Einstein *não explica a causa física da contração* apenas deduz ela que existe. Diferenças de interpretação como essa corre em outros aspectos da teoria. (MARTINS, 2005b, p. 252)

Einstein não discute as objeções de Abraham aos elétrons contraídos a abordagem de Lorentz, que é essencialmente a mesma abordagem de Einstein. Poderíamos supor que Einstein desconhecesse essas críticas de Abraham, mas isso é bastante improvável. Em seu paper de 1905, Einstein não faz menção direta a Max Abraham, ou aos seus trabalhos,

entretanto ele usa a nomenclatura *massa longitudinal* e *massa transversal* que foi introduzida pela primeira vez por Abraham (MILLER, 1973, 1986). Como Einstein não discute as críticas de Abraham, ele não desenvolveu um equivalente às tensões de Poincaré. A interpretação de Einstein realmente dificulta prever a existência de uma pressão negativa no interior do elétron, pois como a contração dos elétrons é um fenômeno aparente, somos induzidos a pensar que o elétron mantém sua forma e que as diferenças observadas são apenas efeitos aparentes. O fato de Poincaré considerar que existia contração real e outra aparente foi vantajoso, pois trazia a luz o problema das tensões de Poincaré, que a abordagem na Einstein não era tão clara. Nesse sentido, podemos dizer que a abordagem de Poincaré foi mais oportuna.

7.6. Mudança do Período dos Relógios

Como vimos na seção anterior, a contração do comprimento dos objetos em movimento ser um fenômeno real e aparente, embora indistinguível, na abordagem de Lorentz e Poincaré e na abordagem de Einstein é um efeito apenas aparente, o mesmo acontece com o tempo. Voigt (1887) e Lorentz (1895) introduziram o conceito de tempo local e tempo real. Para Lorentz o tempo local não era munido de significado físico e servia apenas como uma variável auxiliar para se realizar cálculos entre referenciais em parados e em movimento em relação ao éter. Em 1900, Poincaré apresentou no jubileu de 25 anos de doutoramento de Lorentz, um trabalho que trazia a interpretação física do tempo local de Lorentz.

Suponhamos que alguns observadores sejam colocados em vários pontos e sincronizem seus relógios usando sinais luminosos. Eles tentam ajustar o tempo de transmissão medido dos sinais, mas eles não estão cientes de seu movimento comum e, consequentemente, acreditam que os sinais viajam igualmente rápido em ambas as direções. Eles realizam observações de sinais de cruzamento, um viajando de A para B, seguido por outro viajando de B para A. A hora local t é a hora indicada pelos relógios que são ajustados dessa forma. Se $V = 1/\sqrt{K_0}$ é a velocidade da luz, e v é a velocidade da Terra que supomos ser paralela ao eixo x , e na direção positiva, então temos: $t' = t - vx/V^2$ (POINCARÉ, 1900b, p. 272-273)

Neste trabalho, Poincaré não discute explicitamente, mas era possível prever que o tempo local sofreria um atraso em relação ao tempo real. Esta ideia fica mais claro, na conferência de 1904, que Poincaré apresentou em Saint Louis:

A ideia mais engenhosa foi a do tempo local. Imaginemos dois observadores que desejem acertar seus relógios por sinais ópticos; eles trocam sinais, mas como sabem que a transmissão da luz não é instantânea, tomam o cuidado de cruzá-los. Quando a estação B percebe o sinal da estação A, seu relógio não deve marcar a mesma hora que a da estação A no momento da emissão do sinal, mas essa hora aumentada de uma constante que representa a duração da transmissão. Suponhamos, por exemplo, que a estação A envie seu sinal quando seu relógio marca a hora zero, e que a estação B o perceba quando seu relógio marca a hora t . Os relógios estão acertados se o atraso igual a t representar a duração da transmissão, e, para verificá-lo, a estação B expede por sua vez um sinal quando seu relógio marca zero; a estação A deve então percebê-lo quando seu relógio marcar t . Então os relógios estão acertados. E, de fato, eles marcam a mesma hora no mesmo instante físico, mas com a condição de estarem fixas as duas estações. Caso contrário, a duração da transmissão não será a mesma nos dois sentidos, já que a estação A, por exemplo, vai ao encontro da perturbação óptica emanada de B, enquanto a estação B foge diante da perturbação emanada de A. Portanto, os relógios acertados desse modo não marcarão o tempo verdadeiro; marcarão o que podemos chamar de tempo local, de modo que um deles se atrasará em relação ao outro. Pouco importa, já que não temos nenhum meio de perceber isso. Todos os fenômenos que se produzirem em A, por exemplo, estarão atrasados, mas todos terão o mesmo atraso, e o observador não perceberá, já que seu relógio atrasa; assim, como manda o princípio de relatividade, ele não terá nenhum meio de saber se está em repouso ou em movimento absoluto. (POINCARÉ, 1904a, p.311)

Nas teorias de éter, quando um relógio se movimenta em relação ao éter, ele sofre um atraso em relação a um relógio em repouso. O tempo que o relógio em movimento registra é o tempo local e o tempo que o relógio em repouso registra é o tempo real. Assim como ocorre no caso da contração, o princípio da relatividade implica que se um observador estiver se movendo em relação ao éter, será o relógio em repouso que irá se atrasar. O seu relógio continua medindo o tempo local e o relógio em repouso, o tempo real, porém eles não tem nenhum modo de descobrir qual relógio mede o tempo local e qual mede o tempo real. Na abordagem de Einstein, uma vez que não existe um éter, não existe a distinção de tempo real e tempo local. As diferentes medidas de tempo são efeitos aparentes devido a impossibilidade sincronizar absolutamente de relógios em movimento.

A partir disso, segue-se a seguinte consequência peculiar. Suponhamos que em dois pontos A e B do sistema estacionário são dados dois relógios que são síncronos no sentido explicado no §3 quando vistos do sistema estacionário. Suponha que o relógio em A seja colocado em movimento na linha que o une a B, depois da chegada do relógio em B, eles não serão mais encontrados síncronos, mas o relógio que foi acionado a partir de A ficará atrás do relógio que tinha sido o tempo todo em B por uma quantia $\frac{1}{2} v^2/c^2$, onde t é o tempo necessário para a jornada. Vemos imediatamente que o resultado vale também quando o relógio se move de A para B por uma linha poligonal, e também quando A e B coincidem. Se assumirmos que o resultado obtido para uma linha

poligonal também se aplica a uma linha curva, obtemos a seguinte lei. Se em A houver dois relógios síncronos, e se colocarmos em movimento um deles com uma velocidade constante ao longo de uma curva fechada até que volte a A, a viagem será completada em t segundos, depois da chegada, a última mencionada o relógio ficará atrás do estacionário por $\frac{1}{2} v^2/c^2$ segundos. A partir disso, concluímos que um relógio colocado no equador deve ser mais lento em uma quantidade muito pequena do que um relógio similarmente construído que é colocado no polo, todas as outras condições sendo idênticas. (EINSTEIN, 1905, p. 904)

Tanto Lorentz como Poincaré não deram grande ênfase a dilatação dos períodos. Poincaré discutiria entre 1906 e 1911 questões envolvendo relógios em movimento apenas em suas aulas⁵¹, não as publicando em *papers* (WALTER, 2014). Por outro lado, a abordagem proporcionada por Einstein sobre a dilatação do tempo é muito mais clara e, diferente de Lorentz e Poincaré, Einstein deduziu as equações de transformação dos períodos e consequências importantes sobre a dilatação do tempo. Podemos afirmar que nesse resultado a abordagem de Einstein foi mais vantajosa.

7.7. Relatividade da Simultaneidade

Segundo Max Jammer (2006) em seu estudo histórico sobre os conceitos de simultaneidade registrou que Poincaré foi o primeiro pesquisador a escrever uma monografia sobre o conceito moderno de simultaneidade em um trabalho intitulado *La Mesure du Temps* (POINCARÉ, 1898). Poincaré voltaria a discutir o conceito de sincronização de relógios no jubileu do doutorado de Lorentz em 1900 e em sua conferência de 1904 em Saint Louis.

Albert Einstein apresentou seu processo de sincronização de relógios em seu *paper* de 1905 que é basicamente a descrição fornecida por Poincaré. A grande diferença é que enquanto Poincaré usa os conceitos de tempo local e tempo real, Einstein, por rejeitar o éter, considera todos os tempos equivalentes. De acordo com Albrecht Fölsing (1998) a semelhança não se trata de uma coincidência, em algum momento em 1905, Michele Beeso teria descoberto a palestra de Poincaré de 1904 e apresentado seu método de sincronização de relógios a Einstein.

Tenha Einstein se baseado no trabalho de Poincaré ou tenha desenvolvido suas ideias de forma independente, existe um aspecto na abordagem de Poincaré que superou

⁵¹ Poincaré em suas aulas fez uma análise baseada em elipsóides de luz que levava a uma equação com duas possibilidades: os relógios em movimento se atrasam ou os relógios em movimento se adiantam. Por alguma razão não justificada, ele optou pela segunda opção. Para detalhes ver Walter (2014).

o trabalho de Einstein, Segundo Katzir (2005a): as implicações do princípio da relatividade sobre a gravitação. Tanto Einstein quanto Poincaré estavam cientes que no modelo newtoniano ou a gravitação se propagava de forma instantânea ou pelo menos um milhão de vezes mais rápido que a velocidade da luz (POINCARÉ, 1904, 1905g, 1906, KATZIR, 2005a). O fato é que a gravitação abria um precedente na sincronização de relógios, permitindo detectar o movimento absoluto, violando o princípio da relatividade. Poincaré chamou atenção dessa fato pela primeira vez em sua conferência (POINCARÉ, 1904, p. 312):

Se, depois de acertar os relógios pelo procedimento óptico, quiséssemos verificar o acerto com o auxílio desses novos sinais, constataríamos divergências que poriam em evidência a translação comum das duas estações. E serão inconcebíveis tais sinais se admitirmos, com Laplace, que a gravitação universal se transmite 1 milhão de vezes mais rapidamente que a luz.

Em 1904, Poincaré estava muito envolvido com a questão da simultaneidade e com os processos de medida na relatividade, Poincaré admitia que a simultaneidade tinha consequências muito grandes: influenciando na física gravitacional, na mecânica e na eletrodinâmica. Poincaré buscava trabalhar e acomodar esses resultados.

A pergunta de Poincaré não era meramente um discurso retórico. A teoria física atual admitiu sinais mais rápidos que a velocidade da luz, e Pierre Simon Laplace (1749-1827) concluiu que a velocidade da força gravitacional era pelo menos um milhão de vezes mais rápida que a da luz. Poincaré reconheceu, assim, que sua nova interpretação do princípio da relatividade requeria uma modificação da teoria da gravitação: a força gravitacional deveria se transformar como forças eletromagnéticas (sua terceira hipótese) e não se propagar a uma velocidade maior que a da luz. A relatividade, que surgiu pela primeira vez na mecânica, agora revelou a necessidade de modificar tanto a teoria eletrodinâmica quanto a gravitacional. Poincaré, portanto, reconheceu em 1904 que a admissão do princípio da relatividade na física exigia mudanças significativas nas teorias e conceitos físicos atuais. Ele também reconheceu o significado dos sinais de luz em sua nova física relativista. (KATZIR, 2005b, p. 279-280)

Em 1905, após estabelecer o grupo de Lorentz, obter as tensões de Poincaré e provar a covariância de Lorentz para o eletromagnetismo, Poincaré buscou conciliar o princípio da relatividade com a gravitação. Esse estudo levava a duas hipóteses: (i) a força gravitacional é de origem eletromagnética e, portanto, é naturalmente covariante de Lorentz; (ii) a força gravitacional não é de origem eletromagnética, mas ainda assim é possível construir um programa gravitacional covariante de Lorentz (POINCARÉ, 1906). Poincaré optou pela segunda hipótese e provou que era possível conciliar o princípio da relatividade com a força gravitacional (POINCARÉ, 1906).

Poincaré sugeriu uma modificação da lei de atração de Newton por causa da contradição entre essa lei e a nova física relativista. Uma força que se transforma de um sistema de referência para outro de forma diferente da força elétrica, ou que se propaga mais rapidamente que a luz, revelaria velocidades absolutas em contradição com o princípio da relatividade. A elaboração teórica de Poincaré da lei da atração mostrou que a força da gravitação pode ser incorporada na nova física relativista. Como sua principal preocupação era resolver a contradição entre a força e o princípio da relatividade (em sua interpretação eletrodinâmica), Poincaré estava satisfeito com uma lei de força indefinida (ou leis). Isso pode explicar por que ele não a comparou com os detalhes dos dados astronômicos, nem desenvolveu uma teoria independente. Em vez disso, ele estava satisfeito em declarar seu acordo geral com as observações e a deixou baseada na teoria newtoniana. (KATZIR, 2005a, p. 30)

Einstein, por sua vez, sequer levantou o problema da gravitação, a simultaneidade e o princípio da relatividade. Ele simplesmente ignorou a questão. Nem em seus dois artigos de 1907 onde ele volta a discutir o princípio da relatividade e apresenta o princípio da equivalência, a incompatibilidade aparente da lei da gravitação de Newton e o princípio da relatividade é mencionado.

A ausência de qualquer tratamento da gravitação na teoria de 1905 de Einstein torna sua discussão da simultaneidade e, portanto, toda a teoria, aberta a dúvidas e objeções, como aquelas que Poincaré levantou em 1904. O tratamento da gravitação fez a teoria relativística de Poincaré de 1905 mais completa que a teoria de Einstein do mesmo ano. (KATZIR, 2005a, p. 30)

Poderíamos pensar que Einstein não falou sobre o problema gravitacional, pois ainda estava amadurecendo sua abordagem que resultaria na teoria da relatividade geral. Mas isso é improvável. Depois de 1907, Einstein se dedicou a teoria quântica e sua carreira progrediu como físico quântico, não há documento que mostre seu interesse pela gravidade, antes de 1911 (MARTINS, 2015). Portanto, em 1905, a abordagem de Einstein sobre a simultaneidade era incompleta e não havia interesse do autor em completá-la, enquanto a abordagem de Poincaré era mais completa, e apesar de ainda ser um esboço, era bastante satisfatória (DE SITTER, 1911, KATZIR, 2005a, WALTER, 2007).

7.8. Transformações de Lorentz

As transformações da Lorentz, nome sugerido por Poincaré (MILLER, 1973, MARTINS, 2015), tem uma longa história que vale a pena discutirmos sinteticamente antes de discutirmos como Lorentz, Poincaré e Einstein obtiveram esse resultado. A primeira ancestral histórica das transformações de Lorentz foram obtidas pelo físico

alemão W. Voigt, em 1887. Voigt estudou o efeito Doppler da luz, assumindo que a forma da equação da onda deve se manter invariante e que a coordenada longitudinal obedece a transformação de Galileu (VOIGT, 1887). O resultado obtido por Voigt foi o seguinte conjunto de transformações de coordenadas (escritas em notação em moderna) (VOIGT, 1887):

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\y' &= y\sqrt{1 - v^2/c^2} \\z' &= z\sqrt{1 - v^2/c^2} \\t' &= t - vx/c^2\end{aligned}$$

Martins (2015) observa que se dividirmos o lado direito da equação por $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ obtemos a forma exata das transformações de Lorentz:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\end{aligned}$$

Voigt não explicou o significado das transformações das coordenadas y , z e t . Possivelmente ele as trata como um simples truque matemático que tornava as equações mais simples (MARTINS, 2015). O estudo de Voigt permitiu que ele percebesse que o tempo absoluto de Newton tinha que ser rejeitado e seria preciso assumir a existencia de um tempo local (ERNST, HSU, 2001). Dado o fato de Voigt ter sido o primeiro a obter transformações semelhante as de Lorentz, o historiador Jean-Paul Auffray (1998) propõe que as transformações de Lorentz sejam chamadas de transformações de Voigt-Lorentz.

É importante observar que a análise de Voigt não era direcionada a experiência de Michelson-Morley, realizada em 1887. A primeira teoria eletromagnética para explicar os resultados nulos da experiência de Michelson-Morley, válida para termos de primeira ordem em v/c , foi proposta por Lorentz em 1895, em um trabalho intitulado *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. (MARTINS, 2015). Neste trabalho, Lorentz obteve a lei da força eletromagnética sobre corpos carregados (denominada força de Lorentz) e as seguintes transformações (aproximadas) para o espaço, tempo e os campos elétrico e magnético.

$$\begin{aligned}
\vec{F} &= q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) & x' &= x - vt \\
\vec{E}' &= \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} & y' &= y \\
\vec{B}' &= \vec{B} - \vec{v} \times \vec{E}/c^2 & z' &= z \\
& & t' &= t - vx/c^2
\end{aligned}$$

Em 1900, Joseph Larmor escreveu um trabalho intitulado *Aether and Matter* onde ele deduz as transformações de Lorentz válidas para a segunda ordem em v/c e que em notação moderna são escritas como (LARMOR, 1900):

$$\begin{aligned}
x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\
y' &= y \\
z' &= z \\
t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}
\end{aligned}$$

Essas são as formas exatas das transformações de Lorentz para o espaço e o tempo, porém Larmor acreditava que elas só fossem válidas até a segunda ordem em v/c . Infelizmente Larmor não conseguiu obter as transformações para as grandezas eletromagnéticas. Estes resultados só seriam obtidos quatro anos depois, por Lorentz em seu famoso *memoir*, *Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light*, apresentado em uma conferência em Amsterdã. Neste artigo Lorentz, analisando o momento eletromagnético, obteve as transformações exatas de coordenadas de espaço e tempo e das grandezas eletromagnéticas, exceto as densidades de carga e corrente (POINCARÉ, 1905g, 1906).

Em seu *memoir*, Lorentz procedia com as suas transformações em duas etapas: primeiro ele considera uma transformação de Galileu, que ele chamava de verdadeira, do sistema S em repouso para o S' em movimento (LORENTZ, 1904):

$$\begin{aligned}
x' &= x - vt & y' &= y \\
t' &= t & z' &= z
\end{aligned}$$

Depois dessa transformação, Lorentz aplica um novo conjunto de transformações, consideradas aparentes, dada por (LORENTZ, 1904):

$$\begin{aligned}
x'' &= \frac{x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} & y'' &= y' \\
t'' &= t' \sqrt{1 - v^2/c^2} - \frac{vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} & z'' &= z'
\end{aligned}$$

Se substituirmos o primeiro conjunto de transformações no segundo conjunto, obtemos a forma tradicional das transformações de Lorentz (MARTINS, 2015).

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} & y' &= y \\t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} & z' &= z\end{aligned}$$

Em seu *memoir* Lorentz não realizou essa substituição, ela foi proposta um depois por Poincaré em *Sur La Dynamique de l'électron* (MARTINS, 2015). Lorentz também obteve as transformações corretas para os campos elétricos e magnéticos, que podemos representar em notação moderna pelas relações (LORENTZ, 1904):

$$\begin{aligned}E'_x &= E_x & B'_x &= B_x \\E'_y &= (E_y - vB_z) / \sqrt{1 - v^2/c^2} & B'_y &= (B_y + E_z v/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2} \\E'_z &= (E_z + vB_y) / \sqrt{1 - v^2/c^2} & B'_z &= (B_z - E_y v/c^2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}\end{aligned}$$

Poincaré estudou detalhadamente o trabalho de Lorentz. Em 1905, Poincaré escreveu pelo menos três cartas à Lorentz discutindo detalhes sobre o *memoir*. Inicialmente Poincaré percebeu que a transformação da densidade de carga estava incorreta. Depois ele procurou demonstrar que uma função l que na teoria de Lorentz era igual a unidade e nas outras teorias assumia outro valor, era a única solução que garantia a covariância do eletromagnetismo. Por fim, Poincaré comunica Lorentz da descoberta de um grupo infinitesimal, que ele batizou de grupo de Lorentz⁵².

Estes resultados e outros obtidos por Poincaré foram publicados no artigo *Sur La Dynamique de l'électron*, cuja versão resumida foi publicada em 05 de Junho de 1905 e a versão detalhada foi submetida em Julho de 1905, mas somente publicada em Janeiro de 1906. Além da correção da densidade de carga, Poincaré também corrigiu a transformação densidade de corrente, escreveu as transformações de Lorentz no formalismo moderno e mostrou que, como elas formam um grupo infinitesimal, não era preciso fazer uma transformação intermediária, como propunha Lorentz, todas transformações poderiam ser feita de forma direta (POINCARÉ, 1906).

Em seu *paper* de 1905, Einstein também deduz as transformações de Lorentz, contudo o método empregado por Einstein era diferente do processo empregado por

⁵² Não confundir com o grupo de Poincaré que são é o grupo de todas as isometrias do espaço-tempo plano (variedade de Poincaré-Minkowski).

