

Propostas para o Ensino de Ciências Naturais e Educação Ambiental

Volume Número Ano

ISSN 0000-0000



ABORDAGEM DO EFEITO FOTOELÉTRICO NO ENSINO MÉDIO: CONTRIBUIÇÕES DE UMA UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

Ronivan Sousa da Silva

Mestrado em Ensino de Ciências

Instituto de Física

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



SUMÁRIO

Apresentação	4
Etapa 01: Avaliação de Diagnóstico Inicial	5
Etapa 02 – Atividade de ensino para construção dos subsunçores	8
Etapa 03 – Os modelos propostos para natureza da luz até a Era Pré-Física Quântica	8
Etapa 04: Interpretações iniciais do Efeito Fotoelétrico e utilização de simulação computacional com roteiro de estudo – Primeira Parte	9
Etapa 05: Interpretações da Física Clássica para o Efeito Fotoelétrico e a proposta do modelo corpuscular de Albert Einstein para a luz	15
Etapa 06: Resolução de exercícios; mapa conceitual e a rejeição da comunidade científica das ideias de Einstein	15
Etapa 07: Utilização de simulação computacional com roteiro de estudo – Segunda Parte.....	16
Etapa 08: Efeito Compton (1921), a aceitação da comunidade científica das ideias de Einstein e Princípio da Complementariedade de Bohr	21
Banco de Questões	22
Tarefa 1	28
Tarefa 2	30
Tarefa 3	31
Anexo A - Aspectos da História da Ciência e seu processo evolutivo	33
1. Os diversos modelos propostos para a natureza da luz.....	33
2. O contexto histórico da descoberta do Efeito Fotoelétrico por hertz.....	43
3. A explicação de Phillip Von Lenard para o Efeito Fotoelétrico	45
4. O modelo corpuscular de Albert Einstein como teoria rival à hipótese de Phillip Von Lenard	47
5. A rejeição da comunidade científica à proposta de Einstein e o experimento de Robert Millikan	49
6. A explicação do efeito Compton como fator definitivo para aceitação do modelo corpuscular de Albert Einstein pela comunidade científica.....	50
7. O conceito de dualidade onda-partícula	51
8. A Teoria Quântica de Campos – Uma possível resposta determinística	53
Anexo B – As máquinas fotográficas digitais e o <i>chip</i> CCD	56
Anexo C - Sistema Automático de Iluminação Pública	58

Anexo D - Mapa conceitual para natureza dual da luz	60
Referências	61

PRODUTO: UMA UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA PARA O ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO MEDIANTE O USO DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ALUNOS DE NÍVEL MÉDIO.

APRESENTAÇÃO

Apresenta-se um produto que envolve o uso de aspectos de história da ciência complementada pela utilização simulação computacional por meio de um roteiro de aula, para alunos do terceiro ano do ensino médio, visando a assimilação de conceitos de física moderna, mais especificamente, do efeito fotoelétrico com embasamento na teoria da aprendizagem significativa.

O produto educacional é constituído por questionários, vídeos, texto e o roteiro de atividades que os alunos usarão para se orientar no manuseio da simulação computacional. Busca-se com esta sequência propiciar ao aluno a diferenciação progressiva e reconciliação integrativa do fenômeno proposto para estudo, tendo como base fundamental a teoria de Ausubel et al. (1980).

Ao final, apresenta-se uma sugestão de utilização do produto a partir das considerações feitas com o suporte do referencial teórico escolhido.

Nesta seção apresentamos os materiais utilizados para compor nossa unidade de ensino potencialmente significativa, a saber: a avaliação de diagnóstico inicial; as duas partes do roteiro de atividades que os alunos usaram para o manuseio da simulação computacional; o mapa conceitual do efeito fotoelétrico e o banco de questões organizados de acordo com a Taxonomia Revisada de Bloom (2001). Por fim, anexamos três listas de exercícios a serem utilizadas como tarefas.