Lorentz e Poincaré. Einstein deduz as transformadas de Lorentz usando as transformações do comprimento e dos períodos dos relógios e argumentos de simetria, como a isotropia do espaço. Porém, há um problema na abordagem proposta por Einstein. Logunov (2004) mostrou que as transformações de Lorentz que Einstein obteve são casos particulares para um intervalo do tipo luz e que Einstein deu um salto lógico e propôs que elas eram válidas para qualquer tipo de intervalo. Abaixo demonstramos porque Einstein não deduziu as transformações gerais de Lorentz. Em sua cinemática relativística, Einstein deduziu (por um processo duvidoso, como já discutimos) a seguinte equação (EINSTEIN, 1905, p. 899)

$$\tau = a \left[t - \frac{v}{c^2 - v^2} x' \right]$$

Para deduzir as transformações de coordenadas, Einstein introduz um sistema de coordenadas ξ, η, ζ, τ , que, por construção, no instante $\tau = 0$ seja emitido um raio de luz no sentido crescente da coordenada ξ . A partir dessas considerações, Einstein (1905, p. 899) obtém a seguinte equação:

$$\xi = c\tau$$

Substituindo o valor de τ na equação de ξ , resulta em (EINSTEIN, 1905, p. 899)

$$\xi = ac \left[t - \frac{v}{c^2 - v^2} x' \right]$$

Einstein faz novamente uma hipótese que viola o segundo postulando e só seria válida em uma teoria de éter, como a de Lorentz e Poincaré, ele discorre que o raio de luz se move no referencial em repouso com velocidade $c - v$ (o que em uma teoria de éter é o que de fato acontece, mas em uma teoria sem éter, é absurdo). Essa condição resulta no seguinte valor para t (EINSTEIN, 1905, p. 900):

$$\frac{x'}{c - v} = t$$

Substituindo esta equação de t na equação de ξ , Einstein (1905, p. 900) obtém:

$$\xi = a \left[\frac{c^2}{c^2 - v^2} x' \right]$$

Por meio de considerações de simetria e um trabalho algébrico, Einstein consegue deduzir o valor de x' e determinar o valor da coordenada ξ (EINSTEIN, 1905, p. 900):

$$x' = x - vt$$

$$\xi = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Segundo Einstein (1905) está é a transformação de Lorentz de x para a coordenada ξ , que tem como decorrência que x e t são variáveis arbitrárias e independentes. Acontece que como a dedução de Einstein só vale para o intervalo do tipo luz, não é uma lei geral, as variáveis x e t são dependentes uma da outra (LOGUNOV, 2004). Para demonstrar essa dependência, tomemos as seguintes equações:

$$\frac{x'}{c-v} = t,$$

$$x' = x - vt$$

Isolando x' na primeira equação e substituindo na segunda, resulta em:

$$(c-v)t = x - vt$$

Distribuindo os termos no lado esquerdo, a equação se tona:

$$ct - vt = x - vt$$

Isolando x e realizando as simplificações algébricas, temos:

$$x = ct$$

Que prova a afirmação que as transformações de Lorentz deduzidas por Einstein são válidas apenas para o intervalo do tipo luz, isto é, quando se verifica a seguinte condição $x = ct$. Sobre este fato, Logunov faz o seguinte registro (LOGUNOV, 2004, p.55).

Ele também não entendeu que a energia e o momento de uma partícula constituem uma quantidade unificada e que se transformam sob as transformações de Lorentz da mesma maneira que ct , x , y , z . Deve-se enfatizar especialmente que Einstein, em seu trabalho de 1905, em contraste com Poincaré, não estendeu as transformações de Lorentz a todas as forças da natureza, por exemplo, para a gravitação.

Registre-se que é possível deduzir as transformações (gerais) de Lorentz de argumentos da cinemática relativística, uma demonstração pode ser vista em Martins (2012), apenas a abordagem que Einstein desenvolveu que é restrita para intervalos especiais do tipo luz. Tendo em vista esses argumentos, podemos concluir que o desenvolvimento proposto por Lorentz e Poincaré, embora seja mais complexo, era mais completo e mais consistente.

7.9. Transformações de Campos Eletromagnéticos

No breve histórico que apresentamos sobre as transformações de Lorentz, mostramos que foi Lorentz, em 1904, que obteve a forma exata das transformações dos

campos eletromagnéticos e que Poincaré, em 1905, corrigiu as transformações da densidade de corrente e de carga e ainda estendeu essas transformações para outras grandezas, incluindo a gravitação. Portanto, não temos nada a acrescentar quanto ao desenvolvimento de Lorentz-Poincaré a respeito da eletrodinâmica. Portanto, resta-nos analisar como Einstein abordou o desenvolvimento da eletrodinâmica.

Inicialmente façamos uma pequena contextualização histórica: o primeiro *paper* de Einstein de 1905 era dividido em duas partes: Cinemática e Eletrodinâmica. A primeira parte do seu *paper* é bastante elogiado pela forma clara e simples como Einstein fez as suas deduções. Embora tenhamos mostrado que em alguns pontos Einstein foi incoerente com seu segundo postulado e a rejeição do éter e tenha dado um salto lógico para obter a transformação de Lorentz, correções cirúrgicas permitem manter a estrutura clara e simples proposta por Einstein. Por outro lado, o mesmo não pode ser dito de sua Eletrodinâmica. A esse fato, agrava que Cullwick (1981) que revisou os ensaios de Einstein de 1905, e mostrou uma série de inconsistências. Segundo Cullwick (1981, p. 169) estas inconsistências ocorreram, pois duas condições foram violadas.

Ao usar a Teoria da Relatividade Especial para determinar fenômenos físicos associados a corpos em movimento, duas condições devem ser satisfeitas: (a) Na expressão matemática de uma lei física, somente aquelas medidas físicas relativas a um *determinado* sistema de referência, isto é, o sistema cujas coordenadas são usadas nas equações, deve ser utilizado. (b) Se, para simplificar o problema, o ponto de vista é transformado no sistema de referência em que o corpo em movimento está em repouso, os resultados devem então ser transformados de volta ao sistema original no qual o corpo está se movendo. Em algumas partes de seu artigo, Einstein não conseguiu aderir a essas condições.

Em sua análise, Cullwick (1981) encontrou algumas inconsistências crassas na eletrodinâmica de Einstein:

1. Enunciados das equações de Maxwell e da de força de Lorentz
2. A dedução da massa transversal do elétron
3. As três propriedades dinâmicas do elétron

A estas inconsistências podemos acrescentar uma quarta, apontada por Keswani (1965): a forma esférica invariante de um pulso luminoso. Na primeira parte, Cinemática, Einstein (1905, p. 901) faz a seguinte afirmação: “assim, a onda considerada também é vista no sistema móvel como uma onda esférica de velocidade de propagação c .”. Em uma nota de rodapé, ele explicita mais ainda essa afirmação: “as equações das transformações de Lorentz deduzem-se diretamente, com mais simplicidade, a partir da condição de que, por virtude delas, a relação $\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 - c^2\tau^2 = 0$ deve implicar esta

outra: $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0$.” (EINSTEIN, 1905, p. 901). Em outras palavras, assim como Voigt, Einstein assume que o formato esférico da onda não depende do referencial inercial adotado. Na teoria da relatividade especial, uma esfera luminosa pode ter diferentes centros em diferentes referenciais, todos eles equivalentes, devido a relatividade da simultaneidade, mas em todos os referenciais ela terá um formato esférico (MARTINS, 2012). Já na segunda parte do *paper*, Eletrodinâmica, quando Einstein começa a estudar a energia transmitida por um pulso de luz, ele faz a seguinte afirmação:

Vamos procurar saber qual é a quantidade de energia contida dentro dessa superfície quando ela é observada do sistema K ., isto é, qual a energia do complexo luminoso relativamente ao sistema k . Ora, quando é observada do sistema móvel, *a superfície esférica transforma-se em uma superfície elipsoidal*. (EINSTEIN, 1905, p. 913, *Itálico nosso*).

E a partir dessa consideração, Einstein desenvolve toda a análise considerando a onda como um elipsoide de revolução, em claro desacordo com as conclusões da primeira parte do *paper*.

7.10. Relação entre Massa e Velocidade

O estudo da variação da inércia do elétron com a velocidade apareceu na física muito antes das primeiras ideias relativísticas, no final do século XIX, a partir da descoberta dos elétrons.⁵³ Medidas experimentais realizadas por Kauffman usando raios betas mostravam uma alteração da razão e/m à medida que a velocidade dos elétrons tendia a velocidade da luz (MARTINS, 2005a). Nessa época acreditava-se que a variação da massa do elétron estivesse associada a concentração de éter. Até 1905 haviam três modelos que quantificavam as variações da massa do elétron com a velocidade: (a) o modelo do elétron esférico indeformável de Abraham; (b) o modelo do elétron contraído que conserva seu volume de Bucherer e Langevin; (c) o modelo do elétron contraído de Lorentz (MARTINS, 2005a). Todos os três modelos eram compatíveis com as medidas experimentais, portanto a questão não poderia ser decidida por meio de um experimento. Em 1905, Poincaré submeteu os três modelos de elétron contraído a uma análise minuciosa e concluiu que o único modelo compatível com o princípio da relatividade era o de Lorentz (POINCARÉ, 1906).

⁵³ O estudo mais detalhado sobre esse tema foi empreendido por Roberto de Andrade Martins no artigo *A Dinâmica Relativística antes de Einstein* (MARTINS, 2005b).

Lorentz em seu estudo sobre a variação da massa do elétron usou considerações semelhantes as propostas por Max Abraham. Partindo do momento eletromagnético, Lorentz retirou a imposição de Abraham de que o elétron deveria preservar sua forma esférica, permitindo que ele se contraísse de maneira arbitrária (LORENTZ, 1904). Após integrar as equações do elétron, Lorentz obteve as seguintes equações para a massa longitudinal e transversal do elétron (LORENTZ, 1904):

$$\text{Massa Longitudinal} = \frac{m_o}{\left(\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\right)^3}, \quad \text{Massa Transversal} = \frac{m_o}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

Em seu *paper* Einstein também se propõe a deduzir as equações para massa transversal e longitudinal do elétron, contudo sua análise parte de pressupostos incorretos que levam a um resultado incorreto para massa transversal do elétron. Einstein (1905), obteve as seguintes relações:

$$\text{Massa Longitudinal} = \frac{m_o}{\left(\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}\right)^3}, \quad \text{Massa Transversal} = \frac{m_o}{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

Este é um dos erros de Einstein mais comentados na literatura (MILLER, 1997, CULLWICK, 1981, KESWANI, 1965a, 1965b, MARTINS, 2005a, 2015, BROWN, 2017) A dedução está incorreta porque Einstein ao expressar a ação da força eletromagnética, fez com que as medidas se referissem a tempos distintos, portanto violando a condição de “na expressão matemática de uma lei física, somente aquelas medidas físicas relativas a um determinado sistema de referência, isto é, o sistema cujas coordenadas são usadas nas equações, deve ser utilizado.” (CULLWICK, 1981, p. 169). O erro de Einstein foi corrigido no ano seguinte por Max Planck (1906) que introduziu a transformação relativística da massa dos corpos em movimento.

7.11. Relação entre massa e energia ($E = mc^2$)

A conexão entre a massa e a energia não foi descoberta por Albert Einstein, ela foi sendo construída gradativamente a partir do final do século XIX, em trabalhos sobre a dinâmica do elétron (FADNER, 1988). Historicamente, o primeiro pesquisador a apresentar a equação de forma explícita foi Henri Poincaré em 1900, ao analisar o princípio da ação e reação na teoria de Lorentz (FADNER, 1988). Poincaré considerou que nos processos de emissão e absorção de radiação havia a criação e destruição de um

fluido de fictício dotado de momento e com uma inércia proporcional à sua energia $m = E/c^2$ (POINCARÉ, 1900b).

Segundo Langevin (1913a), Poincaré foi o primeiro a deduzir a massa maupertuisiana associado a energia da radiação eletromagnética. Em 1904, Friederich Hasenöhl estudou a dinâmica de uma caixa cheia de radiação e mostrou que deveria haver um aumento de sua inércia em um fator $m = 3/8 E/c^2$, no ano seguinte, Hasenöhl percebeu que havia cometido um erro de integração e apresentou o valor correto para o aumento de inércia da caixa: $m = 3/4 E/c^2$ (LANGEVIN, 1913a, FADNER, 1988, MARTINS, 2005b, 2015). A fração $4/3$ não se trata de um erro numérico, ela é uma consequência de qualquer análise sobre a relação massa e energia que não leve em consideração as tensões de Poincaré. A pressão negativa interna do elétron produz um trabalho negativo igual a $W = - 1/3 mc^2$. Levando em consideração esse novo valor, chegamos a relação massa e energia convencional $E = mc^2$. Einstein também estudou a relação massa-energia, mas enquanto Poincaré e Hasenöhl estudaram casos particulares onde se pode associar uma inércia a radiação, Einstein estudou a quantidade de energia associado a inércia de um corpo. Costuma-se a dizer que Einstein provou a relação massa-energia $E = mc^2$ para corpos materiais, mas isso não é verdade (IVES, 1952, MARTINS, 1989, 1998b, 2012, 2015, LOGUNOV, 2004). O próprio Einstein em seu pequeno *paper* de 1905, mostra que o resultado obtido era uma aproximação de primeira ordem em v/c (EINSTEIN, 1905b). O problema da análise de Einstein é que ele cometeu um princípio de petição, como observou Planck dois anos depois.

Einstein já havia chegado essencialmente a mesma conclusão [Ann. Physik 18, 639 (1905)] pela aplicação do princípio da relatividade a um processo especial de radiação, embora sob o pressuposto admissível de ser apenas uma primeira aproximação, que a energia total de um corpo é composta aditivamente de sua energia cinética e sua energia refere-se a um sistema com o qual está em repouso. (PLANCK, 1907, p. 546).

Outro problema na dedução de Einstein é que ele realiza um salto lógico ao supor, sem provar, que esta relação é lei geral, aplicado a todos os corpos e formas de energia, o que não é verdade.

Não se aplica aos sistemas extensos submetidos a pressões (como foi explicado anteriormente) e não se aplica à energia potencial. Quando um elétron se move em um campo externo, sua massa *não deve ser calculada* levando-se em conta sua energia potencial. Além disso, no estudo relativístico de meios contínuos, o conceito de massa inercial maupertuisiana deixa de ser aplicável. (MARTINS, 2015, p. 226-227)

Em 1952, Hebert Ives fez um estudo sobre a origem da relação massa-energia, ele mostrou que Poincaré foi o primeiro a obtê-la explicitamente e discutiu as diferenças entre as abordagens de Poincaré e Lorentz. Ives ponderou as críticas de Planck e demonstrou que Einstein cometeu uma petição de princípio, isto é, que ele provou aquilo que ele pretendia demonstrar. A conclusão de Ives é que “a relação $E = mc^2$ não foi derivada por Einstein.” (IVES, 1952, p. 543). O que podemos concluir que a contribuição de Einstein para a relação massa-energia deve ser considerada com algumas reservas.

7.12. Outros Desenvolvimentos da Relatividade Especial

Nas seções anteriores, vimos que em diversos pontos, a análise de Lorentz e Poincaré superaram a análise feita por Einstein. Ainda há outros pontos que o desenvolvimento proposto Poincaré, com base na teoria de Lorentz, foi além dos desenvolvimentos propostos de Einstein. Nesta seção comentaremos brevemente sobre cada um destes pontos.

Tanto Einstein quanto Poincaré obtiveram a fórmula correta da adição relativística de velocidades. A principal diferença é que Einstein deduziu apenas a fórmula para o caso longitudinal, enquanto Poincaré deduziu a fórmula geral. Nessa dedução Einstein faz um comentário um pouco enigmático: “por aqui se vê que tais transformações paralelas formam – como se deve ser – um grupo.” (EINSTEIN, 1905). O que torna essa afirmação misteriosa é que Einstein não demonstrou que estas transformações formam um grupo, além de não estar familiarizado com essa teoria em 1905.

Embora tenha dado uma menção passageira à teoria do grupo em seu primeiro artigo sobre a relatividade especial em 1905, esse assunto e a geometria de espaços vetoriais multidimensionais não se tornaram uma parte regular do arsenal matemático de Einstein até 1911, quando ele percebeu que eles eram indispensáveis para a construção da relatividade geral. (PYENSON, 1980, p. 422)

O primeiro a demonstrar que as transformações de Lorentz formam um grupo e deduzir a sua álgebra de Lie foi Henri Poincaré. O grupo de Lorentz, como denominou Poincaré, foi uma das descobertas mais importantes na teoria da relatividade (LOGUNOV, 2004), pois permitiu que Poincaré construísse o invariante relativístico $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$, a partir do qual Poincaré inventou espaço-tempo quadrimensional (POINCARÉ, 1906, AUFFRAY, 1998), a obtenção das isometrias e simetrias da variedade e a representação das grandezas físicas como quantidades quadrimensionais (POINCARÉ, 1906, KATZIR, 2005a, 2005b, WALTER, 2007) O

trabalho de Einstein não desenvolveu esses aspectos que se tornariam essenciais para a relatividade geral (MARTINS, 2015).

Outro ponto, que já mencionamos, foi a descoberta das tensões de Poincaré. Como para Einstein a contração do elétron era apenas um efeito aparente e não lhe interessava a causa, Einstein não respondeu as objeções de Abraham sobre a estabilidade do elétron contraído. Já Poincaré que considerava existir uma contração real do elétron, buscou uma forma de equilíbrio ao comparar um elétron com uma massa fluída. Isso conduziu a descobrir que existiam distinções internas no elétron de natureza não eletromagnética e que dependiam do volume (POINCARÉ, 1906).

Por fim mencionamos a extensão do princípio da relatividade à gravitação que era uma exigência para garantir a relatividade da simultaneidade e também uma exigência da universalidade do princípio da relatividade (POINCARÉ, 1906). Os estudos feitos por Lorentz eram válidos apenas para o eletromagnetismo, era necessário também estendê-los para gravitação (POINCARÉ, 1906). Einstein não fez qualquer menção as implicações do princípio da relatividade a gravitação antes de 1911, quando ele aderiria ao desenvolvimento da relatividade geral (MEHRA, 1974, KATZIR, 2005a).

7.13. Quais foram percepções de Lorentz, Poincaré e Einstein sobre a relatividade?

Como vimos, Lorentz e Poincaré desenvolveram sua abordagem da teoria de modo bastante satisfatório. Poincaré excedeu as contribuições de Einstein desenvolvendo o formalismo quadridimensional e hipóteses sobre a gravitação universal. Lorentz reconhecia a grande contribuição de Poincaré, mas inicialmente se manteve reticente com o princípio da relatividade. Einstein mostrou que era possível desenvolver parte dos resultados obtidos por Lorentz e Poincaré de maneira mais clara e que não era necessário se referir a um éter. O desenvolvimento realizado por Einstein era bastante problemático, embora, boa parte dos resultados estejam corretos. Em síntese, o projeto como Einstein propõe construir a relatividade está correto, porém a execução do projeto feita por Einstein que precisava ser revista. Nesta seção, vamos avaliar como cada um dos atores envolvidos na relatividade enxergou seu próprio papel e de seus colegas.

Poincaré sempre abnegou o mérito pela teoria da relatividade. Em *Sur la dynamique de l'électron*, ele faz duas afirmações anacrônicas, a saber: (i) que Lorentz foi o primeiro empreender uma eletrodinâmica que fosse compatível com o princípio da relatividade;

(ii) que o princípio da relatividade era de autoria de Lorentz. (POINCARÉ, 1906). Nenhuma dessas afirmações é correta. Lorentz realmente estabeleceu uma nova eletrodinâmica que se mostrou compatível com o princípio da relatividade em seu *memoir* de 1904, mas em momento algum Lorentz menciona o princípio da relatividade. Sua preocupação era garantir a covariância das equações de Maxwell e explicar o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley (LORENTZ, 1904). Ocorre que Poincaré descobriu em seu estudo do *paper* de Lorentz que somente uma teoria compatível com o princípio da relatividade satisfaz essas condições (POINCARÉ, 1906). Em síntese: Lorentz desenvolveu sua eletrodinâmica sem considerar o princípio da relatividade como postulado fundamental e Poincaré mostrou que a eletrodinâmica de Lorentz era a única compatível com o princípio da relatividade. O segundo anacronismo é bastante curioso: assim como Lorentz não se importou de incluir o princípio da relatividade em sua eletrodinâmica, ele também não fundamentou essa ideia. O princípio da relatividade foi fundamentado por Poincaré entre 1895 e 1900 e apresentado de forma clara em 1900, no jubileu de 25 anos de doutorado de Lorentz. Em nenhum trabalho, entre 1895 e 1905, Lorentz menciona o princípio da relatividade.

Em uma ocasião no ano de 1912, mencionando alguma outra contribuição de Einstein, ele falava exatamente nesta ocasião de "o príncipe da relatividade de Lorentz", e ele o repetiu repetidamente. E há uma razão para isso. Lorentz foi o primeiro a usar T.L.E [Transformadas de Lorentz Especial] para explicar os resultados nulos de experimentos realizados para descobrir o movimento absoluto da Terra, embora ele não tenha enunciado explicitamente o princípio da relatividade, em suas memórias de 1904. De fato, T.L.E forma o meio em que o princípio da relatividade se move e estabelece seu domínio no mundo da física onde quer que se encontrem altas velocidades. (KESWANI, 1965a, p. 19)

Esses dois anacronismos representam um curioso ato voluntário de abnegação de Poincaré do mérito da teoria da relatividade em favor de Lorentz (KESWANI, 1965a, 1965b). No que diz respeito à Einstein, Poincaré nunca fez qualquer declaração sobre o seu papel na relatividade. Poincaré tinha grande apreço por Einstein e o reconhecia como um dos nomes mais promissores da física, principalmente na teoria quântica (KESWANI, 1965a, 1965b, MARTINS, 2015). Mas sobre a contribuição de Einstein, Poincaré manteve um enigmático silêncio (GOLDENBERG, 1970).

É claro que Poincaré estava bem ciente do trabalho de Einstein e, no ano de 1911, falava palavras brilhantes sobre ele quando pediram a Poincaré que desse sua opinião sobre Einstein para uma certa nomeação, mas em nenhum lugar ele atribuiu a teoria da relatividade a Einstein. Podemos mencionar um episódio corroborativo narrado por Max Born. Numa palestra sobre a relatividade dada por Poincaré em

1909, na qual Born estava presente, Poincaré não mencionou uma única vez o nome de Einstein, embora tenha mencionado outros nomes e, de fato, deu a Max Born a impressão de que ele estava registrando o trabalho de Lorentz. (KESWANI, 1965a, p. 19)

Qual o motivo desse silêncio? Em um estudo sobre o assunto Goldenberg (1970) faz duas hipóteses: (a) ciúme intelectual e (b) a trivialidade da teoria de Einstein. Sobre primeira hipótese, Goldenberg escreve que

Pode-se pensar que Poincaré estava agindo de inveja, sentindo que Einstein estava recebendo crédito pelo trabalho que ele (Poincaré) já havia feito. Keswani parece apoiar a visão de que Poincaré certamente mereceria crédito, pelo menos pela generalização do Princípio da Relatividade, se não mais. Ele discorda da afirmação de Einstein de que ele não havia lido o artigo em 1904 de Lorentz ou as obras consecutivas de Poincaré, dizendo por um lado que, em relação a Lorentz, Einstein estava simplesmente confuso e, por outro lado, em relação a Poincaré, que o próprio Einstein admitiu ter lido *Ciência e Hipótese* como estudante. (GOLDENBERG, 1970, p. 81)

Contudo, mas mais à frente, Goldenberg considera que essa hipótese é bastante improvável.

Mesmo sem uma retrospectiva histórica, é improvável que Poincaré fosse motivado por sentimentos de ciúme em relação a Einstein. Tudo o que sabemos sobre o caráter de Poincaré desmente as motivações tão mesquinhas quanto o ciúme. Repetidas vezes, homens que o conheciam como um colega, ou como professor, ou como um homem distante, porém grande, testemunharam sua integridade intelectual, sua generosidade para com os outros e sua humildade e falta de preocupação com assuntos prioritários. (GOLDENBERG, 1970, p. 82)

A abnegação de qualquer mérito sobre o princípio da relatividade e a teoria da relatividade em favor de Lorentz é outro argumento bastante forte contra a hipótese do ciúme intelectual. Assim, parece-nos mais plausível a segunda hipótese. Vejamos quais são os argumentos de Goldenberg.

Depois de 1904, as revisões de Poincaré sobre o trabalho de Lorentz sugerem que ele achava que o objetivo fora virtualmente atingido. Em vista do interesse de Poincaré por uma teoria eletrônica abrangente que usasse um princípio indutivo de relatividade, é provável que ele tivesse visto a Teoria da Relatividade de Einstein como trivial e incompleta - uma parte insignificamente pequena de uma teoria maior que ele e Lorentz já haviam concluído. Não apenas é provável que Poincaré considerasse a contribuição de Einstein trivial; ele provavelmente não a considerou uma teoria muito boa. Poincaré manteve a noção de espaço absoluto em seu trabalho, quer esse espaço fosse ou não acessível à observação. E, embora ele reconhecesse que observadores em diferentes quadros de referência mediriam a mesma velocidade para a luz, essa concordância, essa invariância, era, para Poincaré, um artefato da medida. Havia na mente de Poincaré um quadro de referência

preferido no qual a velocidade da luz era realmente uma constante, e apenas um desses quadros. (GOLDENBERG, 1970, p. 83)

Além disso, Goldenberg argumenta que o desenvolvimento de Einstein possivelmente não tenha correspondido às expectativas de Poincaré:

Então, também, Poincaré provavelmente teria visto o trabalho de Einstein como falta de simplicidade. Não começou por generalizar a partir de simples "fatos" (no sentido de Poincaré da palavra "fato") como a teoria de Lorentz fez. Lorentz, por exemplo, começa com o resultado da experiência de Michelson-Morley, assumindo a contração de Lorentz. Einstein começa questionando noções de simultaneidade, observando certas simetrias peculiares na natureza, e ele raramente cita qualquer evidência experimental, muito menos a experiência de Michelson-Morley. De fato, Einstein às vezes chegou a ponto de ignorar tais "fatos". Em 1907, Einstein, por um lado, admitiu que não podia ver nada de errado com os cálculos de Kaufmann e admitiu ainda que não sabia se os resultados obtidos por Kaufmann para a massa de elétrons que se moviam rapidamente se deviam a erros experimentais sistemáticos na obra de Kaufmann trabalho ou um defeito na teoria da relatividade. Por outro lado, Einstein não permitiu que os "fatos" da experiência de Kaufmann o influenciassem; com efeito, ele rejeitou o resultado de Kaufmann porque teria significado a adoção de uma teoria menos satisfatória.⁶ Como vimos, Poincaré, em contraste, se perguntou se o resultado de Kaufmann não poderia significar que o Princípio da Relatividade teria de ser extirpado da teoria de Lorentz. (GOLDENBERG, 1970, p. 83)

Esta hipótese nos parece bastante provável. O trabalho de 1905 de Einstein teve pouca repercussão, sendo considerado apenas uma contribuição curiosa à teoria de Lorentz (MARTINS, 2015). Os levantamentos sobre o interesse em teoria da relatividade, feito por Scott Walter (2011), revelam que antes de 1911, a teoria despertava pouco interesse da academia científica, e mesmo em 1911, quando houve um crescimento de publicações sobre esse assunto, esse aumento foi significativo apenas na Alemanha. Como a eletrodinâmica de Lorentz e o grupo de Lorentz não apenas anteciparam todos os resultados do trabalho de Einstein, talvez à exceção da relação massa-energia cuja derivação de Einstein era insatisfatória e exigiu a intervenção de Max Planck no ano seguinte (IVES, 1952), como foi além do prognóstico de Einstein, é bem provável que Poincaré não acreditasse no sucesso da abordagem de Einstein. Outro argumento que pesa esse fato que Einstein escreveu apenas dois artigos sobre a relatividade, em 1907, mas cujo único resultado “novo” era o princípio da equivalência, que na época era uma conjectura que não era aceita por toda academia. Einstein só viria a produzir novos trabalhos sobre a relatividade a partir de 1911, quando ele se interessou pelas tentativas de generalizar o princípio da relatividade para a gravitação. Nesse cinco anos, Einstein se dedicou a teoria quântica da luz e da matéria, tendo feito importantes descobertas como

a lei do calor específico para sólidos a baixa temperatura (MARTINS, 2015). O aparente desinteresse de Einstein pela teoria da relatividade nesse período, podem ter contribuído ainda mais para que Poincaré não associasse Einstein como um dos atores importantes da Relatividade. A posição de Lorentz sobre assunto corrobora essa hipótese.

Assim como Poincaré, Lorentz também abnegou o mérito da teoria da relatividade, ora em honra de Poincaré, ora em honra de Poincaré e Einstein e ora somente em honra de Einstein (KESWANI, 1965). Essa oscilação de créditos por parte de Lorentz fica mais claro se olharmos uma linha cronológica. Em *Deux Mémoires de Henri Poincaré sur la Physique Mathématique*, Lorentz discute a prioridade da relatividade da seguinte forma:

Essas foram as considerações publicadas por mim em 1904, que deram lugar a Poincaré para escrever seu trabalho sobre a dinâmica do elétron, na qual ele anexou meu nome à transformação à qual eu vou falar. Devo notar sobre esse assunto que a mesma transformação já estava presente em um artigo do Sr. Voigt publicado em 1887, e que não extraí desse artifício todas as partes possíveis. De fato, para algumas das grandezas físicas que entram nas fórmulas, não indiquei a transformação mais adequada. Isso foi feito por Poincaré e depois por Einstein e Minkowski. (LORENTZ, 1921, p. 295)

E mais frente, Lorentz declara que:

Mais tarde, pude ver no *paper* de Poincaré que, ao proceder de maneira mais sistemática, eu poderia ter alcançado uma simplificação ainda maior. Não tendo percebido, não consegui obter a invariância exata das equações; minhas fórmulas permaneciam sobrecarregadas com certos termos que deveriam ter desaparecido. Esses termos eram pequenos demais para ter um efeito apreciável sobre os fenômenos, e eu poderia explicar a independência do movimento da Terra revelada pelas observações, mas não estabeleci o princípio da relatividade como rigorosa e universalmente verdadeiro. Poincaré, ao contrário, obteve uma perfeita invariância das equações da eletrodinâmica e formulou o "postulado da relatividade", termos que ele foi o primeiro a empregar. (LORENTZ, 1914, p. 298)

Contudo, 13 anos depois em uma conferência realizada no observatório de Monte Wilson com a presença de célebres físicos envolvidos com experiências de detecção da velocidade da Terra em relação ao éter, como Michelson, Miller e Kennedy, Lorentz fez a seguinte declaração:

Uma transformação do tempo também foi necessária. Então eu introduzi a concepção de tempo local que é diferente para diferentes sistemas de referência que são em movimento em relação um ao outro. Mas nunca pensei que isso tivesse algo a ver com o tempo real. Esse tempo real para mim ainda era representado pela noção clássica mais antiga de um tempo absoluto, que é independente de qualquer referência a quadros especiais de coordenadas. Existiu para mim apenas um tempo verdadeiro. Eu considerava a minha transformação do tempo apenas como uma hipótese de trabalho heurística. Então, a teoria da

relatividade é realmente apenas o trabalho de Einstein. (LORENTZ, 1928, p. 385)

O que levou Lorentz a mudar sua posição e omitir Poincaré? Dentre todos possíveis fatores, consideraremos dois que nos parecem serem os mais razoáveis: (a) a relação de amizade que Einstein estabeleceu com Lorentz; (b) a popularização de Einstein e da teoria da relatividade geral. Incluímos, como um catalisador a desta última conjectura, o falecimento precoce de Poincaré em 1912.

Inicialmente iremos analisar se a amizade entre Einstein e Lorentz pode ter influenciado a percepção de Lorentz. Em 1905, Lorentz já era um dos físicos teóricos mais importantes do mundo e reconhecido como uma das maiores autoridades em eletromagnetismo (DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005). Nessa época, o jovem Einstein já mostrava admirar Lorentz, entretanto o primeiro encontro entre os dois pesquisadores só ocorreria seis anos depois (MARTINS, 2015). No começo de 1911, Einstein e Mileva Maric, sua primeira esposa, mudaram-se para Praga e durante o itinerário, passaram em Leiden (Holanda), onde residia Lorentz (MARTINS, 2015). Desse primeiro encontro nasceu uma grande amizade entre os dois, uma relação, segundo Abraham Pais (1982), de pai e filho. Nos anos seguintes, Einstein passou a visita-lo sempre que podia (MARTINS, 2015). Em 1914, quando Lorentz escreveu *Deux Mémoires de Henri Poincaré sur la Physique Mathématique*, sua amizade com Einstein já era bastante sólida. Se a realmente a amizade de Lorentz com Einstein pesasse em seu juízo, o conteúdo desse ensaio de Lorentz sobre Poincaré deveria ter sido mais favorável a Einstein do que a Poincaré como vemos na conferência de 1927. Portanto, parece-nos que conjectura que a amizade de Lorentz com Einstein pesou em sua mudança de posição deve ser descartada.

A conjectura o impacto da popularização de Einstein, principalmente com o sucesso da Teoria da Relatividade Geral em 1919 com a expedição de Eddington e Dyson, sobre a percepção de Lorentz nos parece mais plausível. Segundo Kragh (2001, p. 167):

O cientista nem sempre é uma testemunha fidedigna quando se trata de suas próprias ações. Esquecimento, em geral, e uma tendência de racionalizar tudo à luz de desenvolvimentos posteriores desempenharão naturalmente um papel significativo em relatos retrospectivos de acontecimentos que ocorreram há muitos anos.

Essa parece ser justamente a situação. Em 1914, quando Lorentz escreveu suas memórias de Poincaré, Einstein ainda era um físico pouco conhecido fora do círculo acadêmico, seus principais méritos estavam relacionados a física quântica (MARTINS, 2015). O papel de Einstein para relatividade era mais como uma contribuição para o

trabalho de Lorentz do que um projeto original (2015), Kauffmann (1906) chamava o trabalho de Einstein uma curiosa adição a eletrodinâmica de Lorentz. Com o desenvolvimento e a popularização da Teoria da Relatividade Geral, principalmente por Arthut Eddington, à partir de 1919, Einstein passou a ganhar um papel de destaque. (MARTINS, 2015). O que era antes apenas uma “adição curiosa”, tornou-se um programa de pesquisa independente do de Lorentz e Poincaré e cuja continuidade foi a bem-sucedida Teoria da Relatividade Geral. A narrativa de que Einstein iniciou seu programa de forma independente visando uma teoria da geral foi endossada pelo próprio pesquisador em conferências e memórias, como por exemplo a conferência *How I created the theory of relativity* (EINSTEIN, 1982) e o livro *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* (EINSTEIN, 1917).

Lorentz sempre reconheceu a prioridade de Einstein na Teoria da Relatividade Geral. Em um pequeno livro publicado em 1919, *The Einstein Theory of Relativity: A Concise Statement*, Lorentz descreve os detalhes teóricos e as expedições que confirmaram a deflexão da luz no eclipse de 1919, atribuindo o mérito da relatividade geral (LORENTZ, 1919). Hilbert que também teve um papel fundamental na elaboração da relatividade geral (MEHRA, 1974) não é citado uma única vez. Conforme a afirmação de Kragh (2001), podemos dizer que a mudança de paradigma à respeito do papel de Einstein sobre a relatividade especial, afetou as conclusões posteriores de Lorentz. Observe que durante a conferência de 1927, Lorentz já estava com 74 anos completos e viria falecer no ano seguinte, antes de completar 75 anos. Nessa época Albert Einstein era mundialmente famoso, sendo uma das figuras mais populares da física e reconhecido até entre os leigos como “pai” da teoria da relatividade. Havia na nova geração de físicos um grande número de físicos que celebravam Einstein como descobridor da relatividade, incluindo o físico francês Louis de Broglie (AUFFRAY, 1998). Esses fatos, mais um possível agravamento da memória devido à idade e o esquecimento de Poincaré pela sua morte prematura em 1912, provavelmente foram fatores que colaboraram para mudança da concepção de Lorentz sobre o papel de Einstein na relatividade especial e a omissão de Poincaré.

Por fim analisemos o que Einstein dizia a respeito da teoria da relatividade. Diferente de Poincaré e Lorentz, Einstein nunca abnegou a prioridade da teoria da relatividade. Em seus escritos não técnicos e conferências ele sempre se atribuiu o mérito de ter criado a relatividade. Em 1922, ele deu uma conferência intitulada *How I created the theory of relativity* (EINSTEIN, ONO, 1982). Em duas Notas Autobiográficas ele

descreve que aos 16 anos ele teve o primeiro *insight* da relatividade ao se imaginar perseguindo um raio de luz à velocidade da luz (EINSTEIN, 1949). Essa história, apesar de ser relatada pelo próprio Einstein, é falsa e não era essencial para desenvolver a relatividade (MARTINS, 2015). Em uma carta escrita à Carl Seelig, dois meses antes de seu óbito, Einstein faz um breve comentário sobre a gênese da teoria da relatividade.

Não há dúvida de que a teoria da relatividade especial, se considerarmos seu desenvolvimento em retrospecto, estava pronta para ser descoberta em 1905. Lorentz já havia observado que, para a análise das equações de Maxwell, as transformações que mais tarde seriam conhecidas por seu nome são essenciais e Poincaré penetrara ainda mais fundo nessas conexões. Preocupando-me, conheci apenas o importante trabalho de Lorentz de 1895 - "La Theorie Electromagnétique de Maxwell" e "Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern" - mas não o trabalho posterior de Lorentz, nem as investigações consecutivas de Poincaré. Nesse sentido, meu trabalho de 1905 foi independente. A novidade disso foi a constatação do fato de que a influência da transformação de Lorentz transcendia sua conexão com as equações de Maxwell e se referia à natureza do espaço e do tempo em geral. Um outro resultado novo foi que a "importância de Lorentz" é uma condição geral para qualquer teoria física. Isso foi para mim de particular importância porque eu já havia descoberto anteriormente que a teoria de Maxwell não explicava a microestrutura da radiação e, portanto, não tinha validade. (EINSTEIN, 1955)

O relato que Einstein apresenta contém diversas inconsistências: as datas dos trabalhos de Lorentz são 1892 e 1895. Einstein conhecia pelo menos *A Ciência e a Hipótese* de Henri Poincaré (SOLOVINE, 2011), e há fortes indícios que ele conhecia *O Valor da Ciência* (GIANNETTO, 1999). Keswani (1965) ainda sustenta que Einstein teve acesso ao *memoir* de Lorentz de 1904. Auffray (1998) não descarta a hipótese que Einstein tenha lido a versão de 1905 de "*Sur la dynamique de l'électron*" de Poincaré. Holton (1965-1966) mostrou que o livro de divulgação da ciência de August Föpl teve uma forte influência sobre Einstein. Além disso, sabemos que Einstein também estudou o artigo de Voigt sobre o Efeito Doppler em 1901 (AUFRAY, 1998). Em outras palavras, de forma alguma podemos aceitar a afirmação de Einstein de que seu programa foi desenvolvido de forma independente.

Sobre estas inconsistências, Abraham Pais (1992) tentou justificar dizendo que Einstein já estava velho e sofria com os prejuízos da memória. Porém, em uma conferência de 1922, intitulada *How I created the theory of relativity*, reproduzida por Ono em 1982, Einstein enfatiza o papel da experiência de Michelson-Morley, da teoria de Maxwell e das contribuições de Lorentz. Mais uma vez, ele não faz qualquer menção

à Poincaré. O que explicaria essa atitude de Einstein? Possivelmente um conflito de prioridade. Segundo Kragh (2001, p. 167):

O cientista pode ter motivos para apresentar as suas ações de modo diferente do sucedido. Em relação a conflito de prioridade, por exemplo, poderia sobrestimar, consciente ou inconscientemente, a sua própria contribuição, alterar datas ou, de qualquer outra forma, suprimir uma realidade que ele pudesse ter desejado ser diferente.

Esse parece ser o caso de Einstein em relação à Poincaré. À favor dessa hipótese podemos citar que Einstein declarou que se ele não tivesse descoberto a teoria da relatividade, muito provavelmente Paul Langevin teria o feito algum tempo depois (HOLTON, 1979). De fato, Langevin deu diversas contribuições a teoria da relatividade e participou de sua gênese, porém, Langevin sempre pontuou a colaboração de Poincaré que, como mostramos, antecipou e foi além dos vários resultados de Einstein. Se Einstein conhecia tão bem o trabalho de Langevin, ele estava ciente da contribuição de Poincaré e pela sua carta a Seelig, fica implícito que ele conhecia alguns dos trabalhos técnicos de Poincaré. Diante este fato, fica a dúvida se a atitude de Einstein em não reconhecer o mérito de Poincaré era um ato consciente ou um reflexo inconsciente.

7.14. Algumas Considerações Sobre o Período “Pós Teoria da Relatividade Especial”

Vimos que a teoria da relatividade especial alcançou seu auge em 1905, principalmente com os trabalhos de Poincaré sobre o *memoir* de 1904 de Lorentz. Nessa época Einstein publicou seu *paper* que teve pouco impacto, mas posteriormente se tornaria para o senso comum o trabalho inaugural da relatividade especial. Nesta seção iremos analisar quais foram as contribuições posteriores de Lorentz, Poincaré e Einstein. Para tornar a análise mais circunscrita, tomaremos o período de 1906 até 1912, ano da morte de Henri Poincaré.

Após o trabalho de Poincaré, de 1905, que parecia resolver de uma vez o problema da covariância das equações do eletromagnetismo, Lorentz passou a se dedicar a problemas de eletrônica, de interação radiação e matéria e de termodinâmica. Ele também estudou a relação massa e energia em três momentos distintos, confirmando que luz carrega uma massa maupertusiana e a massa de um sistema fechado sem tensões é proporcional ao seu conteúdo energético.

Depois de 1905, Poincaré deixou uma promessa em sua versão estendida de *Sur La Dynamique de l'électron*: ampliar as discussões sobre a teoria relativística da gravitação (POINCARÉ, 1906). Infelizmente Poincaré não cumpriu essa promessa e não publicou mais nenhum artigo sobre gravitação depois de 1906. Para sermos justos, Poincaré abordou esse assunto em suas aulas em Sorbonne (WALTER, 2007). Nessa ocasião Poincaré fez cálculos para determinar o avanço do periélio de Mercúrio obtendo um avanço de 7" por século, enquanto o valor experimental 42" por século (WALTER, 2007). Poincaré não viu essa diferença como um objeção, já que ele admitia a hipótese de Seeliger que deveria existir uma distribuição de poeira do zodíaco ao redor de mercúrio que seria responsável pelo avanço do periélio.

Em 1911, De Sitter, realizou medidas bastante precisas e concluiu que a teoria de Poincaré era consistente com essas medidas (DE SITTER, 1911). Infelizmente o programa de Poincaré de gravitação relativística não progrediu, em grande parte porque ele não se baseava em uma teoria do campo (WALTER, 2007). Nessa época, um novo programa de gravitação começava a surgir baseado no formalismo tensorial introduzido por Minkowski. Infelizmente em 1912, Poincaré veio a óbito devido a complicações de sua próstata. Assim podemos apenas especular qual seria a atitude de Poincaré diante esse novo avanço na física.

Outra contribuição de Poincaré fora os elipsoides de luz. Essa contribuição também apareceu em aulas que Poincaré ministrou na Sourbone, a partir de 1906, e só foram descobertas recentemente (WALTER, 2007). A ideia básica de Poincaré que se um objeto se movimenta em relação a uma esfera de luz, a distância começa a variar e a esfera se deformaria em um elipsoide. Basicamente Poincaré estuda as propriedades geométricas e obtém as equação de Lorentz e regras para analisar o comprimento e o período de relógios (WALTER, 2007). Parte destes resultados forma publicados em "*La Dynimque de électron*" (POINCARÉ, 1908a) onde é feito um resumo histórico dos trabalhos de 1905, "*Sur la dynamique de l'électron*". Esse artigo foi publicado parcialmente no livro de Poincaré "*Science et Method*" em 1908. Poincaré ainda escreveria ensaios e conferências sobre a nova mecânica e o atual estado do eletromagnetismo, mas não apresentaria nenhuma investigação nova em relatividade. Podemos concluir que nestes oito anos tanto Poincaré, quanto Lorentz, estavam satisfeitos com a descoberta da teoria da relatividade e suas implicações. Seria o caso da nova geração de físicos dar continuidade. Abraham, Thomson, Searle, Lorentz, Poincaré, Planck, Bucherer, Langevin, Einstein e outros,

definiram a base, agora os que viessem teriam como objetivo desenvolver a superestrutura.

Se Lorentz e Poincaré podiam se gabar de ter chegado ao auge de sua abordagem, após 10 anos de trabalho intenso, a situação não é a mesma para Albert Einstein. Como vimos, o artigo de Einstein apresentava diversos erros graves, e resultados que podemos dizer que estão corretos, porque haviam sido obtidos antes de Einstein. A abordagem de Einstein era promissora, era muito mais simples que a abordagem de Lorentz e Poincaré, tornava o éter opcional, e revelava algumas consequências importantes sobre a natureza do espaço e do tempo, que nos trabalhos de Poincaré exigiam um esforço a mais para serem entendidas.