Etapa 01: Avaliação de Diagnóstico Inicial – (01 aula)

De acordo com os princípios de nosso referencial teórico para estruturação desta unidade de ensino, a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), deve-se primeiramente tentar conhecer a estrutura cognitiva dos alunos para identificar a clareza e estabilidade dos conhecimentos prévios necessários para ancoragem dos novos conceitos físicos. Assim, elaboramos uma avaliação de diagnóstico inicial visando classificar os seguintes conhecimentos prévios relevantes (subsunçores) presentes na estrutura cognitiva dos alunos: 1) Estrutura atômica; 2) Ondas eletromagnéticas; 3) Natureza da luz; 4) Efeito fotoelétrico; 5) Operações matemáticas e sistema internacional de unidades de medidas; 6) Lei de Conservação da Energia.

Nas questões propostas buscam-se subsunçores sobre o modelo de átomo de Bohr-Rutherford, bem como ideias sobre existência de partículas subatômicas e suas propriedades. Também se investiga as propriedades das ondas eletromagnéticas, tais como: relação entre comprimento de onda e frequência, relação entre intensidade e energia, características das ondas eletromagnéticas, divisão do espectro eletromagnético, luz visível, equação fundamental de uma onda. Na questão 09, em especial, tem-se o interesse em identificar a habilidade do aluno em converter unidades de medidas e na manipulação de números com notação científica. Por fim, procuramos encontrar no aluno conceitos estruturados sobre conservação e transferência de energia e sobre a possibilidade da interpretação dual dos fenômenos físicos.

O tempo estimado para a resolução da avaliação de diagnóstico inicial é de 45 minutos.

AVALIAÇÃO DE DIAGNÓSTICO INICIAL

Nome: _____

Data: __/__/__

Questão 01) Justifique a (s) afirmativa (s) que você considera errada (s) sobre a estrutura atômica como ela é compreendida atualmente.

- a) O átomo é constituído somente de núcleo, análogo a uma esfera de bola de bilhar.
- b) Os prótons, nêutrons e elétrons são partículas subatômicas que estão dentro do núcleo.
- c) O elétron é uma partícula subatômica carregada positivamente.
- d) Os elétrons podem ser arrancados de um átomo de sódio utilizando um feixe de luz.
- e) Os elétrons estão completamente livres no arranjo molecular de uma superfície metálica.

Questão 02) Justifique a (s) afirmativa (s) falsa (s) sobre a luz, de acordo com o eletromagnetismo clássico.

- a) A luz azul é considerada de alta frequência porque é uma onda longa, isto é, possui grande comprimento de onda.
- b) O espectro eletromagnético é dividido em quatro partes. Em ordem crescente de frequência são: ondas de rádio, luz visível, ultravioleta e raios-x.
- c) Ondas eletromagnéticas não transportam ou transferem energia, somente as ondas mecânicas.
- d) Uma luz vermelha pode transportar uma quantidade de energia maior que a luz azul, desde que tenha maior intensidade (brilho).
- e) Uma luz vermelha nunca poderá transportar uma quantidade de energia maior que a luz azul, pois possui menor frequência.

Questão 03) Justifique a (s) afirmativa (s) que você considera errada (s) sobre a natureza da luz.

- a) Atualmente a luz é compreendida somente como sendo formada por partículas, chamadas fótons.
- b) Atualmente a luz é compreendida somente como uma onda mecânica, análogo às ondas sonoras.
- c) Atualmente a luz é compreendida somente como uma onda eletromagnética, análogo às ondas de rádio.
- d) A propriedade da luz sofrer interferência e difração evidencia que sua natureza é ondulatória.
- e) O experimento de fenda dupla de Thomas Young em 1801 provou definitivamente que a luz é formada por partículas.

Questão 04) Justifique a (s) afirmativa (s) que você considera errada (s) sobre o efeito fotoelétrico.

- a) O efeito fotoelétrico pode ocorrer utilizando-se qualquer tipo de radiação eletromagnética, desde que haja intensidade suficiente.
- b) O efeito fotoelétrico somente pode ser explicado se é assumido que a luz é formada de partículas, denominadas fótons.
- c) A energia de um fóton é quantizada, sendo diretamente proporcional ao valor do comprimento de onda da luz.
- d) Na explicação de Einstein é assumido que a luz não pode transferir energia para os elétrons que compõem a chapa metálica.
- e) De acordo com Einstein, a intensidade de luz está relacionada com a energia transportada por um fóton.
- f) Fótons são partículas de energia, sem massa, sem carga elétrica, e que podem ser completamente absorvidas.