O grande problema de Einstein não era sua abordagem, mas como ele a desenvolveu. As escolhas dos argumentos de simetria e algumas manipulações algébricas são inconsistentes e comprometem a validade dos resultados (KESWANI, 1965, MEHRA, 2001, LOGUNOV, 2004). Na cinemática, os erros foram minimizados porque muitas vezes Einstein está fazendo uma análise que seria válida para um observador parado no éter, uma vez que a teoria com éter é equivalente a teoria sem éter, o resultado final é preservado. Acontece que essa análise é inconsistente, pois como não há éter na sua teoria, onde ele está efetuando as medidas? A segunda parte do trabalho, Eletrodinâmica, precisaria de uma ampla revisão. Hipótese em desacordo com as convenções assumidas na primeira parte. O uso incorreto da força de Lorentz, o enunciado incorreto das equações de Maxwell. O próprio Einstein violando as regras de análise e obtendo regras erradas como da massa transversal (MILLER, 1997, CULLWICK, 1981, KESWANI, 1965, LOGUNOV, 2004). Fora a objeção de Ives sobre a relação $E = mc^2$.

Seria sensato que Einstein nos próximos anos fizesse uma nota de esclarecimento ou apresentasse uma versão corrigida, com alguns comentário. Infelizmente ele nunca fez. Em 1907, ele lançou três artigos, um que ele estuda a compatibilidade dos raios do canal com princípio da relatividade (EINSTEIN, 1907a), outro que ele estuda a relação massa energia (EINSTEIN, 1907b) e um onde ele faz uma síntese da relatividade (EINSTEIN, 1907c). Nesse último artigo, Einstein não comenta seus erros no *paper* de 1905 e ainda introduz a relação entalpia-massa deduzida por Planck em 1906, sem fazer qualquer referência ao autor. O artigo tinha vários erros e no ano seguinte ele redigiu uma errata. Porém o artigo de 1905, continuou da mesma forma, sem errata. Nos próximos anos Einstein se dedicaria a teoria quântica, dando esporadicamente aulas de relatividade e artigos de revisão.

7.15. História da Relatividade Especial como Contra-Argumento À Visão Radicalmente Internalista Da Ciência

Neste ponto podemos concordar com Katzir (2005a) de que o desenvolvimento da relatividade de Lorentz e Poincaré era mais coerente e mais completo que o proposto por Einstein. Da perspectiva internalista da ciência, que afirma que o desenvolvimento e a construção do conhecimento científico não dependem de fatores externos, seria esperado que a abordagem de Einstein fosse rejeitada e os pesquisadores adotassem a abordagem de Poincaré e Lorentz. Contudo, 114 anos depois do auge da Teoria da Relatividade Especial, nós sabemos que o prognóstico internalista não se cumpriu. É um senso comum, entre leigos e cientistas, que em 1905, Albert Einstein criou a relatividade especial. Esse senso comum só se tornou possível com a marginalização dos trabalhos de Lorentz e Poincaré e a centralização da abordagem de Einstein. Por que isso ocorreu? Um comentário de Laue contém uma pista importante para responder nossa pergunta:

É impossível decidir, por via experimental, entre a teoria de Lorentz e a teoria da relatividade. O fato de, apesar disso, a primeira haver recuado para o segundo plano deve-se sobre tudo a que, por mais que ela se aproxime da teoria da relatividade, ainda lhe falta o grande princípio universal e simples que confere à teoria da relatividade [...] um aspecto imponente. (LAUE, 1911).

Martins (2005a, 2015), Keswani (1965), Darrigol (1996), Auffray (1998), Jammer (2010) entre outros historiadores da relatividade, concordam que a simplicidade da abordagem de Einstein foi uma das principais razões para sua posterior adoção. Podemos concluir que a escolha foi feita pela comodidade e não por uma lógica interna rigorosa, mesmo porque a simplicidade de Einstein estava rodeada de incoerências. Essa observação nos leva a uma outra pergunta: como explicar como uma abordagem desenvolvida com tantas inconsistências poderia ser aceita como padrão para a teoria da relatividade especial? Seria necessário empreender um exame histórico mais minucioso sobre essa a aceitação da relatividade de Einstein entre 1905-1922.

Nossa hipótese é que como o artigo de Einstein teve pouca repercussão e repetia essencialmente resultados de Lorentz e Poincaré, ninguém se preocupou em fazer uma análise pormenorizada. E há um fato que corrobora essa tese: o *paper* de Einstein foi avaliado e aprovado para publicação por Max Planck (CULLWICK, 1981). O único ponto que Einstein claramente divergia da análise de Lorentz e Poincaré era no valor da massa transversal do elétron, que como se sabe, deve-se a um erro na análise de Einstein. Em

sua avaliação Planck não prestou atenção nesse erro, ele só viria a criticar e corrigir Einstein no ano seguinte (MARTINS, 2015). Podemos conjecturar que os principais pesquisadores também não analisaram minuciosamente o *paper* de Einstein, dando atenção as ponderações e aos resultados e não ao modo como eles foram obtidos. Portanto, só quando a relatividade de Einstein já havia se tornado uma tradição científica os acadêmicos.

Essa breve reflexão mostra que a natureza da ciência é bastante complexa, não podendo ser explicada como um produto derivado da aplicação algorítmica do “método científico”. Nossa conclusão converge com os estudos sobre a natureza da ciência (*cf* MCCOMAS, 1996, GIL-PEREZ *et al*, 2001, EL-HANI, 2006, BAGDONAS, SILVA, 2013, BAGDONAS, ZANETIC, GURGEL, 2012, 2014)

7.16. Explicando as Semelhanças na Abordagem de Poincaré e Einstein pela Perspectiva Fleckiana

Embora Poincaré e Einstein discordem sobre o papel do éter e de entidades metafísicas na construção das teorias físicas, as duas teorias são epistemologicamente equivalentes e muito semelhantes. Tanto Poincaré quanto Einstein desenvolvem sua abordagem no processo de sincronização de relógios e o papel da medida do tempo e do espaço e no princípio da relatividade. Quando analisamos o cenário que deu origem a Relatividade percebemos que alguns elementos da relatividade pairavam no ar: os físicos alemães fenomenológicos como Cohen e Bucherer já defendiam a rejeição do éter (DARRIGOL, 1995) e a eletrodinâmica dos corpos em movimento era um assunto bastante difundido entre físicos teóricos (KESWANI, 1965a, 1965b), porém esses fatos por si só não explicam a semelhança entre abordagem de Poincaré e Einstein. Poincaré desenvolveu uma análise original baseada em sua experiência com a medida da geodésica e da longitude. Nenhum pesquisador, salvo Einstein, adotou a abordagem de Poincaré.

Keswani (1965a, 1965b), Goldenberg (1966), Miller (1973, 1997), Darrigol (1995, 1996, 2003), Giannetto (1999) e, mais recentemente, Galison (2003) e Logunov (2004) tem fornecidos explicações sobre até que ponto os trabalhos de Poincaré influenciaram Einstein e as possíveis razões para a semelhança entre as duas abordagens. Keswani, Giannetto, Darrigol e Logunov defendem que Einstein foi influenciado pelo trabalho de Poincaré e pela visão fenomenológica. Tendo combinado essas duas abordagens, ele apresentou uma teoria baseada no princípio da relatividade e na sincronização de relógios

que excluía entidades não físicas, como o éter e o espaço absoluto, e apenas se fiava em processos de medida (GALISON, 2003).

Do ponto de vista histórico, essa tese é consistente com as fontes primárias e foi confirmada por novos documentos e cartas de Einstein. Porém, do ponto de vista epistemológico ainda há lacunas a serem preenchidas. Nessa seção pretendemos esclarecer uma delas. Antes de introduzirmos a questão norteadora, permita-nos fazer uma pequena digressão. Poincaré foi um dos autores mais produtivos de sua época. Uma das características mais marcantes de Poincaré era sua capacidade de analisar um problema em um amplo espectro de disciplinas. Por exemplo, Galison (2003) aponta que a análise da estabilidade do sistema solar, que levaria a redundância de Poincaré, um dos conceitos fundamentais da Teoria do Caos, baseou-se em analogia das órbitas planetárias com a coordenação de mapas de minas de carvão. Embora Poincaré nunca tenha orientado alunos e nem participado de grupos de pesquisa, era um autor que mantinha contato com os mais importantes pesquisadores de sua época. Seus livros de divulgação científica, *A Ciência e a Hipótese* (1902), *O Valor da Ciência* (1905) e *A Ciência e o Método* (1907) foram traduzidos para os principais idiomas europeus e eram bastante difundidos entre os círculos esotéricos e exotéricos (GALISON, 2003). Em 1904, Poincaré foi convidado para fazer parte da comitiva francesa para falar de seus avanços no campo das equações diferenciais parciais e da nova mecânica (aquilo que viria a se tornar a teoria da relatividade) na conferência de Saint Louis no Mississippi (DARRIGOL, 1995). Martins (2015) ressalta o quão difícil é resumir as conquistas científicas de Poincaré em vida. O que queremos apontar é o fato de que no período de 1895-1905, Poincaré era um dos pesquisadores mais renomados do mundo, mantendo boa relação com seus pares. A questão que surge é: “por que as ideias de Poincaré sobre a nova mecânica germinaram principalmente em Einstein?”

Sabemos que Poincaré e Lorentz mantiveram contato muito próximo. Infelizmente, uma parte da correspondência trocada entre Lorentz e Poincaré não foi preservada (ou ainda se encontra inacessível). Porém lendo os trabalhos de Lorentz e Poincaré, principalmente o discurso de Lorentz de 1912, mas apenas publicado em 1921, intitulado “Dois Artigos de Henri Poincaré” fica claro que apesar do grande apreço de Lorentz por Poincaré, ele não estava convencido do potencial heurístico do princípio da relatividade e não considerou o problema da sincronização de relógios como uma parte fundamental de sua eletrodinâmica. Mesmo Paul Langevin, que foi aluno de Poincaré na École du Sorbonne, adotou uma abordagem diferenciada. Então, por que Einstein, um aluno da

Politécnica de Zurique se mostrou como catalisador eficiente para a expansão do círculo esotérico do princípio da relatividade e da sincronização de relógios de Poincaré? Segundo Fleck (1986) o fato social é uma das componentes fundamentais na transformação dos estilos e coletivos de pensamento e na expansão dos círculos esotéricos.

De todos os atores que se destacam no desenvolvimento da Teoria da Relatividade, Einstein era o que mais se aproximava de Poincaré (GALISON, 2003). Diferente da maioria de seus colegas da faculdade, Einstein não conseguiu seguir, inicialmente a carreira acadêmica. Acredita-se que seu professor W. Weber teria escrito cartas de não-recomendação sobre Einstein a diversos pesquisadores (MARTINS, 2015). A situação de Einstein se viu agravada com a gravidez não planejada de sua namorada Mileva Maric. Embora Einstein nunca tenha conhecido a sua primeira filha, Lieserl, e o destino da criança permaneça um mistério, a família de Mileva pressionou o casamento do casal (MARTINS, 2015). Einstein abandonou, por hora, as pretensões acadêmicas e passou a procurar um emprego como professor de física e matemática, tendo conseguido aulas temporárias. Posteriormente, graças a indicação de seu colega Marcel Grossmann, Einstein foi admitido no escritório de patentes de Berna, Suíça. O escritório de Patentes está para Einstein como o Bureau des Longitudes está para Poincaré. O trabalho de um analista de patentes envolvia uma certa dose de burocracia e bastante conhecimento técnico. O período em que Einstein trabalhou como analista, foi um período em que a Suíça estava investindo pesado em redes de sincronização de relógios, pode-se dizer que a fama dos suíços com a medida do tempo e na confecção de relógios teve sua origem nessa época (GALISON, 2003). Nessa ocasião, Einstein recebeu diversos pedidos de patentes envolvendo redes de coordenação de relógios. GALISON (2003, p. 246-248) descreve alguns dos projetos registrados no período que Einstein era funcionário do escritório de patentes.

As tecnologias do tempo dividiram as patentes em todos os setores da rede: patentes de geradores de baixa voltagem, patentes de receptores eletromagnéticos com seus escapes e armaduras, patentes de interruptores de contato. Bastante típico do tipo de trabalho eletrocronométrico que floresceu na década após 1900 foi o novo receptor do coronel David Perret que detectaria e usaria um sinal cronométrico de corrente contínua para conduzir uma armadura oscilante. Foi emitida a patente suíça número 30351 em 12 de março de 1904. O próprio receptor de Favarger fez o oposto: pegou uma corrente alternada do relógio da mãe e transformou-a no movimento unidirecional de uma roda dentada. A solicitação desta patente - mais tarde usada amplamente - foi carimbada como “recebida” em 25 de

novembro de 1902 e emitida em 2 de maio de 1905 após um longo, mas não totalmente incomum, período de avaliação. Havia patentes que especificavam sistemas de relógios para ativar alarmes colocados remotamente, enquanto outras submissões visavam a distante regulação eletromagnética de pendula. Havia propostas de tempo para viajar por linhas telefônicas - até mesmo sistemas que enviavam o tempo via wireless. Outras patentes avançaram esquemas para monitorar partidas e chegadas de ferrovias ou para exibir a hora em diferentes fusos horários. Outros, porém, especificaram como os relógios elétricos remotamente acionados poderiam ser protegidos da eletricidade atmosférica ou como os sinais de tempo eletromagnéticos poderiam ser silenciosamente recebidos. Uma cascata de tempo coordenado. Algumas dessas patentes abordaram sistematicamente o problema de distribuir a simultaneidade. A patente 27555 de Perret chegou às 5:30 da tarde em 7 de novembro de 1902 (emitida em 1903), oferecendo “Uma Instalação Elétrica para a Transmissão do Tempo”; Perret apresentou uma proposta semelhante em 1904. O Sr. L. Agostinelli, solicitando a Terni (patente 29073, de 1904) propôs uma “Instalação com Relógio Central para Indicar o Tempo Simultaneamente em Diversos Locais Separados Um do Outro, e com Sinos para Chamar Automaticamente em Tempos predeterminados”. Havia pedidos de patentes de grandes empresas elétricas como a Siemens (“Motherclock Relay”, número 29980, emitida em 1904) e patentes de empresas suíças menores, mas ainda importantes como Magneta (patente 29325, de 11 de novembro de 1903) que fabricava os relógios remotamente criados no Edifício do Parlamento Federal em Berna. [...] De Nova York, Estocolmo, Suécia, Londres e Paris, os inventores lançaram seus sonhos de tempo em direção ao escritório de patentes, mas foi a indústria relojoeira suíça que dominou o comércio.

Registre também que o escritório de patentes também participava do ambicioso projeto em Berna da criação de uma rede de relógios sincronizadas por mecanismos eletromagnéticos (GALISON, 2003). Em outras palavras, a questão do tempo preenchia todo entorno de Einstein.



FIGURA 4. “Rede elétrica do relógio de Berna (por volta de 1905). Os relógios elétricos coordenados eram uma questão de importância prática e orgulho cultural. Em 1905, eles eram uma peça proeminente da moderna paisagem urbana em toda a cidade de Berna.” (GALISON, 2003, p. 245)

Assim como Poincaré, Einstein começou a desenvolver conexões ativas ao realizar circulações intercoletivas entre o círculo esotérico entre os problemas técnicos da medida do tempo e o círculo esotérico da mecânica e do eletromagnetismo. Outra conexão ativa na formação de Einstein está sua formação epistemológica. Entre 1902-1905, a casa de Einstein foi sede da Academia Olympica, um grupo de discussão sobre problemas epistemológicos composto por Einstein e seus colegas Conrad Habicht e Maurice Solovine. Entre os livros estudados e debatidos pelo grupo encontram-se *A Ciência e a Hipótese* de Poincaré, as obras de Mach, Hume e os empiristas alemães (GALISON, 2003). O engenheiro Michele Beeso, amigo íntimo de Einstein e colega de trabalho no escritório de patentes, também foi uma importante conexão ativa, sendo citado no ensaio de 1905 de Einstein sobre a relatividade. Beeso e Einstein discutiam sobre as questões do tempo e Beeso, que tinha uma tendência fenomenológica e operacionalista, foi de grande incentivo na rejeição do éter e outras entidades metafísicas, como podemos ver na declaração de Fölsing:

Em suas discussões, Einstein e Beeso descobriram alguns aspectos do processo de sincronização de Poincaré que podem ter escapado do próprio Poincaré. Como seria - os dois amigos, céticos sobre o "tempo real", poderiam ter perguntado - se o tempo definido pelo experimento de Poincaré não era apenas um artifício matemático para o "horário local" de Lorentz, mas de fato tudo que um físico poderia esperar de um conceito significativo? É certo que isso daria um "tempo" diferente para cada sistema inercial, mas a constância da velocidade da luz para qualquer observador seria, nesse caso, inerente à definição de simultaneidade de Poincaré e não teria, como com Lorentz, que ser trazida à força por um ajustamento laborioso para a teoria (FÖLSING, 1997, p. 176-177).

Vejamos também que os círculos esotéricos que Einstein pertencia eram também mais modestos que os de Poincaré. O estudo de Pyenson (1983) sobre a educação de Einstein revela que inicialmente ele pretendia se dedicar a matemática, porém durante a graduação, Einstein se desapontou com a matemática, chegando ao ponto de declarar que o físico deveria se limitar aos conceitos mais básicos. É claro que durante o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral, Einstein mudaria de ideia (MEHRA, 1974). Essa aversão de Einstein pela matemática fez com que ele desenvolvesse uma grande intuição física e investisse naquilo que o próprio Einstein chamava de método heurístico (MEHRA, 1974). Por outro lado, essa carência impediu que Einstein deduzisse o grupo de Lorentz, os invariantes 4-dimensionais e a estrutura do espaço-tempo. De fato, o próprio Einstein criticou o trabalho de Minkowski por seu formalismo exagerado e que exigia demais do leitor (MEHRA, 1974).

Einstein também não tinha familiaridade com mecânica celeste e astronomia. Essa é a provável razão de Einstein não ter se preocupado em seu ensaio de 1905, com o problema da transmissão de sinais usando a gravidade, diferente de Poincaré. E enquanto Poincaré derivava a constância e a invariância da velocidade da luz das observações astronômicas, pode-se dizer que a adoção do segundo postulado de Einstein foi uma questão de comodidade. O problema da invariância da forma da onda luminosa e da velocidade da luz já havia sido estudada por W. Voigt e Einstein estava familiarizado com esses trabalhos (AUFRAY, 1998). Além disso, Einstein havia trabalhado com a teoria da emissão de Ritz onde a velocidade da luz depende da velocidade relativa da fonte emissora (DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005). Os estudos de Einstein o levaram a expressões muito complicadas, o que acabaram fazendo com que ele desistisse de seguir adiante com esse modelo (DARRIGOL, 1995, 1996, 2003, 2004, 2005). Portanto, essa experiência com Voigt e com a Teoria da Emissão forneceram outra conexão ativa que levaram a Einstein enunciar o seu segundo postulado, a constância da velocidade da luz. O objetivo de Einstein seria evitar resultados complexos que se tornariam uma barreira no progresso de sua relatividade.

Assim, concordamos com Galison (2003) e vemos que o núcleo da relatividade ocorreu devido à circulação intercoletiva do problema da coordenação de relógios, a natureza física e epistemológica do tempo. A análise fleckiana permite também explicar porque o progresso de Poincaré foi superior ao de Einstein: o número de círculos esotéricos de Poincaré era muito maior que o de Einstein. Porém, o campo social de Einstein, uma Alemanha que pretendia expandir sua cultura científica e criar uma tradição que superasse a dos ingleses, criaram um terreno propício para expansão do círculo esotérico de Einstein, diferente de Poincaré que estava imersa em uma França conservadora cujos interesses não incluíam relatividade (WALTER, 2011).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando estudamos a história sincrônica e diacrônica da teoria da relatividade, descobrimos que a concepção ingênua de Einstein como pai da relatividade é um mito e como nos alerta Rubem Alves (1993) todo o mito é perigoso. O que essa investigação nos ensinou? Em primeiro lugar que a Teoria da Relatividade foi uma construção coletiva que exigiu uma circulação de ideias em diferentes coletivos de pensamento, a saber: matemática, geometria⁵⁴, astronomia, geociências, física, filosofia, engenharia. Os primeiros problemas que Poincaré teve que lidar eram questões técnicas das geociências sobre o uso do telégrafo sem fio⁵⁵ para a coordenação de relógios, para a determinação da longitude, e a medida do espaço, para a determinação da geodésica francesa. Ao refletir sobre a ontologia desses conceitos, Poincaré realizou uma circulação intercoletiva de ideias com coletivos de pensamento da matemática, da geometria, da filosofia (metafísica), da astronomia (ao considerar distâncias tão grandes que a finitude da velocidade da luz não pode ser ignorada), da engenharia e da física.

Ao interagir com o coletivo dos físicos, Poincaré descobriu o efervescente debate sobre a teoria eletromagnética e as tentativas de medir a velocidade da Terra em relação ao éter. Lorentz e Larmor haviam descoberto transformações para o tempo e para os campos eletromagnéticos que explicavam matematicamente, até a primeira ordem, a ausência de efeitos do movimento na Terra em relação ao éter, mas eram incapazes de fornecer uma interpretação física, dentro do estilo de pensamento mecânico.

Aí reside a razão subjacente da impossibilidade em que os físicos se encontravam, apesar dos esforços poderosos e prolongados dos mais ilustres deles, para fornecer uma interpretação mecânica dos fenômenos elétricos e ópticos. A partir de equações que são conservadas para o grupo de Galileu, como as da mecânica, é impossível, por combinação analítica, deduzir leis que, como as do eletromagnetismo, são preservadas para as transformações do grupo de Lorentz. (LANGEVIN, 1922, p. 20-21)

Contudo Poincaré, já havia resolvido essa questão enquanto investigava a natureza do tempo e da simultaneidade. Tendo posto de lado as leis da mecânica comum, e admitindo uma nova mecânica onde a velocidade da luz era isotrópica e finita, Poincaré

⁵⁴ Na época em que a teoria da relatividade especial foi construída existiam divergências se a geometria seria parte da matemática ou uma ciência do espaço. Essas questões são discutidas por Poincaré em *La Science et l'Hypothèse* (POINCARÉ, 1902a) e o *La Valeur de la Science* (POINCARÉ, 1905a).

⁵⁵ Para uma breve descrição das contribuições de Poincaré para a telegrafia ver a quinta parte do ensaio *Henri Poincaré, le physicien* (LANGEVIN, 1913a).

foi levado a rejeitar a cinemática física e aceitar a cinemática dos engenheiros, dos eletricitistas:

A cinemática comum não pode interpretar a natureza relativa das leis do eletromagnetismo e da óptica. Obriga os observadores terrestres, se quiserem levar em conta a mudança contínua de sua velocidade relativa, a modificar constantemente e a tomar de forma complicada as leis do eletromagnetismo, e isso em oposição aos fatos que traduzem essas equações exatamente sob sua forma simples usual graças à introdução do tempo relativo. Isso equivale novamente a dizer que o tempo, introduzido inconscientemente pelos fundadores do eletromagnetismo e com eles por todos os eletricitistas quando eles usam as leis básicas de Maxwell-Hertz em sua forma comum a todo momento, não é outro que o tempo relativo cuja medida varia de acordo com os observadores de acordo com as transformações [de Lorentz] A cinemática em conformidade com essas relações é a cinemática dos eletricitistas, e a como definida por é a da mecânica; a diferença resulta do fato de que as equações do eletromagnetismo mantêm sua forma para as transformações do grupo de Lorentz, enquanto as da mecânica mantêm a sua para as transformações do grupo de Galileu. (LANGEVIN, 1922, p. 20)

Essa análise também trouxe outra consequência (conexão passiva): era necessário abandonar o conceito de simultaneidade e tempo absoluto.

A essa observação corresponde o fato de que a velocidade da luz no vácuo V desempenha para a nova cinemática o papel que a velocidade infinita desempenha para a cinemática comum. Um pouco de atenção mostra que essa diferença tem origem na própria definição do conceito de tempo e na simultaneidade de eventos distantes no espaço. A noção de tempo absoluto e de simultaneidade independente do sistema de referência só teria significado experimental se tivéssemos meios de sinalizar instantaneamente à distância, na forma de ondas propagando com velocidade infinita, de móveis em movimento movendo-se com uma velocidade infinita, ou por meio do fio inextensível ou do sólido invariável que pode ser acionado simultaneamente em todos os seus pontos, ou seja, no qual as deformações se propagam com uma velocidade infinita. Essas várias noções, tempo absoluto e simultaneidade, propagação instantânea à distância, sólido invariável, estão assim conectadas e caracterizam a mecânica racional do ponto de vista cinemático. Ao contrário, admitir que a luz se propaga com a mesma velocidade em todas as direções para todos os sistemas de referência significa dizer que em cada um desses sistemas a correspondência de tempos em pontos diferentes, a sincronização de relógios, é realizada por meios sinais de luz ou eletromagnéticos (ondas de telégrafo sem fio) que se propagam a uma velocidade finita, a da luz. O tempo usado por cada grupo de observadores é, portanto, o tempo óptico ou eletromagnético, e a velocidade da luz, que intervém na própria definição de tempo, desempenha, assim, um papel particular que explica sua introdução nas fórmulas de transformações [de Lorentz] permitindo passar de um sistema de referência para outro (LANGEVIN, 1922, p. 21-22)

Poincaré apresentou todas essas ideias foram de maneira clara em seu ensaio *Sobre a Medida do Tempo* de 1898. Portanto, quando Poincaré começou a ler os trabalhos de Lorentz, Larmor, Hertz e outros pesquisadores, sua experiência forneceu uma imagem clara, em uma leitura fleckiana, uma Gestalt, para o que estava ocorrendo: o tempo local de Lorentz, era o tempo óptico dos operadores de telégrafo sem fio, as transformações de Lorentz e Larmor, eram o resultado da coordenação de relógios usando sinais ópticos, tais como fazem os operadores de telégrafo sem fio.

Também testemunhamos o processo de mudança e instauração de um novo estilo de pensamento. No começo do século XIX, o estilo de pensamento ortodoxo na física era o mecânico (LANGEVIN, 1922, 1922b, HIROSIGE, 1969, 1976, DARRIGOL, 1995, 1996). Os trabalhos de Kelvin, Thompson, Maxwell tentavam desenvolver uma interpretação mecânica do éter e do eletromagnetismo. Os alemães formavam um grupo heterodoxo, inclusive por razões políticas⁵⁶. Max Abraham propôs um novo estilo de pensamento, a substituição do estilo de pensamento mecânico (que era chamado de *mechanics worldview*) pelo estilo de pensamento eletromagnético (*eletromagnetic worldview*) (HIROSIGE, 1969, 1976, MILLER, 1973, 1986, 1997, DARRIGOL, 1995, 1996, 2004). Poincaré estava de acordo que o estilo de pensamento mecânico deveria ser substituído, por “uma mecânica inteiramente nova, que seria sobretudo caracterizada pelo fato de que nenhuma velocidade poderia ultrapassar a da luz” (POINCARÉ, 1904a). Essa nova mecânica era justamente a teoria da relatividade especial. Há dois fatos que diferenciam essa nova mecânica dos estilos de pensamento mecânico e do estilo de pensamento eletromagnético. O primeiro diz respeito ao grupo que caracteriza as suas cinemáticas:

Fica claro que o grupo completo pertencente à Mecânica Newtoniana é simplesmente o grupo G_c , com o valor de $c = \infty$. Nesse estado de coisas, e como G_c é matematicamente mais inteligível que G_∞ , um matemático pode, por um jogo livre de imaginação, se deparar com o pensamento de que os fenômenos naturais possuem uma invariância não apenas para o grupo G_∞ , mas de fato também para um grupo G_c , em que c é finito, mas extremamente grande em comparação com as unidades de medição usuais. Tal preconceito seria um triunfo extraordinário para a matemática pura. Ao mesmo tempo, observarei qual valor de c , essa invariância pode ser considerada conclusivamente verdadeira. Para c , substituiremos a velocidade da luz c no espaço livre. Para evitar falar do espaço ou do vácuo, podemos tomar essa quantidade como a razão entre as unidades de eletricidade eletrostática e eletromagnética.

⁵⁶ As teorias mecanicistas eram vistas como um sucesso da ciência britânica, os alemães (rivais históricos dos britânicos) eram mais céticos e críticos. (DARRIGOL, 2003), os alemães. Segrè (1984) também endossa essa visão.

Podemos formar uma ideia do caráter invariável da expressão para leis naturais para a transformação do grupo G_c da seguinte maneira. Da totalidade dos fenômenos naturais, podemos, por aproximações sucessivas mais altas, deduzir um sistema de coordenadas (x, y, z, t) ; por meio desse sistema de coordenadas, podemos representar os fenômenos de acordo com leis definidas. Este sistema de referência não é de forma alguma determinado exclusivamente pelos fenômenos. Podemos alterar o sistema de referência de qualquer maneira possível, correspondente à transformação de grupo G_c acima mencionada, mas as expressões para leis naturais não serão alteradas dessa maneira (MINKOWSKI, 1909, p. 04).

O segundo ponto foi adoção de uma concepção convencionalista da física. O estilo de pensamento eletromagnético é perfeitamente compatível com o grupo G_c (HIROSIGE, 1969, 1976, MILLER, 1973, 1986, 1997, DARRIGOL, 1995, 1996, 2004). Por outro lado os mecanicistas, também poderiam manter a harmonia das ilusões, fosse por uma concepção mais sofisticada as leis físicas:

É fácil ver também que, se queremos manter a noção de tempo absoluto e o grupo de Galileu que dela deriva, as equações do eletromagnetismo, pelo contrário, assumem formas diferentes para os observadores O e O' : as equações não mantêm sua forma para substituições do grupo de Galileu. A cinemática comum não pode interpretar a natureza relativa das leis do eletromagnetismo e da óptica. Obriga os observadores terrestres, se quiserem levar em conta a mudança contínua de sua velocidade relativa, a modificar constantemente e a tomar de forma complicada as leis do eletromagnetismo, e isso em oposição aos fatos que traduzem essas equações exatamente sob sua forma simples usual graças à introdução do tempo relativo. (LANGEVIN, 1922, p. 20)

Ou substituindo o grupo de Galileu G_∞ pelo grupo de Lorentz G_c e derivando uma nova mecânica, no sentido literal. Ao adotar o convencionalismo, Poincaré, bem como Einstein, Langevin e Minkowski, declaram que não existe uma visão de mundo privilegiada da física, a visão mecânica e a visão eletromagnética são equivalentes (HIROSIGE, 1969, 1976, MILLER, 1973, 1986, 1997, DARRIGOL, 1995, 1996, 2004). Não há sentido em escolher uma em detrimento de outra. Esse é um estilo de pensamento que Poincaré instaurou na geometria ao estudar as geometrias euclidianas e as geometrias não-euclidianas a partir do princípio que Poincaré chamou de Lei de Relatividade do Espaço. Ao traduzir a Lei da Relatividade para física, sobre o nome de Princípio da Relatividade, era natural que a distinção entre diferentes estilos de pensamento fosse eliminada. A instauração desse novo estilo de pensamento não foi imediatamente absorvida, tendo encontrado muita resistência, principalmente fora da Alemanha (WALTER, 2011). Sua aceitação começou na Alemanha, a partir de 1912, com a procura de uma nova teoria de gravitação (WALTER, 1999, 2007, 2008, 2011, 2014, 2019), e no

mundo a partir de 1919, com a “comprovação”⁵⁷ da relatividade geral e a propaganda de Eddington (MARTINS, 2015).

Esse novo estilo de pensamento, fundamentado no convencionalismo intrínseco do princípio da relatividade, implica que uma teoria da relatividade com ou sem éter, desenvolvida pelo método indutivo, dedutivo, positivismo, até mesmo pelo relativismo de Duhem, são equivalentes (MARTINS, 2005a). Podemos dizer que existe uma Teoria da Relatividade Especial e duas abordagens: a de Lorentz-Poincaré e a de Einstein, ambas apresentando as mesmas consequências lógicas (MARTINS, 2005a, MARTINS, 2012, MARTINS, 2015). Se não podemos decidir pela via experimental, podemos comparar como cada um dos atores desenvolveu sua abordagem. Essa é a segunda lição que aprendemos nessa pesquisa. Ao enumerarmos os principais resultados da teoria da relatividade e analisar como cada abordagem trabalhou nelas, descobrimos que apesar do abordagem de Lorentz e Poincaré ser mais complexa e menos clara, eles foram mais sucedidos que Einstein, por duas razões:

- i) As deduções não continham falácias lógicas e contradições.
- ii) Criaram o espaço-tempo, o grupo de Lorentz, as grandezas físicas quadrimensionais e o primeiro programa relativístico para a gravitação.

O desenvolvimento da abordagem de Lorentz e Poincaré foi feito ao longo de 10 anos. Nesse período, a abordagem dos dois pesquisadores sofreu críticas, modificações e a correção de erros. Quando Lorentz apresentou seu *memoir* em 1904 e Poincaré sua *Sur la Dynamique de l'électron* no ano seguinte, estes trabalhos representavam os frutos de uma teoria amadurecida. Sobre Einstein, pouco sabemos como ele trabalhou para desenvolver a teoria da relatividade. Há suspeitas que sua primeira mulher, Mileva Maric, possa ter colaborado (WALKER, 1989, 1990). Sabemos que ele discutia alguns detalhes com amigos próximos como Solovine, Habicht e, principalmente, Besso (DARRIGOL, 1996). Porém, antes de seu *paper* de 1905, Einstein nunca submeteu suas ideias sobre a relatividade a críticas acadêmicas e das autoridades (AUFRAY, 1998). Nesse sentido, podemos dizer que ele era um pesquisador individualista (no sentido de não pertencer a nenhum grupo de pesquisa), mas muito bem informado sobre as novidades de seu campo (MARTINS, 2015). Quando Einstein apresentou seu *paper*, ele não havia passado por uma correção criteriosa e por críticas dos pares. Tratava-se de uma teoria imatura (CULLWICK, 1983), mas com grande potencial por sua clareza e simplicidade (ZAHAR,

⁵⁷ Em aspas, pois esse episódio é controverso, como pode ser visto em Martins (2015) e Whittaker (1953).

1973). Nos dois anos seguintes (1906-1907), Einstein não se preocupou em fazer uma errata ou comentar suas imprecisões, ele simplesmente as ignorou e fundiu a teoria novos resultados obtidos por Planck sem ao menos menciona-lo (MARTINS, 2015). E a partir de 1907, Einstein deixou de dar ênfase a relatividade, trabalhando com aspectos quânticos da radiação e da matéria. Ele voltaria a se interessar pelo assunto em 1911, quando houve um pico de produções sobre relatividade (WALTER, 2001), mas o foco era outro: generalizar o princípio da relatividade (MEHRA, 1974). Desta vez Einstein, com a colaboração de Marcel Grossmann, participou ativamente do debate, publicando versões incompletas e inconsistentes, até conseguir a formulação correta das equações de campo em 25 de novembro de 1915, para então publicar seus resultados em 1916 (MEHRA, 1974).

Do ponto de vista sincrônico e diacrônico, em 1905, se fôssemos obrigados a escolher qual a melhor abordagem, sabendo que as duas são equivalentes do ponto de vista epistemológico, seríamos forçados a escolher a abordagem de Lorentz e Poincaré, pois seu desenvolvimento era muito mais coerente e completo, pois ia além dos resultados de Einstein, enquanto a abordagem de Einstein carecia de uma grande revisão, os resultados, ainda que corretos, não poderiam ser assumidos, pois foram obtidos por métodos incorretos. Poincaré analisou todas as possíveis críticas ao princípio da relatividade, inclusive a sincronização de relógios pelo uso de sinais gravitacionais. Ele modificou a lei da gravitação universal e propôs que a gravidade se propagaria como uma onda gravitacional à velocidade da luz (POINCARÉ, 1906). Einstein não abordou o problema da gravidade, portanto seu processo de sincronização de relógios estava sujeito a objeção, já que os sinais gravitacionais, sem as modificações de Poincaré, podem viajar mais rápido que a luz ou instantaneamente. Se adotarmos a posição mais tradicional da ciência que acredita na prioridade de teorias, esta pesquisa mostra que devemos concordar com Whittaker (1953) que a prioridade da Teoria da Relatividade Especial é de Lorentz e Poincaré, com contribuições de outros pesquisadores, incluindo Einstein. A nossa posição é de que não se deve estabelecer prioridade à teorias, exceto, talvez, em casos excepcionais. Concordamos com Martins (2015) que teorias são construções onde vários indivíduos colaboram como se fosse a construção de uma catedral medieval onde:

Um enorme número de pessoas colaborava na sua construção – desde as pessoas que cortavam blocos de pedra e produziam as colunas esculpidas, até os artistas que faziam os seus vitrais e as pinturas de suas paredes e teto. Ninguém pode ser considerado “autor” de uma dessas

catedrais. A elaboração de uma teoria científica é muito semelhante a esse processo. (MARTINS, 2015, p. 266)

Tomemos a posição tradicional ou tomemos a posição construtivista, devemos reconhecer a importância de Lorentz e Poincaré para teoria da relatividade. Nos livros didáticos e de divulgação científica, Lorentz, em geral, é colocado em um papel secundário, do cientista que criou uma hipótese mirabolante para salvar o éter (cf MARTINS, 1998b). Já Henri Poincaré na maioria das vezes é omitido. Mlodinow (2001) omite o papel de Poincaré na teoria da relatividade especial, mencionando-o apenas quando discute geometrias hiperbólicas como um matemático obscuro. Em conclusão, o desenvolvimento histórico da teoria da relatividade tem um grande débito com H. Lorentz e H. Poincaré que tem sido procrastinado e obscurecido por uma visão caricata e mistificada de A. Einstein. Já passamos da hora de reconhecermos a dívida histórica que temos com H. Lorentz e H. Poincaré e pagarmos colocando cada um desses pesquisadores em seus lugares com suas contribuições que foram necessárias ao que conhecemos hoje como teoria da relatividade

Sur la dynamique de l'électron (1905-1906) é um dos trabalhos mais importantes da história da física. Poincaré sempre viu suas contribuições para física como um complemento aos trabalhos de Lorentz (DAMOUR, 2017). Mas o que nossa análise revela que *Sur la dynamique de l'électron* é mais do que um complemento. É um trabalho com ideias originais e uma grande intuição física. O conhecimento matemático de Poincaré, especialmente de Teoria de Grupos e Álgebras de Lie, permitiu que ele descobrisse as simetrias ocultas no eletromagnetismo e fosse o pioneiro a explorar a ideia de uma variedade 4-dimensional onde espaço e tempo estão conectados pelo invariante (ou forma quadrática) $t^2 - x^2 - y^2 - z^2$. “Em conclusão, a nota de 5 de junho de 1905 de Poincaré anuncia avanços matemáticos e físicos importantes no que chamaríamos hoje de relatividade especial, eletrodinâmica relativista e gravitação relativista” (DAMOUR, 2017, p. 599). Podemos sintetizar as contribuições de Poincaré para a teoria da relatividade especial em 15 tópicos: sendo os dez primeiros referentes a resultados apresentados em *Sur la dynamique de l'électron*, e os demais em seus estudos anteriores. Registra-se que os cinco primeiros tópicos da lista foram indicados por Damour (2017):

- [1]. A lei relativista da adição de velocidades;
- [2]. A lagrangiana do elétron relativístico;
- [3]. A compreensão das transformações de Lorentz como "rotações" em um "espaço 4D " com coordenadas " $x, y, z, t\sqrt{-1}$ ", e o método de construção de invariantes;

- [4]. A álgebra de Lie do grupo de Lorentz [e as isometrias do espaço-tempo].
- [5]. Uma descrição mais explícita da classe de leis de forças gravitacionais relativisticamente invariantes, de ação à distância, entre duas massas (arbitrariamente móveis) e dos efeitos associados de propagação de “ondas gravitacionais” entre os corpos.
- [6]. A universalidade do princípio da relatividade para as leis da física
- [7]. As pressões (tensões) de Poincaré de natureza não eletromagnética
- [8]. A invariância das equações de Maxwell para o gauge de Lorentz
- [9]. As grandezas físicas como quantidades 4-vetoriais do espaço-tempo
- [10]. Transformação da energia e da massa relativística
- [11]. A variedade pseudo-euclidiana espaço-tempo 4-dimensional
- [12]. A relatividade do espaço e a contração do espaço
- [13]. A relatividade do tempo e a dilatação do tempo
- [14]. A relatividade da simultaneidade e o problema da sincronização de relógios
- [15]. A relação massa-energia $E = mc^2$ para um fluido fictício associado a radiação

Muitos destes resultados foram creditados a Einstein, pois aparecem em seus dois *papers* de 1905. Outros são incorretamente creditados a ele, como a construção do espaço-tempo, a dinâmica relativística e o grupo de Lorentz. Porém, historicamente, foi Poincaré quem os obteve primeiro, ainda que ele muitas vezes atribuísse o mérito de Lorentz, e por justiça histórica devemos creditá-lo.

Depois de ler os artigos e livros publicados por Poincaré até 1905, é fácil convencer-se de que nada havia de novo para Poincaré no artigo de Einstein. Baseando-se em seus próprios trabalhos anteriores e nas investigações de Lorentz, Poincaré formulou todo o principal conteúdo da teoria da relatividade especial, descobriu as leis da mecânica relativista, estendeu as transformações de Lorentz a todas as forças da natureza. Mas tudo isso ele atribuiu ao **Grande Monstro** H.A. Lorentz, porque só seu artigo de 1904 forneceu um estímulo para o pensamento de Poincaré. Essa era sua prática usual. (LOGUNOV, 2004, p. 142)

Sobre a originalidade das ideias de Einstein, afirmam alguns historiadores da ciência (HOLTON, 1966; MILLER, 1997; GOLDBERG, 1957, PAIS, 1983), afirmam que Einstein teria chego em seus resultados de maneira independente, sem conhecer os outros trabalhos, como podemos ver no seguinte crítica de Logunov (2004, p. 145):

Se confiarmos em G. Holton, então veremos que A. Einstein sem dúvida pensava que foi exclusivamente ele quem descobriu a teoria da relatividade especial. Seria possível que ele não tivesse lido os artigos de Poincaré de 1905 e 1906 onde todo o conteúdo principal da teoria da relatividade especial foi apresentado em forma extremamente objetiva e geral? Por isso, é bastante estranho este tipo afirmação de A. Einstein. Mas se admitirmos que A. Einstein realmente não leu artigos de

Poincaré de 1905 e 1906 durante depois de cinquenta anos, então isso também é surpreendente. Como isso poderia estar relacionado com a “honestidade meticulosa de Einstein” como cientista, que é expressamente descrita por G. Holton?

A resposta impopular da história da ciência é: provavelmente não. Embora os documentos mais importantes a respeito da relatividade, incluindo o manuscrito original de Einstein, tenham se perdido, outros documentos como cartas e memórias de amigos e colegas tem revelado as influências que Einstein sofreu e omitiu em seu *paper* original e em suas notas autobiográficas. Talvez a história da ciência possa incomodar algumas pessoas, leigos e cientistas, que por anos adotaram Einstein como o único responsável pela criação da relatividade. Porém, é dever do historiador trazer a luz a verdade, por mais incômoda que ela seja, como resume Hobsbawm (2013, p. 60):

A história como inspiração e ideologia tem uma tendência embutida a se tornar mito de autojustificação. Não existe venda para os olhos mais perigosa que esta, como o demonstra a história de nações e nacionalismos modernos. É tarefa dos historiadores tentar remover essas vendas, ou pelo menos levantá-las um pouco ou de vez em quando — e, na medida que o fazem, podem dizer à sociedade contemporânea algumas coisas das quais ela poderia se beneficiar, ainda que hesite em aprendê-las.