Questão 05) Transforme as seguintes unidades de medidas. **Utilize notação científica!**

- a) 300 000 km: _____ m
- b) 5 000 mm: _____ m
- c) 3000 μm : _____ m
- d) 700 nm: _____ m
- e) 8,15 m: _____ cm

Questão 06) Para cada uma das grandezas abaixo, escreva sua respectiva **unidade no Sistema Internacional de Unidades (SIU)**.

- a) Velocidade \rightarrow _____
- b) Frequência de onda \rightarrow _____
- c) Comprimento de onda \rightarrow _____
- d) Energia \rightarrow _____

Questão 07) As antenas das emissoras de rádio emitem ondas eletromagnéticas que se propagam na atmosfera com a velocidade de $3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ e com frequências que variam de uma estação para a outra. A rádio Tupi-Guarani, de Aquidauana-MS, emite uma onda de frequência 150 MHz. Calcule o valor do comprimento de onda, **em metros**.

Dados: $1,0 \text{ MHz} = \text{megahertz} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ Hz}$.

Questão 08) Uma bola de tênis é abandonada de uma altura de 2,0 m. Após chocar-se com o chão, ela retorna e atinge uma altura máxima de 1,4 m. Utilizando a **Lei de Conservação da Energia**, explique por que a bola retornou a uma altura menor.

Questão 09) Responda as seguintes perguntas:

- a) O que é uma corrente elétrica?
- b) Como uma corrente elétrica é criada em um circuito elétrico?

Questão 10) Explique por que um fio de prata é melhor condutor de eletricidade do que um fio de cobre?

Questão 11) Com base em seus estudos anteriores, é possível que um mesmo fenômeno físico, tenha duas explicações totalmente contraditórias? Se sim, dê um exemplo dessa situação.

Etapa 02 – Atividade de ensino para construção dos subsunçores (02 aulas)

Uma vez que é possível encontrar qualquer resultado na avaliação de diagnóstico inicial, sugerimos uma estratégia de ensino caso muitos alunos não apresentem os conhecimentos prévios relevantes, pois estes são **essenciais e indispensáveis** para o processo de ancoragem dos novos conceitos. Logo, como forma mais rápida e eficaz para realçar e/ou promover os subsunçores, propomos que o professor faça a correção da avaliação de diagnóstico inicial junto com alunos em sala de aula. Nesta situação, o professor poderá fazer os comentários e recordar ou enfatizar as informações mais importantes acerca dos conceitos investigados.

Como tarefa para aula seguinte, preparamos uma lista contendo 13 exercícios (**Tarefa 1**) a fim clarificar e estabilizar os conceitos prévios referentes ao subsunçor “Ondas Eletromagnéticas”, pois em nossas experiências de aplicação desta unidade de ensino, este foi o conceito em que os alunos apresentaram maiores dificuldades. Caso seja possível, é bastante recomendável que o professor solicite seminários para aula seguintes sobre os subsunçores investigado. O tempo estimado para a resolução comentada da avaliação de diagnóstico inicial é de 90 minutos.

Etapa 03 – Os modelos propostos para natureza da luz até a Era Pré-Física Quântica (01 aula).

Em nossa proposta, a aprendizagem significativa de conceitos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) deve-se somar ao enfoque histórico do conteúdo abordado. Acreditamos que esse tipo de discussão mais aprofundada dos problemas enfrentados pelos modelos da Física Clássica no início do século 20 e as soluções controversas apresentadas por essa “nova Física” deva ser a porta de entrada para introdução de tópicos de FMC. Por isso, reforçamos a sugestão de que o professor faça um resgate histórico dos diversos modelos propostos para a natureza da luz até o ano de 1900. Para tal fim, fizemos uma busca em diversos artigos da literatura nacional e internacional e elaboramos um texto descritivo sobre os diversos modelos construídos para a natureza da luz. Este material encontra-se presente no Anexo A deste produto.

Sugerimos que o momento mais adequado para apresentação deste resgate histórico seja durante do segundo ano do ensino médio, antes da introdução do conteúdo de ótica, pois assim o professor poderá apresentar o estudo dos fenômenos óticos como conhecimentos que visam a compreensão da natureza da luz por meio de propriedades. Caso isso não seja possível, esta aula deve permanecer como a terceira etapa de nossa unidade de ensino.