Contudo não basta a fabricação de fatos e estudos, como nos lembra Poincaré em *A Ciência e a Hipótese* (1902, p. 25): “a ciência é feita com os fatos, como se faz uma casa com pedras; mas uma acumulação de fatos não é ciência, assim como um monte de pedras não é uma casa.” É preciso de rigor historiográfico, mas isso não basta. Como nos adverte Snow (1995) é preciso que haja circulação intercoletiva entre o coletivo de pensamento do historiador da ciência e os demais coletivos de pensamento, incluindo dos próprios especialistas em física e professores. Aliás, Kuhn (2017) e Fleck (1986) nos ensinam que são os especialistas aqueles que mais tendem a preservar a harmonia das ilusões. Uma anedota de Rubem Alves ilustra essa questão:

E há aquela estória, contada pelo Theodore Rozak, de uma sociedade de rãs que viviam no fundo de um poço. Como nunca haviam saído de lá, para todos os efeitos práticos, “os limites do seu poço denotavam os limites do seu mundo”. É sempre assim. É difícil pensar para além da experiência... Acontece que um pintassilgo descobriu o poço, descobriu as rãs, morreu de dó, e resolveu contar o que havia lá fora. E falou de campos verdes, vacas plácidas, águas limpas, flores, frutos, florestas, e tudo o mais que se pode ver neste mundo que enche os olhos... A princípio gostaram das fantasias do pintassilgo. Um bom contador de casos. Depois um grupo de filósofos parou para analisar o seu discurso, e concluiu que se tratava de ideologia, das perigosas, cheia de engodos alienantes. Da próxima vez que a avezinha lhes fez uma visita, antes que abrisse o bico lhe torceram o pescoço. “Boca que conta mentira não

merece falar.” Morto o bicho, empalharam-no e o colocaram no museu das conquistas da crítica da ideologia. A estória original não é bem assim, pois eu a adaptei ligeiramente para servir de começo para uma conversa sobre a “ideologia da educação”. O fato é que é fácil ver a ideologia nos outros, do jeitinho das rãs... Até hoje não vi ninguém que confessasse, sem pedir desculpas, ser um habitante das ideologias. Ao contrário, todo cientista que se preza faz a crítica das ideologias, vê com clareza, percebe o equívoco dos outros, do jeitinho das rãs... (ALVES, 1991, p. 31-32)

Muitos especialistas, alunos, acadêmicos, professores e pessoas interessadas em ciência vivem a harmonia das ilusões da genialidade de Einstein e de sua maravilhosa relatividade. Apresentar os estudos históricos nos torna tão vulneráveis como o Pintassilgo da história. Diante as complicações, a tendência geral é retornar ao estado de equilíbrio, eliminando a fonte de perturbação. Por isso é preciso elaborar estratégias para desconstruir estilos de pensamento. O modelo positivista é um modelo hipodérmico, e como mostra a experiência diária, esse modelo é ineficaz. É preciso de um modelo de transformação, desconstrução e reconstrução e a análise fleckiana trata justamente disso.

Uma das formas de desconstruir o mito de Einstein e a criação da relatividade, é desconstruindo inicialmente o mito do cientista. Uma investida direta sobre o Einstein mítico pode trazer resultados indesejáveis, visto que como muitas vezes ocorre uma relação entre a pessoa e o seu herói da ciência, atacar Einstein seria como atacar a pessoa. Além disso, embora nosso recorte seja relatividade, o objetivo mais amplo que esperamos com esse trabalho é desenvolver uma consciência reflexiva que se aplica a todas as áreas da ciência, por isso faço minha as palavras de Rubem Alves:

O cientista virou um mito. E todo mito é perigoso, porque ele induz o comportamento e inibe o pensamento. Este é um dos resultados engraçados (e trágicos) da ciência. Se existe uma classe especializada em pensar de maneira correta (os cientistas), os outros indivíduos são liberados da obrigação de pensar e podem simplesmente fazer o que os cientistas mandam. Quando o médico lhe dá uma receita você faz perguntas? Sabe como os medicamentos funcionam? Será que você se pergunta se o médico sabe como os medicamentos funcionam? Ele manda, a gente compra e toma. Não pensamos. Obedecemos. Não precisamos pensar, porque acreditamos que há indivíduos especializados e competentes em pensar. Pagamos para que ele pense por nós. E depois ainda dizem por aí que vivemos em uma civilização científica... O que eu disse dos médicos você pode aplicar a tudo. Os economistas tomam decisões e temos de obedecer. Os engenheiros e urbanistas dizem como devem ser as nossas cidades, e assim acontece. Dizem que o álcool será a solução para que nossos automóveis continuem a trafegar, e a agricultura se altera para que a palavra dos técnicos se cumpra. Afinal de contas, para que serve a nossa cabeça? Ainda podemos pensar? Adianta pensar? (ALVES, 1993, p. 11)

Em outras palavras, o que Alves propõe é que haja uma circulação intercoletiva entre os diversos coletivos de pensamento. A nossa análise histórica mostra como essa circulação foi vantajosa para Poincaré e para Einstein e que sem ela, possivelmente o surgimento da relatividade teria sido adiado. Então quais são os mitos que devemos combater? O filósofo da ciência nos lista McComas (1986) lista pelo menos dez

Mito 1: hipóteses tornam-se teorias que se tornam leis

Mito 2: uma hipótese é uma suposição qualificada

Mito 3: existe um método científico geral e universal

Mito 4: evidências acumuladas irão resultar em conhecimento seguro

Mito 5: a ciência e seus métodos fornecem provas absolutas

Mito 6: a ciência é mais processual que criativa

Mito 7: a ciência e seus métodos podem responder a todas as perguntas

Mito 8: os cientistas são particularmente objetivos

Mito 9: as experiências são o principal caminho para o conhecimento científico

Mito 10: todo o trabalho na ciência é revisto para manter o processo honesto

Porém, há um Mito 0, mais fundamental e que é base de todos os demais:

Antes de mais nada é necessário acabar com o mito de que o cientista é uma pessoa que pensa melhor do que as outras. O fato de uma pessoa ser muito boa para jogar xadrez não significa que ela seja mais inteligente do que os não-jogadores. Você pode ser um especialista em resolver quebra-cabeças. Isto não o torna mais capacitado na arte de pensar. Tocar piano (como tocar qualquer instrumento) é extremamente complicado. O pianista tem de dominar uma série de técnicas distintas – oitavas, sextas, terças, trinados, legatos, staccatos – e coordená-las, para que a execução ocorra de forma integrada e equilibrada. Imagine um pianista que resolva especializar-se (note bem esta palavra, um dos semideuses, mitos, ídolos da ciência!) na técnica dos trinados apenas. O que vai acontecer é que ele será capaz de fazer trinados como ninguém – só que ele não será capaz de executar nenhuma música. Cientistas são como pianistas que resolveram especializar-se numa técnica só. Imagine as várias divisões da ciência – física, química, biologia, psicologia, sociologia – como técnicas especializadas. No início pensava-se que tais especializações produziriam, miraculosamente, uma sinfonia. Isto não ocorreu. O que ocorre, frequentemente, é que cada músico é surdo para o que os outros estão tocando. Físicos não entendem os sociólogos, que não sabem traduzir as afirmações dos biólogos, que por sua vez não compreendem a linguagem da economia, e assim por diante. (ALVES, 1993, p 11-12)

Combater essa surdez voluntária é a tarefa que propomos nos contos de ficção científica. Promover a circulação de ideias por meio da Teoria da Relatividade que ajude transformem as conexões passivas sobre a natureza da ciência em conexões ativas.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Ao longo dessa pesquisa buscamos traçar as contribuições de Poincaré para a construção da Teoria da Relatividade, evidenciando tantos os fatores internos quanto os externos, com base da epistemologia fleckiana. Embora tenhamos buscado resgatar o maior número de elementos históricos e sociais por meio de ampla revisão de literatura primária e secundária, este trabalho nunca objetivou em esgotar esse assunto, mas ao contrário, contribuir para abertura de novas perspectivas de pesquisas e inspirar trabalhos com a mesma temática.

Dentro das inúmeras possibilidades de desdobramentos da pesquisa, três questões emergiram durante essa pesquisa, mas devido a extensão do trabalho acabaram por serem abordadas de maneira tangencial. São elas:

1) A aceitação da Relatividade de Einstein e o ostracismo de Poincaré.

Como mostramos, Poincaré foi um dos principais atores do desenvolvimento da Teoria da Relatividade. No contexto de 1905, Poincaré ocupava uma posição de destaque maior que a de Einstein, porém após sua morte em 1912, e o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral, entre 1912 à 1919, data em que a expedição britânica organizada por Sir Eddington realizou medidas sobre a curvatura da luz durante o eclipse na Ilha do Príncipe e em Sobral, Einstein passou a ser referenciado como criador das duas teorias da relatividade e Poincaré, pouco a pouco, se tornou uma nota histórica de livros. Somente na década de 1950, com a publicação controversa de Whittaker (1953) que os historiadores da ciência voltariam as origens da relatividade e passariam a redescobrir o legado olvido de Poincaré.

Como vimos, de acordo com Katzir (2005a), talvez o grande demérito da abordagem de Poincaré teria sido ser completa demais, o que levou os físicos a optarem pela abordagem de Einstein, mais liberal e mais maleável que sua concorrente. Outra possibilidade levantada por Brush (1999) enfatiza o impacto de fatores sociais, psicológicos e até políticos para a consolidação da Teoria da Relatividade.

De acordo com Stanley Goldberg, os físicos britânicos não abandonaram sua forte crença no éter até muito mais tarde; portanto, não se pode dizer que a teoria da relatividade tenha sido realmente aceita nesse período inicial; além disso, como o próprio Warwick aponta, antes de 1911 "não existia uma teoria da relatividade especial bem definida" que pudesse ser aceita ou rejeitada. Ao mesmo tempo, o estudo de Warwick mostra que cientistas individuais podem ter sido

influenciados a aceitar a relatividade por razões baseadas mais em sua própria afiliação disciplinar do que nos méritos objetivos da própria teoria. [...] Graham afirma que a pesquisa do físico V. A. Fock é um exemplo legítimo de construção social e mostra os efeitos "bons" do que os cientistas ocidentais geralmente consideram uma influência social "ruim", o materialismo dialético. Lewis Pyenson descreveu a "revolução da relatividade" na Alemanha antes de 1914, construindo uma analogia elaborada entre seus participantes e os protagonistas da Revolução Francesa. Ele argumentou que "os físicos na Europa Central estavam particularmente dispostos a buscar soluções revolucionárias para os problemas científicos que enfrentavam" e observou que as palavras que significam "revolução" eram frequentemente usadas pelos primeiros defensores da relatividade implicaria que os físicos julgassem a nova teoria não apenas por seus próprios méritos, mas também com base em seus próprios gostos ou desgostos de mudanças radicais em geral. Por que um físico em particular tenderia a aceitar ou rejeitar uma idéia porque é revolucionária? Podemos encontrar uma resposta para essa pergunta no estudo de Frank Sulloway sobre abertura à inovação científica. Com base na análise de 308 cientistas cujas posições sobre a relatividade antes de 1930 são conhecidas, Sulloway concluiu que a idade é um forte preditor de tendência a aceitar as teorias de Einstein, enquanto atitudes sociais e ordem de nascimento são moderadamente boas - jovens cientistas mais liberais que foram os segundos ou mais tarde, a criança em sua família tinha maior probabilidade estatisticamente de apoiar a relatividade (BRUSH, 1999, p. 189-190).

Por estas breves colocações fica evidente que ainda é preciso clarificar melhor o processo de consolidação da Teoria da Relatividade, que privilegiou a ascensão de Einstein, colocando-a como figura central, ofuscando outros pesquisadores, sobretudo Henri Poincaré (LOGUNOV, 2004).

2) A gênese da Teoria da Relatividade enquanto fato científico.

Essa questão surge paralela a primeira. Enquanto nesse trabalho nosso foco foi a contribuição de Poincaré para a construção da Teoria da Relatividade, que alcançou seu auge em 1905 (MARTINS, 2012), a consolidação do princípio da relatividade como um estilo de pensamento, foi um processo que ainda se esntenderia durante as próximas décadas e encontraria muita resistência, principalmente entre os ingleses (GOLDBERG, 1970, GLICK, 1987, BRUSH, 1999, WALTER, 2011). O livro organizado por Glick (1987) fornece um panorama da recepção da relatividade em diferentes países, porém, não realiza a descrição dessa gênese. Portanto uma proposta imediata que decorre deste trabalho é uma análise fleckiana de como a Teoria da Relatividade se da expansão do círculo esotérico do Princípio Relatividade e a sua aceitação como fato científico.

3) A Confluência de estilos de pensamento e a prioridade de Poincaré

Na epistemologia de Fleck o indivíduo e o coletivo de pensamento formam uma unidade dialética:

Evidencia-se que um indivíduo pertence a vários coletivos de pensamento. Como pesquisador, ele faz parte de uma comunidade com a qual trabalha e, muitas vezes de maneira inconsciente, faz surgir idéias e desenvolvimentos que, logo depois de se tornarem autônomos, não raramente se voltam contra seus autores. Como membro de um partido, como representante de uma classe, de um país, de uma raça etc. pertence a outros coletivos. Quando chega a viver num grupo, logo se transforma em seu membro e obedece às suas imposições. Tanto o indivíduo pode ser estudado do ponto de vista coletivo, quanto o coletivo do ponto de vista individual, sendo que, em ambos os casos, tanto a especificidade da personalidade individual quanto da totalidade coletiva somente se tornam acessíveis com o uso dos métodos adequados. (FLECK, 2010, p. 88-89).

Por isso para Fleck quanto maior número de coletivos de pensamento que o indivíduo pertença ou maior as circulações intercoletivas entre diferentes círculos esotéricos, melhor será a dinâmica de evolução do fato científico, pois esse tipo de relação favorece ao que Fleck chama de de uma confluência de estilos de pensamento:

[...] As corporações de ofício representam, de forma expressiva, comunidades voltadas para a prática; é instrutivo constatar como, de acordo com a atividade profissional, problemas práticos semelhantes são resolvidos de maneira diferente. Uma rachadura no revestimento, por exemplo, é algo bem diferente para um pintor e pedreiro. O pintor vê apenas os danos de superfície e os trata como tais; o pedreiro pensa no conjunto da parede e tende, também na prática, a intervir na profundidade da parte interna: o aspecto estilístico do pensamento dos mesmos aparece em cada aplicação (FLECK, 2010, p.156).

No decorrer desta pesquisa, vimos que Poincaré pertencia a um número muito grande de coletivos de pensamento, razão que lhe rendeu o título de último universalista. Esse fato tornava possível a ocorrência do fenômeno de confluência de diferentes estilos de pensamento, que permitia Poincaré analisar problemas que apareciam sobre diferentes perspectivas, podendo superar dificuldades que quando analisadas por um número restrito de estilos de pensamento seriam intransponíveis. A nossa análise mostrou que a confluência de estilos de pensamento em Poincaré era muito maior que a de Einstein, e por isso ele pode antecipar os principais resultados atribuídos a Einstein (e também a Planck e Minkowski) e ir além de Einstein. Uma pesquisa orientada pela leitura fleckiana, poderia clarificar melhor essa situação e justificar a prioridade da Teoria da Relatividade por Poincaré sobre Einstein, ou, até mesmo mostrar que a gênese da Teoria da Relatividade foi constituída por um coletivo de pensamento.

REFERÊNCIAS

- ABIKO, Seya. On Einstein's distrust of the electromagnetic theory: The origin of the light velocity postulate. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, Vol. 33, No. 2 (2003), pp. 193-215.
- ABRAHAM, M. Die Grundhypothesen der Elektronentheorie. *Physikalische Zeitschrift*. 5 (1904): pp. 576–579
- . Neuere Gravitationstheorien. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, (1915). pp. 470–520.
- ANDERY, M. A. *et al. Para Compreender a Ciência*. Rio de Janeiro: Espaço e tempo. São Paulo: EDUC, 1988.
- ALVES, R. *Introdução à Filosofia da Ciência*. 19ª ed. São Paulo: Brasiliense, 1993.
- . *Conversas com Quem Gosta de Ensinar*. 26ª ed. São Paulo: Cortez, 1991.
- AMORIM, R. G. G. Santos, W. C. Carvalho, L. B. Massa, I. R. Uma Abordagem Física dos Números Perplexos. *Rev. Bras. Ensino Fís.* vol.40, n.3 (2018), e3309.
- AUFFRAY, J. P. *O Espaço-Tempo*. Lisboa: Flammarion, 1998.
- BAGDONAS, A. SILVA, C. C. Controvérsias Sobre a Natureza da Ciência na Educação Científica. pp. 213-223. In: SILVA, C. C. PRESTE, M. E. B. (ed.) *Aprendendo ciência e sobre sua natureza: abordagens históricas e filosóficas*. Rio de Janeiro: Typographia, 2013.
- BAGDONAS, A. ZANETIC, J. GURGEL, I. Críticas à visão consensual da natureza da ciência e a ausência de controvérsias na educação científica: o que é ciência, afinal? *XIV Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*, (2012) pp. 1-9.
- . Controvérsias sobre a natureza da ciência como enfoque curricular para o ensino da física: o ensino de história da cosmologia por meio de um jogo didático. *Revista Brasileira de História da Ciência*. v. 7. (2014) pp. 242, 2014.
- BARROW-GREEN, J. *Poincaré and the Three-Body Problem*. American Mathematical Society, Providence, RI, 1997.
- BASSALO, J. M. F. *Eletrodinâmica Clássica*. São Paulo: Livraria da Física, 2002.
- . *Eletrodinâmica Quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2012.
- BASSALO, J. M. F. CATTANI, M. S. D. *Teoria de Grupos*. São Paulo: Livraria da Física, 2010.
- . *Cálculo Exterior*. São Paulo: Livraria da Física, 2012.
- BAUMAN, Z. MAY, T. *Aprendendo a Pensar com a Sociologia*. Rio de Janeiro: Zahar, 2010.
- BECK, A. HAVAS, P. *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 1. The Early Years: 1879-1902*. Princeton: Princeton University, 1987.
- BELTRAN, M. H. R.; SAITO, F.; TRINDADE, L. S. P. *História da ciência para formação de professores*. São Paulo: Livraria da Física, 2014.
- BENJAMIN, C. *Dicionário de Biografias Científicas*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2007. 2696 pp.

BOCCALETTI, D. CATONI, F. CATONI, V. *Space-time trigonometry and formalization of the “Twin Paradox” for uniform and accelerated motions*. 2018. arXiv:physics/0509161v1 [physics.class-ph].

BOHM, D. *A Teoria da Relatividade Restrita*. São Paulo: Editora UNESP, 2014.

BORN, M. *Physics an My Generation*, Oxonia: Pergamon Press, 1956, p. 104.

BOSS, S. L. B.; CALUZI, J. J.; ASSIS, A. K. T.; SOUZA FILHO, M. P. *A utilização de traduções de fontes primárias na formação inicial de professores: breves considerações sobre dificuldades de leitura e entendimento*. p. 20 – 38. in: Gatti, S. R. T. Nardi, R. (org). *A História e a Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências: a pesquisa e suas contribuições para a prática pedagógica em sala de aula*. São Paulo: Escrituras, 2016.

BRADING, K. A Note on General Relativity, Energy Conservation, and Noether’s Theorems. In: KOX, A. J. EISENSTAEDT, J. (eds.). *The Universe of General Relativity* (Einstein Studies, vol. 11). Boston: Birkhäuser, 2005, pp. 125-136.

BRASIL. PNLD. *Ministério da Educação* 2018. Disponível em:

< http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=12391 >. Acesso em: 07 jul. 2019.

BRASIL. Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio. Brasília: MEC; SEMTEC. 2002a

BRASIL. Orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais: ensino médio. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC; SEMTEC. 2002b

BREDON, G. E. *Geometry and Topology*. New York: Springer, 1993.

BROWN, K. Did Poincare Anticipate Gödel? *Mathpages* (2014) Disponível em: < <https://www.mathpages.com/home/kmath650/kmath650.htm> > Acesso em: 20 de Setembro de 2019.

BROWN, K. Laplace on the Speed of Gravity. *Mathpages* (2015) Disponível em: < <https://www.mathpages.com/home/kmath690/kmath690.htm> > Acesso em: 20 de Setembro de 2019.

BROWN, K. *Reflections on Relativity*. Morrisville: Lulu Press, 2017.

BRUSH, G. S. Why was Relativity Accepted? *Phys. perspect.* 1 (1999): pp. 184–214

BUCHERER, A. H. *Mathematische Einführung in die Elektronentheorie*. Leipzig: Teubner, 1904.

CAPRIA, M. M. (Ed.). *Physics Before and After Einstein*. Amsterdam: IOS Press, 2005.

CARMO, M. P. *Geometria Diferencial de Curvas e Superfícies*. Rio de Janeiro: SBM, 2012.

CARTAN, E. *On Manifolds with an Affine Connection and the Theory of General Relativity*. New Jersey: Humanities, 1986.

CASSIRER, E. *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity*. Chicago: Dover, 1923.

CATTANI, C. MARIA, M. Conservation Laws and Gravitational Waves in General Relativity (1915-1918). In: EARMAN, J. JANSSEN, M. NORTON, J. D. *The Attraction*

of Gravitation: New Studies in the History of General Relativity. Vol. 5, Boston: Birkhäuser, 1993.

CATONI, F. ZAMPETTI, P. Cauchy-Like Integral Formula for Functions of a Hyperbolic Variable. *Adv. Appl. Clifford Algebras* v. 22 (2012), p. 23–37.

CATONI, F. BOCCALETTI, D. CANNATA, R. CATONI, V. ZAMPETTI, P. *Geometry of Minkowski Space–Time*. New York: Springer, 2011.

CATONI, F. BOCCALETTI, D. CANNATA, R. CATONI, V. NICHELATT, E. ZAMPETTI, P. *The Mathematics of Minkowski Space-Time With an Introduction to Commutative Hypercomplex Numbers*. Boston: Birkhäuser Verlag, 2008.

CHALMERS, A. F. *A Fabricação da Ciência* São Paulo: Editora da UNESP, 1994.

——— *O que é Ciência, Afinal?* 14ª reimpressão, São Paulo: Editora Brasiliense, 2017.

CHASHCHINA, O. DUDISHEVA, N. DUDISHEVA, Z. K. *Voigt transformations in retrospect: missed opportunities?* (2019) arXiv:1609.08647v2 [physics.hist-ph]

CORMMACH, R. M. Einstein, Lorentz, and the Electron Theory. *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 2 (1970), pp. 41-87

CORRY, L. Hermann Minkowski and the Postulate of Relativity. *Archive for History of Exact Sciences*, 51 (1997):273–314.

COSTA, M. A. *Introdução à Teoria da Relatividade*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1995.

COURANT, R. ROBBINS, H. *O que é matemática: uma abordagem elementar de métodos e conceitos*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2000.

CULLWICK, E. G. Einstein and Special Relativity. Some Inconsistencies in His Electrodynamics. *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 32, No. 2 (Jun., 1981), pp.167-176

CUNNINGHAM, E. On the electromagnetic mass of a moving electron. *Philosophical Magazine*, series 6, 14:82 (1907) , pp. 538-547.

CUVAJ, C. Henri Poincaré’s Mathematical Contribution to Relativity and the Poincaré Stress, *American Journal of Physics*, 36 (1968), pp. 1102–13.

——— *A History of Relativity — The Role of Henri Poincaré and Paul Langevin*. Ph.D.: Yeshiva University, 1970.

DAMOUR, T. Poincaré, Relativity, Billiards and Symmetry. *Proceedings of the Symposium Henri Poincaré* (Brussels, 8-9 October 2004)

——— Poincaré et la Théorie de la Relativité. *Conférence «Henri Poincaré», Académie des Sciences*, 6 novembre 2012.

———. Poincaré, the dynamics of the electron, and relativity. *C. R. Physique* 18 (2017) pp. 551–562

DARRIGOL, O. The Electron Theories of Larmor and Lorentz: A Comparative Study. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, Vol. 24, No. 2 (1994), pp. 265-336

———. Henri Poincaré’s Criticism of Fin de Sicle Electrodynamics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* Vol. 26, No. 1, (1995), pp. 1–44.

——— The Electrodynamical Origins of Relativity Theory. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, Vol. 26, No. 2 (1996), pp. 241-312.

- *Electrodynamics from Ampere to Einstein*. New York: Oxford University, 2003.
- The Mystery of the Einstein–Poincaré Connection. *Isis*, Vol. 95, No. 4 (December 2004), pp. 614–626
- The Genesis of the Theory of Relativity. *Séminaire Poincaré* 1 (2005), pp. 1–22.
- DIEUDONNÉ, J. Poincaré, Jules Henri. In: BENJAMIN, C. *Dicionário de Biografias Científicas*. Rio de Janeiro: Contraponto, 2007. 2696 pp.
- DIRAC, P. A. M. *General Theory of Relativity*, Princeton: Landmarks in Physics, 1996
- DUGAS, R. *A History of Mechanics*. New York: Dover, 1988.
- EARMAN, J. On Going Backward in Time. *Philosophy of Science*, Vol. 34, No. 3 (Sep., 1967), pp. 211–222
- The Closed Universe. *Noûs*, Vol. 4, No. 3 (Sep., 1970), pp. 261–269.
- How to Talk about the Topology of Time. *Noûs*, Vol. 11, No. 3, Symposium on Space and Time (Sep., 1977), pp. 211–226
- *World Enough and Space-Time Absolute versus Relational Theories of Space and Time*. London: MIT Press, 1989.
- EARMAN, J. GLYMOUR, C. Relativity and eclipses: the British eclipse expeditions of 1919 and their predecessors, *Historical Studies in the Physical Sciences* (1980), 11, 49–85.
- EARMAN, J.; GLYMOUR, C.; and RYNASIEWICZ, R. (unpublished). *Reconsidering the Origins of Special Relativity*. January, 1983.
- ECO, Umberto. *Como se Faz uma Tese*. São Paulo: Perspectiva, 26º ed, 2016.
- EDWARDS, M. R. *Pushing Gravity: New Perspectives on Le Sage's Theory of Gravitation*. Montreal: Apeiron, 2002.
- EINSTEIN, A. Mes Projets d'Avenir. *Matura Examination* (B) French. 1896.
- [Carta] 1901-03-27. Mailand Mittwoch para MARIC, M. 2f. Einstein menciona que ficará orgulhoso quando o trabalho sobre o “movimento relativo” que ele está desenvolvendo com Mileva Maric for concluído.
- Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Ann. Phys.* v. 17 (1905): pp. 891–921.
- Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Ann. Phys.* v. 18 (1905): pp. 639–641.
- Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie. *Annalen der Physik* (1906), 20, pp. 627–633.
- Eine Methode zur Bestimmung des Verhältnisses der transversalen und longitudinalen Masse des Elektrons. *Annalen der Physik* (1906), 21, pp. 583–586.
- Möglichkeit einer neuen Prüfung des Relativitätsprinzips. *Annalen der Physik* (1907), 23, pp. 197–198.
- Bemerkung zur Notiz des Herrn P. Ehrenfest: Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz, *Annalen der Physik* (1907), 23, pp. 208–208.
- Die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie. *Annalen der Physik* (1907), 23, pp. 371–384.
- Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Jahrbuch der Radioaktivität*, 4 (1907), pp. 411–462

_____. Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Annalen der Physik*, (1911), 35, pp. 898–908.

_____. Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes. *Annalen der Physik*, (1912a), 38, pp. 355–369.

_____. Zur Theorie des statischen Gravitationsfeldes'. *Annalen der Physik*, (1912b), 38, pp. 443–458

_____. Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* (1914), pp. 1030–1085.

_____. Zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* (1915a), pp. 778–786.

_____. Zur allgemeinen Relativitätstheorie (Nachtrag). *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* (1915b), pp. 799–801.

_____. Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* (1915c), pp. 831–839.

_____. Die Feldgleichungen der Gravitation *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* (1915d), pp. 844–847.

_____. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik* (1916a), 49, pp. 769–822 (also published separately as Leipzig: Teubner.

_____. Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation. *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* (1916b), pp. 688–696.

_____. *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*. Braunschweig: Vieweg, 1917.

_____. Über Gravitationswellen. *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (Berlin). *Sitzungsberichte* (1918), pp. 154–167.

_____. How I created the theory of relativity. *Physics Today* (August, 1982), pp. 45–47.

_____. *Notas Autobiográficas*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1984.

EINSTEIN, A. GROSSMANN, M. *Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation*. Leipzig: Teubner, 1913.

_____. Kovarianzeigenschaften der Feldgleichungen der auf die verallgemeinerte Relativitätstheorie gegründeten Gravitationstheorie. *Zeitschrift für Mathematik und Physik* (1914), 63, pp. 215–225

EL-HANI, C. N. Notas sobre o Ensino de História e Filosofia das Ciências na Educação Científica de Nível Superior. pp. 3–21. In: SILVA, C. C. (Org.). *Estudos de História e Filosofia das Ciências: Subsídios para Aplicação no Ensino*. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

ERNSTY, A. Hsu, J. First Proposal of the Universal Speed of Light by Voigt in 1887. *Chinese Journal of Physics*- Taipei- 39 (3) June, 2001.

FADNER, W. L. Did Einstein really discover “ $E=mc^2$ ”? *Am. J. Phys.* 56 (2008), pp. 114.

FÈBVRE, L. *Le problème e de l'incroyance au XV sciecle. La religion de Rabelais*. Paris: Albin Michel Littérature, 2003.

FEYERABEND, P. Zahar on Einstein. *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 25, No. 1 (Mar., 1974), pp. 25-28.

——— Zahar on Mach, Einstein and Modern Science. *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 31, No. 3 (Sep., 1980), pp. 273-282

——— *Adeus a Razão*. São Paulo: Editora UNESP, 2009.

——— *Contra o Método*. São Paulo: Editora UNESP, 2010.

——— *A Ciência em uma Sociedade Livre*. São Paulo: Editora UNESP, 2011.

FEYNMAN, R. P. LEIGHTON, R. B. SANDS, M. *Lições de Física de Feynman - Edição Definitiva*. Porto Alegre: Bookman, 2008.

FIELD, J. H. Einstein and Planck on mass-energy equivalence in 1905-06: a modern perspective. *Eur. J. Phys.* 35 (2014), 15pp.

FISCHER, I. S. *Dual-Number Methods in Kinematics, Statics and Dynamics*. New York: CRC, 1998.

FLECK, L. *La Génesis y el desarrollo de un hecho científico*. Madrid: Alianza Editorial, 1986.

——— *Gênese e desenvolvimento de um fato científico*. Georg Otte e Mariana C. de Oliveira (Trad.) Belo Horizonte: Fabrefactum, 2010.

FOCK, V. *The Theory of Space, Time and Gravitation*. Oxonia: Pergamon Press, 1964.

FÖLSING, A. *Albert Einstein*. New York: Viking, 1997.

FORATO, T. C. M.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. A. Historiografia e Natureza da Ciência na Sala de Aula. *Revista Brasileira de Ensino de Física* v. 28, n. 1: p. 27-59, abr. 2011.

FLOOD, T. L. The Chautauquan. *The Chautauquan - A Monthly Magazine* - Vol. 3 Oct. 1882 - July 1883 Hardcover.

FRENCH, A. P. *Special Relativity*. New York: MIT - Norton & Company. Inc, 1968.

GALISON, P. L. Minkowski's Space-Time: From Visual Thinking to the Absolute World, in: *Historical Studies in the Physical Sciences* 10 (1978), pp. 85-121.

——— *Einstein's Clock and Poincaré's Map: Empires of Time*. New York: Norton, 2003.

GARGOUBI, H. KOSENTINI, S. f-Algebra Structure on Hyperbolic Numbers. *Adv. Appl. Clifford Algebras*, 2016.

GIANNETTO E. The rise of Special Relativity: Henri Poincaré's works before Einstein. Pp. 171-207, in: *Atti del XVIII Congresso di Storia della Fisica e dell'Astronomia*. Milano: Istituto de Física Generale Applicata / Centro Volta de Vomo, 1999.

GIEDYMIN, J. *Science and Convention*. Oxford: Pergamon Press, 1982.

GIL-PÉREZ D. et al Por uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, 7 (2), 2001, pp. 125-153.

GLICK, T. *The Comparative reception of relativity*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1987.

GOLDBERG, S. Henri Poincaré and Einstein's Theory of Relativity. *American Journal of Physics* 35 (1967): pp. 934–944.

———. The Lorentz Theory of Electrons and Einstein's Theory of Relativity. *American Journal of Physics* 37 (1969): pp. 982–994.

———. Poincaré's Silence and Einstein's Relativity: The role of theory and experiment in Poincaré's Physics. *British Journal for the History of Science* 17 (1970a): pp. 73–84.

———. The Abraham Theory of the Electron: The Symbiosis of Experiment and Theory. *Archive for History of Exact Sciences*, 7 (1970b): pp. 7–25.

———. In Defense of Ether: The British Response to Einstein's Special Theory of Relativity, 1905–1911. *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 2 (1970), pp. 89–125.

———. Max Planck's Philosophy of Nature and His Elaboration of the Special Theory of Relativity. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7 (1976): pp. 125–160.

GOLDFARB, A. M. A. O que é história da ciência. São Paulo: Brasiliense, 1994.

GOURGOULHON, E. *Special Relativity in General Frames From Particles to Astrophysics*. New York: Springer, 2013.

GRANT, E. *História da Filosofia Natural*. São Paulo: Madras, 2014.

JAMMER, Max. *Concepts of Simultaneity*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2006.

———. *Conceitos de Espaço*. Rio de Janeiro: Editora PUC-Rio, 2010.

———. *Conceitos de Força*. Rio de Janeiro: Editora PUC-Rio, 2011.

———. *Concepts of Mass*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2013.

JOYCE, D. E. *Euclid's Elements: Book I* Disponível em: <mathcs.clarku.edu/~djoyce/elements/bookI/propI30.html> Acesso em: 25 fev. 2019.

HALL, A. R. On Whiggism, *History of Science*, 21 (1983), 45–59.

HALL, B. *Lie Groups, Lie Algebras, and Representations - An Elementary Introduction*. New York: Springer, 2015.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J. *Fundamentos de Física 4*. 10ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HARTOG, François. Regimes de Historicidade: presentiamo e experiência do tempo. Belo Horizonte: Autêntica, 2015.

HENRY, J. *The Scientific Revolution and the Origins of Modern Science*. New York: PALGRAVE, 2002.

HERAS, R. *A review of Voigt's transformations in the framework of special relativity*. (2017) arXiv:1411.2559v4 [physics.hist-ph].

HIROSIGE, T. Origins of Lorentz' Theory of Electrons and the Concept of the Electromagnetic Field. *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 1 (1969), pp. 151–209.

———. The Ether Problem, the Mechanistic Worldview, and the Origins of the Theory of Relativity. *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 7 (1976), pp. 3–82.

HOBSBAWM, E. *Sobre História*. São Paulo: Companhia das Letras, 2013.

HOLTON, G. On the Origins of the Special Theory of Relativity. *Am. J. Phys.* 28 (1960), pp. 627.

——— On the thematic Analysis of Science: the Case of Poincaré and Relativity. *Mélanges Alexandre Koyré* 2 (1964): pp. 257–268.

——— Influences on Einstein's Early Work in Relativity Theory. In: *The American Scholar*, 37, N°.1, p.59-79, Winter, 1967-1968.

——— Einstein, Michelson, and the "Crucial" Experiment. In *Isis*, Vol. 60, No. 2 (Summer, 1969), pp. 132-197.

HOWARD, Don, STACHEL, John (Eds.). *Einstein and the History of General Relativity*. New York: Springer, 2005a.

——— *Einstein: The Formative Years, 1879-1909*. Boston: Birkhäuser, 2005b.

HSU, J. P. HSU, L. *General Implications of Lorentz And Poincare Invariance*. Singapore: World Scientific Publishing, 2006.

HSU, J. P. ZHANG, Y. Z. *Lorentz & Poincare Invariance - 100 Years of Relativity*. Singapore: World Scientific Publishing, 2005.

ISAACSON, W. *Einstein - Sua Vida, seu Universo*. São Paulo: Companhia Das Letras, 2007.

IVES, H. Derivation of the Mass-Energy Relation. *Journal of the Optical Society of America*. Volume 42, Number 8, August, 1952.

JANCEWICZ, Bernard. *Multivectors and Clifford Algebra in Eletrodynamics*. World Scientific: London, 1988.

JOSIPOVIC, M. *Geometric Multiplication of Vectors An Introduction to Geometric Algebra in Physics*. Cham: Birkhäuser, 2019.

KANDASAMY, W. B. SMARANDACHE, F. *Dual Numbers*. Ohio: Zip Publishing, 2012.

KANATANI, K. *Understanding Geometric Algebra*. CRC Press: Florida, 2015.

KATZIR, S. *Poincaré's Relativity theory — Its Evolution, Meaning and its (Non)acceptance*. M.A.: Tel Aviv University, 1996.

——— Poincaré's Relativistic Theory of Gravitation. pp. 15-38, in: KOX, Anne J. EISENSTAEDT, Jean (eds.). *The Universe of General Relativity* (Einstein Studies, vol. 11). Boston: Birkhäuser, 2005.

——— Poincaré's Relativistic Physics and Its Origins, *Physics in Perspective* 7 (2005b): pp. 268-292

KAY, D. *Tensor Calculus*. New York: McGraw-Hill, 2015.

KESWANI, G. H. Origin and Concept of Relativity (I). *The British Journal for the Philosophy of Science*, 15 (1965a): pp.286-306.

——— Origin and Concept of Relativity (II). *The British Journal for the Philosophy of Science*, 16 (1965b): pp.19-32.

KESWANI G. H. KILMISTER C. W. Intimations of Relativity Relativity before Einstein. *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 34, No. 4 (Dec. 1983), pp. 343-354.

- KILMISTER, C.W. *Special Theory of Relativity*. Pergamon Press, Oxford, U.K, 1970.
- KISIL, V. V. Induced Representations and Hypercomplex Numbers. *Adv. Appl. Clifford Algebras* v. 23 (2013), pp. 417–440.
- KOESTLER, A. *Os Sonâmbulos*. São Paulo: IBRASA, 1961.
- KOYRÉ, A. *Considerações sobre Descartes*. Lisboa: Editorial Presença, 1969.
- KRAGH, H. *Introdução à historiografia da ciência*. Porto: Porto Editora, 2001.
- _____. *An Introduction to the Historiography of Science*. New York: Cambridge University Press, 2003.
- KREYSZIG, E. *Differential Geometry*. New York: Dover, 1991.
- KOX, A. J. Pieter Zeeman's Experiments on the Equality of Inertial and Gravitational Mass. *Einstein Studies* 5 (1993): pp. 173–181.
- KOX, A. J. EISENSTAEDT, J. (Eds.). *The Universe of General Relativity*. New York: Springer, 2005.
- KUHN, S. *A Estrutura das Revoluções Científicas*. 13. ed. São Paulo: Editora Perspectiva S.A, 2017.
- KYOKA, B. D. *A doutrina de Buda*. São Paulo: Martin Claret, 2012.
- LAKATOS, I. O Falseamento e a Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica. In: LAKATOS, I. MUSGRAVE, A. (Org.). *A Crítica e o Desenvolvimento do Conhecimento*. São Paulo: Cultrix, EDUSP, p. 109-243. 1979.
- LANDAU, L. LIFCHITZ, E. *Teoria do Campo*. São Paulo: Hemus, 2002.
- LANDAU L, RUMER, Y. *O Que É a Teoria da Relatividade?* 2ª edição, São Paulo: Hemus, 2004.
- LANGEVIN, P. Henri Poincaré, le physicien. *Revue de métaphysique et de morale*, numéro 5, 1913, p. 675-718.
- _____. L'inertie de l'énergie et ses conséquences. *J. Phys. Theor. Appl.* 3:1 (1913b), pp.553-591.
- _____. *Le Principe de relativité*. Paris: Éditions Étienne Chiron, 1922.
- _____. *La Physique depuis vingt ans*. Paris: Gaston Doin, 1923.
- LARMOR, J. A Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium. In: *Proceedings of the Royal Society Philosophical Transactions of the Royal Society*. Cambridge, 1893.
- _____. *Aether and Matter*. Cambridge: John's College University Press, 1900.
- LAUE, M. V. *Das Relativitätsprinzip*, Braun: Schweig, 1911.
- LESCHE, B. *Teoria da Relatividade*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- LEVI, G. Sobre a Micro-História. In: BURKE, P. (Org) *A Escrita da História: Novas Perspectivas*. São Paulo: UNESP, 1992.
- LEVI-CIVITA, T. Sulla espressione analitica spettante al tensore gravitazionale nella teoria di Einstein. *Rendiconti Accademia del Lincei ser. 5*, vol. XXVI (1917): pp. 381-391.

LOGUNOV, A. A. *Henri Poincare and Relativity Theory*. Ithaca: Cornell University Library, 2004.

LORENTZ, H. A. [Carta] 1901-01-20. Leiden para POINCARÉ, H. Leiden. 8f. Lorentz agradece Poincaré pela sua contribuição ao seu 25º jubileu de doutoramento, mas critica a abordagem de Poincaré e sugere que o Princípio de Reação não é um princípio fundamental da física.

———. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light. *Versl. K. Ak. van Wet.* 12, p. 986-1009. 1904.

———. Alte und neue Fragen der Physik. *Physikalische Zeitschrift* 11 (1900): pp. 1234–1257.

———. La Gravitation. *Scientia* 16 (36): pp. 28–59, 1914.

———. Deux Mémoires de Henri Poincaré sur la Physique Mathématique. *Acta Mathematica*. 38, 1915/1921, S. 293–308

———. *A Experiência Interferencial de Michelson*. In: Textos Fundamentais da Física Moderna - I Volume: O Princípio da Relatividade, p.05-11. 3ª. ed, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1958.

LUCA, T. R. Fontes Impressas: história dos, nos e por meio dos periódicos. pp. 111-153, in: Pinsly, C. B. (org.). Fontes Históricas. São Paulo: Contexto, 2006.

MACH, E. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung: historisch-kritisch dargestellt*. Leipzig: Brockhaus, 1883.

MACHADO, K. D. *Eletromagnetismo, 3 Volumes*. Ponta Grossa: Toda Palavra, 2012.

MAJER, S. U. H. *Reflections On Spacetime: Foundations, Philosophy, History*. New York: Kluwer Academic Publishers, 1995.

MARTINS, R. A. O princípio de antecedência das causas na teoria da relatividade. *Anais da ANPOF* 1:1 (1986), pp. 51-72.

———. A relação massa-energia e energia potencial. *Caderno Catarinense de Ensino de Física* 15 (1989): pp. 265-300.

———. Em busca do nada: considerações sobre os argumentos a favor e contra o vácuo. *Trans/Form/Ação* 16 (1993): pp. 7-27.

———. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica 1- Física clássica. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 15 (3): p. 243-264, dez. 1998a.

———. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica 2 - Física moderna. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 15 (3): p. 265-300, dez. 1998b.

———. The search for gravitational absorpction in the early 20th century. In: GOEMMER, H., RENN, J., & RITTER, J. (eds.). *The expanding worlds of general relativity* (Einstein Studies, vol. 7). Boston: Birkhäuser, 1998c, pp. 3-44.

———. Como Não Escrever Sobre História da Física - um Manifesto Historiográfico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 23 (1), Março, 2001.

———. Majorana's Experiments on Gravitational Absorption. In: EDWARDS, M. R. (org.) *Pushing gravity: new perspectives on Le Sage's theory of gravitation*. Montréal: Apeiron, 2002.