O tempo estimado para fazer este resgate histórico é de 45 minutos utilizando uma abordagem expositiva e dialogada. No entanto, é bastante recomendável, caso haja tempo suficiente, a leitura do texto em sala de aula.

Etapa 04: Interpretações iniciais do Efeito Fotoelétrico e utilização de simulação computacional com roteiro de estudo – Primeira Parte - (02 aulas).

No intuito de evidenciar a aplicabilidade tecnológica do Efeito Fotoelétrico, os alunos irão ler dois textos, intitulados “As máquinas fotográficas digitais e o chip “Dispositivo de Carga Acoplada (CCD)” e “O Efeito Fotoelétrico no cotidiano” respectivamente. O primeiro texto exemplifica como esse fenômeno é largamente empregado em sensores e câmeras digitais enquanto que no segundo texto é explicado como funciona um sensor LDR (resistência dependente de luz). Este dispositivo é utilizado para o acionamento automático do sistema de iluminação pública. Tais textos encontram-se presente nos Anexo B e C.

Nesta aula o professor apresentará aos alunos o Efeito Fotoelétrico conceitualmente. Para isso, o professor deve destacar quando e por quem este fenômeno foi observado pela primeira vez e estudado de modo mais aprofundado. Em seguida, o professor deverá construir com os alunos as principais previsões da Física Clássica para o experimento do Efeito Fotoelétrico.

Em seguida, o professor apresentará e comentará as conclusões experimentais obtidas pelo físico Philip Lenard (1902). Logo após, o professor deve discutir a “Hipótese de Disparo” de Lenard (1902) para explicar os resultados inesperados do experimento do Efeito Fotoelétrico. Nesta hipótese, é proposto que não deve haver um processo de transferência de energia da luz incidente para os elétrons. A luz apenas dispararia o elétron. Desta forma, nenhuma das previsões do modelo ondulatório estariam incorretas. O texto de História da Ciência, em anexo, contém todas informações relevantes para o professor preparar esta aula. Esta primeira parte da aula foi estimada em 45 minutos.

O próximo passo é o uso da simulação computacional¹. Já na sala de informática, com a simulação funcionando em todas as máquinas, o professor auxiliará os alunos a identificar as variáveis envolvidas no aplicativo. Em seguida, ele deverá comentar a principal simplificação da simulação: emissão perpendicular dos fotoelétrons com a energia cinética máxima igual para todos. Assim, o professor deve solicitar aos alunos que selecionem a opção **“mostre apenas os elétrons mais energéticos”**.

Recomenda-se que os alunos executem as atividades propostas preferencialmente sozinhos. O roteiro de atividades foi elaborado para auxiliar o aluno a perceber gradualmente a influência que cada variável exerce no fenômeno. As atividades deverão ser entregues de maneira sequencial, isto

¹ Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/photoelectric. Acessado em 30/09/2014.

é, o professor deverá entregar ao aluno a atividade 02 somente após este terminar a atividade 01, e assim por diante. Ao final da aula o professor recolherá os roteiros de atividades para posterior correção. Tais atividades devem ser entregues aos alunos devidamente corrigidas e comentadas na próxima aula. Como tarefa para aula seguinte, sugerimos que os alunos deverão elaborar um texto descrevendo o aparato virtual do experimento do Efeito Fotoelétrico, bem como construir uma tabela onde será possível comparar as previsões do modelo ondulatório e as conclusões obtidas nas três atividades propostas no roteiro. Esta segunda parte da aula foi estimada em 45 minutos.

ROTEIRO DE ATIVIDADES – UTILIZANDO UMA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 1ª Parte

NOME: _____

DATA: ___/___/___

Este roteiro tem o objetivo de orientá-lo no desenvolvimento das atividades sobre o efeito fotoelétrico. Nesta atividade será usada uma simulação computacional para relacionar as propriedades do fenômeno em questão. Portanto, **procure seguir todas as etapas da maneira como elas são apresentadas**, e em caso de dúvida em como executá-la, busque ajuda com o professor.

Introdução à simulação

Abra a simulação no local indicado pelo professor.