———. A dinâmica relativística antes de Einstein. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 27 (2005a): pp. 11-26.

———. A. El empirismo en la relatividad especial de Einstein y la supuesta superación de la teoría de Lorentz y Poncaré. Pp. 509-516, in: FAAS, Horacio; SAAL, Aarón; VELASCO, Marisa (eds.). *Epistemología e Historia de la Ciencia. Selección de Trabajos de las XV Jornadas*. Facultad de Filosofía y Humanidades. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 2005b.

———. Introdução. A história das ciências e seus usos na educação. pp. XXI-XXXIV, In: SILVA, C. C. (ed.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

———. *Espaço, tempo e éter na teoria da relatividade*. pp. 31-60, in: KNOBEL, M. SCHULZ, P. A. (orgs.). *Einstein: muito além da relatividade*. São Paulo: Instituto Sangari, 2010;

———. *Teoria Relatividade Especial*. São Paulo: Livraria da Física, 2012.

———. A fundamentação histórica da lei da inércia: um exemplo de conflito entre educadores e historiadores da ciência no uso da história da ciência no ensino de física. Pp. 143-159, in: CAMARGO, S. et al. (orgs.). *Controvérsias na pesquisa em ensino de física*. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

———. *A Origem Histórica da Relatividade Especial*. São Paulo: Livraria da Física, 2015.

MASCART, É. É. N. Sur les modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur (deuxième partie). *Annales scientifiques de l'É.N.S.* 2e série, tome 3 (1874), p. 363-420

MAXWELL, J. C. *Matter and Motion*. London: The Sheldon Press, 1925.

———. *Treatise on Electricity and Magnetism*. 2 vols. 3rd ed. Dover, New York, 1954.

MCCOMAS, W. F. Ten Myths of Science: Reexamining What We Think We Know About the Nature of Science. *School Science and Mathematics*; 96, 1, v. 96, n. 1 (1996), pp. 10-16.

MCCOMAS, W. F. ALMAZROA, H. CLOUGH, M. P. The nature of Science in Science education: An introduction. *Science & Education*, v. 7, n. 6 (1998), p. 511-532.

MEHRA, J. *Einstein, Hilbert, and the Theory of Gravitation*. Dordrecht: D. Reidel, 1974.

———. *The Golden age of Theoretical Physics, vol. 1*. London: World Scientific Publishing, 2001.

MIE, G. Grundlagen einer Theorie der Materie (Dritte Mitteilung). *Annalen Der Physik* 40 (1913): pp. 1-66.

MILLER, A. I. A Study of Henri Poincaré's 'Sur la dynamique de l'électron.' *Archive for History of Exact Sciences* 10 (1973): pp. 207-328.

———. *Frontiers of Physics: 1900-1911: Selected Essays*. New York: Springer, 1986.

———. Why did Poincaré not formulate special relativity in 1905, in: *Henri Poincaré Science et Philosophie— Congrès International Nancy France 1994*, Jean-Louis Greffe, Gerhard Heinzmann and Kuno Lorenz, eds., Blanchard, Paris, 1996, pp. 69–100.

———. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity. Emergence (1905) and Early Interpretation (1905–1911)*. New York: Springer, 1997.

MINKOWSKI, H. Die Grundgleichungen fr die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern. *Nachrichten — Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, (1908): pp. 53–111.

———. Das Relativitätsprinzip. *Jahresbericht der deutschen Mathematiker-Vereinigung* 24 (1916): pp. 372–382.

———. *Espaço e Tempo*. In: Textos Fundamentais da Física Moderna - I Volume: O Princípio da Relatividade, p.93-114. 3ª. ed, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1958.

MISNER, C. W. THORNE, K. S. WHEELER, J. A. *Gravitation*. . New York: W. H. Freeman and Company, 1973.

MOURA, B. A. O que é natureza da Ciência e qual sua relação com a História e Filosofia da Ciência? *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 7, n. 1 (2014), pp. 32-46.

NABER, G. L. *The Geometry of Minkowski Spacetime: An Introduction to the Mathematics of the Special Theory of Relativity*. New York: Springer, 2012.

NETO, J. B. *Matemática para físicos com aplicações: Vetores, tensores e spinors (I)*. São Paulo: Livraria da Física, 2010.

NORTON, J. Einstein, Nordström and the early demise of scalar, Lorentz covariant theories of gravitation. *Archive for History of Exact Sciences* 45 (1992): pp. 17–94.

NUSSENZVEIG, M. H. *Curso de Física Básica - Ótica, Relatividade, Física Quântica - Vol. 4*. 2ª ed., São Paulo: Blucher, 2011.

ÖZDEMİR, M. Introduction to Hybrid Numbers. *Adv. Appl. Clifford Algebras* 28:11 (2018).

PAINLÉVE, P. *Les axiomes de la mécanique, Examen critique - Note sur la propagation de la lumière*. Paris: Gauthier-Villars, 1922.

PAIS, A. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxonia: Oxford University Press, 1982.

PAULI, W. *The Theory of Relativity*. New York: Dover, 1958.

PERUZZO, J. *Teoria da Relatividade*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2012.

PIRES, A. S. T. *Evolução das Ideias da Física*. 2º ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

PINSKY, C. B. (Org.). *Fontes Históricas*. São Paulo: Contexto, 2006.

PINSKY, C. B. LUCA, T. R. (Orgs.). *O Historiador e suas fontes*. São Paulo: Contexto, 2011.

PLANCK, M. Das Prinzip der Relativität und die Grundgleichungen der Mechanik, *Verhandlungen Deutsche Physikalische Gesellschaft*. 8 (1906), pp. 136–141.

———. *Zur Dynamik bewegter Systeme*, Sitzungsberichte der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften, Berlin, *Erster Halbband* 29 (1907): pp. 542-570

POINCARÉ, J. H. Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique *Acta mathematica*, 13 (1890), pp. 1-270

———. Sur le problème des trois corps. *Bulletin astronomique*, 8 (1891), pp. 12-24

———. *Les Methodes Nouvelles de la Mécaniques Céleste*, vol. 1. Gauthier-Villar, Paris, 1892.

———. *Les Methodes Nouvelles de la Mécaniques Céleste*, vol. 2. Gauthier-Villar, Paris, 1893a.

———. Mécanisme et expérience. *Revue de métaphysique et de morale*, 1 (1893b), pp. 534-537

———. A propos de la théorie de M. Larmor. *Éclairage électrique*, 3 (1895), pp. 5-13, 285-295

———. La mesure du temps. *Revue de Métaphysique et de Morale* 6 (1): pp. 1-13 (1898)

———. Des fondements de la géométrie; à propos d'un livre de M. Russell. *Revue de métaphysique et de morale*, 7 (1899a), pp. 251-279

Les Methodes Nouvelles de la Mécaniques Céleste, vol. 2. Gauthier-Villar, Paris, 1899b.

———. Sur l'équilibre d'un fluide en rotation. *Bulletin astronomique*, 16 (1899c.), pp. 161-169

———. Sur les rapports de la physique expérimentale et de la physique mathématique. In: GUILLAUME, C.-É. POINCARÉ. (org.) *Rapports présentés au congrès international de physique*. Volume 1. France: Gauthier-Villars, 1900a, pp. 1-29.

———. La théorie de Lorentz et le principe de réaction *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles*, 5 (1900b), pp. 252-278.

———. La mesure de la terre et la géodésie française. *Bulletin de la Société astronomique de France*, 14 (1900c), pp. 513-521.

———. La géodésie française (discours prononcé à la séance des cinq Académies le 25 octobre 1900). *Mémoires de l'Institut*, 20 (1900d), pp. 13-25

———. Rapport sur le projet de révision de l'arc méridien de Quito. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences de Paris*, 131 (1900e), pp. 215-236

———. Sur les principes de la géométrie; réponse à M. Russell. *Revue de métaphysique et de morale*, 8 (1900f), pp. 73-86.

———. Les relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique. *Revue scientifique*, 14 (1900g), pp. 705-715

———. Sur les principes de la mécanique. In: COLIN, A. *Bibliothèque du Congrès international de philosophie*, Volume 1. 1901a, pp. 457-494.

———. [Carta] 1901b-08. Paris para LARMOR, J. Cambridge. 1f. Poincaré pergunta sobre as experiências que seriam conduzidas pelos ingleses para testar a hipótese de Crémieu sobre a eletrodinâmica dos condutores em movimento.

———. [Carta] 1901c-12-14. Paris para LEVI-CIVITA, T. Milão. 1f. Poincaré responde as objeções que Levi-Civita havia feito sobre um artigo de Poincaré acerca da eletrodinâmica dos condutores em movimento.

———. *La Science et l'Hypothèse*. Flammarion, Paris, 1902a.

- Notice sur la télégraphie sans fil. *Annuaire du Bureau des longitudes*, A1 -A34, 1902b.
- La télégraphie sans fil. *Revue scientifique*, 17 (1902c), pp. 65 -73
- Rapport présenté au nom de la Commission chargée du contrôle scientifique des opérations géodésiques de l'Equateur. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences de Paris*, 136 (1903), pp. 861-871
- . L'état et l'avenir de la Physique mathématique. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, vol 28 (1904a), p. 302-324.
- *Maxwell's Theory and Wireless Telegraphy*. New York: McGraw Publishing Co, 1904b.
- *Cours d'électricité théorique: étude de la propagation du courant en période variable, sur une ligne munie de récepteur*. Paris: École professionnelle supérieure des postes et des télégraphes, 1904c.
- La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes; La télégraphie sans fil. *Scientia*, série physico-mathématique, 23, C. Naud, 1904d.
- *La Valeur de la Science*. Flammarion, Paris, 1905a.
- [Carta] 1905b-04-21-27. Paris para LORENTZ, H. Paris. 1f. Poincaré pede desculpas por não poder recepciona-lo em sua chegada à Paris e agradece por Lorentz tê-lo enviado seus trabalhos mais recentes.
- [Carta] 1905c-05. Paris para LORENTZ, H. Paris. 1f. Poincaré pede desculpas por não poder ter a palestra de Lorentz e discute a transformação de densidade de carga de seu ensaio de 1904.
- [Carta] 1905d-05. Paris para LORENTZ, H. Paris. 2f. Poincaré informa a Lorentz a descoberta do Grupo de Lorentz, porém informa que ainda não conseguiu conciliar o modelo de Lorentz com a dinâmica do elétron.
- [Carta] 1905e-05. Paris para LORENTZ, H. Paris. 1f. Poincaré anuncia a Lorentz que conseguiu provar que a sua teoria é a única compatível com o princípio da Relatividade e a descoberta das tensões de Poincaré.
- Sur la dynamique de l'électron. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. 140, p. 1504–1508, 5 juin 1905g
- Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo* 21 (1906): 129–176
- . La dynamique de l'électron. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 19 (1908a), pp. 386-402.
- . *La Science et le Méthode*. Flammarion, Paris, 1908b.
- La mécanique nouvelle. *Revue Scientifique* 84 (1909): pp. 170–177.
- La mécanique nouvelle. In: *Sechs Vorträge über ausgewählte Gegenstände Aus der reinen Mathematik und mathematischen Physik*, B.G. Teubner, Leipzig and Berlin, 1910a, pp. 49–58.
- Die neue Mechanik. *Himmel und Erde* 23 (1910b): pp. 97–116.
- *Dernières pensées*. Paris: Flammarion, 1913.
- Les Limites de la Loi de Newton. *Bulletin Astronomique* 17 (1953): pp. 121–269.

——— *Oeuvres*, Tome 9. Paris: Gauthier-Villars, 1954.

POINCARÉ, H. J. MITTAG-LEFFLER, Gösta (authors). Nabonnand, Philippe (Ed.). *La Correspondance entre Henri Poincaré et Gösta Mittag-Leffler*. New York: Birkhäuser, 1998.

POINCARÉ, H. J. et al (authors). WALTER, Scott A., BOLMONT, Etienne, CORET, André (Eds.). *La correspondance entre Henri Poincaré et les physiciens, chimistes et ingénieurs*. New York: Birkhäuser (Springer), 2007.

POINCARÉ, H. J. et al (authors). WALTER, S.A., NABONNAND, P., KRÖMER, R., SCHIAVON, M. (Eds.). *La correspondance entre Henri Poincaré, les astronomes, et les géodésiens*. New York: Birkhäuser (Springer), 2016.

POINCARÉ, H. J. et al (authors). ROLLET, Laurent (Ed.). *La correspondance de jeunesse d'Henri Poincaré: Les années de formation. De l'École polytechnique à l'École des Mines (1873-1878)*. New York: Birkhäuser (Springer), 2017.

POLANYI, M. *Personal Knowledge: Towards a Post-Critical Philosophy*. Nova York, Harper & Row, 1962.

POODIACK, R. D. LECLAIR, K. J. Fundamental Theorems of Algebra for the Perplexes. *The College Mathematics Journal*, Vol. 40, No. 5 (November 2009), pp. 322-335.

PROKHOVNIK, S. J. Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 25, No. 4 (Dec., 1974), pp. 336-340

PROST, Antoine. *Doze Lições Sobre a História*. Belo Horizonte: Autêntica, 2008.

PYENSON, Lewis. Hermann Minkowski and Einstein's Special Theory of Relativity. *Archive for History of Exact Sciences* (1977): pp. 71–95.

——— Einstein's Education: Mathematics and the Laws of Nature. *Isis* 71:3 (1980), pp. 399-425.

QUEIRÓS, W. P. *A articulação das culturas humanística e científica por meio do estudo histórico-sociocultural dos trabalhos de James Prescott Joule: contribuições para a formação de professores universitários em uma perspectiva transformadora*. Tese de Doutorado em Educação para a Ciência, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, 2012;

REID, M. S. *Geometry and Topology*. New York: Cambridge University, 2005.

REIGNIER, J. Poincaré synchronization: From the local time to the Lorentz group. *Proceedings of the Symposium Henri Poincaré* (Brussels, 8-9 October 2004).

RENN, J. (Org.) *The Genesis of General Relativity, 4 Volumes*. New York: Springer, 2007.

RESNICK, R. *Introdução à Relatividade Especial*. São Paulo: Polígono, 1971.

RICHMAN, S. Resolving discordant Results: Modern Solar Oblateness Experiments. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 27 (1996): pp. 1–22.

ROCHA JR. R. *Álgebra Linear e Multilinear*. São Paulo: Livraria da Física, 2017.

ROSA, P. S. *Louis de Broglie e as ondas de matéria*. Dissertação de Mestrado em História da Ciência, Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Universidade Estadual de Campinas, 2004.

ROSENBERG, M. *Comunicação não-violenta: técnicas para aprimorar relacionamentos pessoais e profissionais*. São Paulo: Editora Ágora, 2006.

ROSEVEARE, N. T. *Mercury's Perihelion from Le Verrier to Einstein*. Clarendon Press, Oxford, U.K, 1982.

ROSSER, W. G. V. *Classical Eletromagnetism via Relativity: An Alternative Aprroach to Maxwell's Equations*. New York: Springer, 1968.

ROWE, D. E. SAUER, T. WALTER, S. (eds.). *Beyond Einstein Perspectives on Geometry, Gravitation, and Cosmology in the Twentieth Century*. New York: Springer, 2018.

RUNGE, C. Benekesche Preisstiftung. *Nachrichten—Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, (1909): pp. 37–41.

SANCHEZ, E. *Cálculo Tensorial*. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

SCHAFFNER, Kenneth F. Einstein versus Lorentz: Research Programmes and the Logic of Comparative Theory Evaluation. *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 25, No. 1 (Mar., 1974), pp. 45-78

SCHRÖTER, J. *Minkowski Space: The Space-time of Special Relativity*. Wisconsin: De Gruyter, 2017

SEARLE, G. F. C. Problems in Electric Convection. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, Volume 187 (1886), pp. 675-713

———. On the steady motion of an electrified ellipsoid. *Philosophical Magazine* [series 5] 44 (1887), pp. 329.

SEARS, F. ZEMANSKY, M. W.. *Física IV - Ótica e Física Moderna*. 17ª ed., São Paulo: Pearson, 2016.

SEELIGER, Hugo von. Das Zodiakallicht und die empirischen Glieder in Bewegung der innern Planeten. *Königlich Bayerische Academie der Wissenschaften (München)*. *Sitzungsberichte* 36 (1906): pp. 595–622.

SÈGRE, E. *From Falling Bodies to Radio Waves: Classical Physicists and Their Discoveries*. Chicago: Dover, 1984.

SEYBOLD, A. The Fourth Dimension. *The Mathematics Teacher*, Vol. 24, No. 1 (January 1931), pp. 41-45

SHANKLAND, R. S. Conversations with Albert Einstein, *American Journal of Physics*, v.31 (1963): pp. 47-57

SIEGEL, Daniel M. Classical-Electromagnetic and Relativistic Approaches to the Problem of Non integral Atomic Masses. *Historical Studies in the Physical Sciences* 9 (1978): pp. 323–360.

de SITTER, Willem. On the Bearing of the Principle of Relativity on Gravitational Astronomy, *Monthly Notes of the Royal Astronomical Society* 51 (1911): pp. 388–415.

———. The Secular Variations of the Elements of the Four Inner Planets, *Observatory*, 36 (1913): pp. 296–303.

SMITH, Crosbie and Wise, M. Norton. *Energy and Empire — A Biographical Study of Lord Kelvin*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K, 1989.

SNOW, C. P. *As Duas Culturas e uma Segunda Leitura*. São Paulo: Edusp, 1995.

SOLOVINE, Maurice. Prefácio. In: Einstein, A. *Lettres à Maurice Solovine*, Paris: Gauthier-Villars, 1956.

SOMMERFELD, Arnold. Zur Relativitätstheorie II: Vierdimensionales Vektoranalysis *Annalen der Physik* 33 (1910): pp. 649–689.

———. *Eletrodynamics*. Amsterdam: Elsevier, 1952.

SOUTHERNS, L. A Determination of the Ratio of Mass to Weight for a Radioactive Substance. *Royal Society of London. Proceeding A* 84 (1910): pp. 325–344.

SPONSEL, A. Constructing a ‘revolution in science’: the campaign to promote a favourable reception for the 1919 solar eclipse experiments. *The British Journal for the History of Science*. v. 35, Issue 04, (December 2002), pp 439 - 467

STACHEL, J. *The Collected Papers of Albert Einstein, vol. 2, The Swiss Years: Writings 1900-1909*, Princeton: Princeton University Press, 1989.

———. History of Relativity. in: *Twentieth Century Physics*, vol. 1, L.M. Brown, A. Pais and B. Pippord, eds., Institute for Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1995, pp. 249–356.

———. *Einstein from ‘B’ to ‘Z’*. New York: Springer, 2005.

SYNGE, J. M. *Plays, Poems, and Prose*. London: Everyman, 1941.

TALMEY, M. *The Relativity Theory Simplified and the Formative Period of Its Inventor*. New York: Falcon Press, 1932.

TAYLOR, E. F. WHEELER, J. A. *Space-Time Physics*. New York: W. H. Freeman and Company, 2000.

TENENBLAT, K. *Introdução à Geometria Diferencial*. São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

THEISSEN, G. *O Jesus Histórico*. São Paulo: Loyola, 2018.

THOMPSON, E. P. *Costumes em Comum*. São Paulo: Companhia Das Letras, 2016.

TSAMPARLIS, M. *Special Relativity: An Introduction with 200 Problems and Solutions*. New York: Springer, 2010.

VAZ JR, J. A Álgebra Geométrica do Espaço-tempo e a Teoria da Relatividade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 22, nº. 1, Março, 2000.

VAZ JR, J. ROCHA JR. R. *Álgebras de Clifford e Espinores*. São Paulo: Livraria da Física, 2017.

VOIGT, W. Ueber das Doppler'sche Princip. *Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften und der Georg-Augusts-Universität zu Göttingen* aus dem Jahre, 1887.

WALTER, Scott. Henri Poincaré’s student notebooks, 1870–1878. *Philosophia Scientiae* 1 (1996), pp. 1–17.

———. Minkowski, Mathematicians, and the Mathematical Theory of Relativity. In *The Expanding Worlds of General Relativity*, H. Goenner et al. eds. (Einstein Studies 7), Birkhäuser, Basel, (1999), pp. 45–86.

———. Forthcoming. Breaking in the 4-vectors: the four-dimensional movement in gravitation, 1905–1910. *The Genesis of General Relativity Vol. 3: Theories of Gravitation*

in the Twilight of Classical Physics; Part I, J. Renn and M. Schemmel, eds., Kluwer, Dordrecht, 2007;

——— Henri Poincaré et l'espace-temps conventionnel. *Cahiers de philosophie de l'université de Caen*, 45 (2008) pp. 87-119

———. Hermann Minkowski and the Scandal of Spacetime. *ESI News* 3(1), Spring 2008, pp. 6–8

——— Henri Poincaré, theoretical Physics, and Relativity Theory in Paris. pp. 213-239, in: SCHLOTE, Karl-Heinz (ed.), SCHNEIDER, Martina (ed.). *Mathematics Meets Physics: A contribution to their interaction in the 19th and the first half of the 20th century*. Frankfurt: Verlag Harri Deutsch, 2011.

——— Poincaré on clocks in motion. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 47:1 (2014), pp. 131–141,

———. Poincaré-Week in Göttingen, in light of the Hilbert-Poincaré correspondence of 1908–1909. In Borgato, Maria Teresa. Neuenschwander, Erwin. Passeron, Irène. (eds). *Mathematical Correspondences and Critica*, 2019.

WHITROW, G. *O Tempo na História: concepções do tempo da pré-história aos nossos dias*. Rio de Janeiro: Zahar, 1993.

WHITTAKER, E. T. *A history of the theories of aether and electricity*. 2 vols. New York: American Institute of Physics, 1953.

ZAHAR, Elie. Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (I). *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 24, No. 2 (Jun., 1973), pp. 95-123

——— Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II). *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 24, No. 3 (Sep., 1973), pp. 223-262.

——— Einstein's Debt to Lorentz: A Reply to Feyerabend and Miller *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 29, No. 1 (Mar., 1978), pp. 49-60.