- (a) Identifique na simulação como podemos alterar a intensidade da luz;
- (b) Identifique na simulação como podemos alterar o comprimento de onda;
- (c) Localize na simulação o amperímetro, onde está escrito “corrente: 0,000”;
- (d) Localize a pilha e identifique a maneira pela qual podemos alterar sua tensão;
- (e) Identifique no lado direito da simulação, onde podemos mudar o tipo de placa de metal que está dentro da ampola de vidro. As opções são: sódio, zinco, cobre, platina, cálcio e magnésio;
- (f) As outras opções serão usadas mais adiante.

ATIVIDADES:

Agora daremos início à execução da simulação. Certifique-se que na simulação está selecionada a opção “**mostre apenas os elétrons mais energéticos**” e os seguintes valores:

- A intensidade está em 0 %,
- O comprimento de onda está em 601 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.

ATIVIDADE 01:

1. Encontre a opção de alterar a intensidade de luz. Altere o valor da intensidade da luz para 20% e observe o que ocorre.
2. Qual a intensidade da corrente elétrica que está marcando no amperímetro?

R: _____

3. Altere o valor da intensidade de luz para 40% e observe o que ocorre.
4. Qual a intensidade da corrente elétrica que está marcando no amperímetro agora?

R: _____

5. Altere o valor da intensidade de luz para 60% e observe o que ocorre.
6. Qual a intensidade da corrente elétrica que está marcando no amperímetro agora?

R: _____

7. Altere o valor da intensidade de luz para 80% e observe o que ocorre.
8. Qual a intensidade da corrente elétrica que está marcando no amperímetro agora?

R: _____

9. Altere o valor da intensidade de luz para 100% e observe o que ocorre.
10. Qual a intensidade da corrente elétrica que está marcando no amperímetro agora?

R: _____

11. Após a execução destas 10 etapas, qual conclusão você obteve?

12. Mantendo a intensidade de luz igual a 100%, altere a voltagem da bateria para diversos valores e verifique sua influência na ocorrência do efeito fotoelétrico. Qual conclusão você obteve sobre a relação entre voltagem e corrente elétrica?

ATIVIDADE 02

Certifique-se que a simulação apresente os seguintes valores:

- A intensidade está em 10 %,
- O comprimento de onda está em 850 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.

1. Encontre a opção para alterar o comprimento de onda da luz. **Diminua bem lentamente o valor do comprimento de onda** até o momento em que algum elétron é “ejetado”. Qual o valor do comprimento de onda neste instante?

R: _____

2. Explique a relevância deste valor para a ocorrência do fenômeno.

3. Altere o valor do comprimento de onda para 350 nm. A **rapidez (velocidade)** dos elétrons aumentou, diminuiu ou permanecer a mesma?

4. Altere o valor do comprimento de onda para 199 nm. A **rapidez (velocidade)** dos elétrons aumentou, diminuiu ou permanecer a mesma?

5. Após a execução destas quatro etapas, qual conclusão que você pode inferir sobre a influência do comprimento de onda no fenômeno?

6. Escreva novamente sua conclusão, porém, utilizando uma nomenclatura que envolva o conceito de **energia cinética**.

7. Qual o tipo de relação matemática entre o comprimento de onda e a energia cinética dos elétrons arrancados?

ATIVIDADE 03

Certifique-se que a simulação apresente os seguintes valores:

- A intensidade está em 10 %,
- O comprimento de onda está em 301 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.

1. No lado direito da simulação, selecione a opção “**gráfico corrente x intensidade de luz**”.
2. Observe os elétrons por 05 segundos.
3. Aumente o valor da intensidade de luz para 50 % e observe os elétrons por 05 segundos.
4. Agora aumente o valor da intensidade de luz para 100 % e observe os elétrons por 05 segundos.
5. Em sua opinião, **a rapidez (velocidade)** dos elétrons aumentou, diminuiu ou permaneceu a mesma?

R: _____

6. Aumente novamente a intensidade de luz de 0% a 100% e observe os elétrons ejetados. Em sua opinião, **a quantidade de elétrons** aumentou, diminuiu ou permaneceu a mesma?

R: _____

7. Após a execução destas duas etapas, qual conclusão que você pode inferir sobre a influência da intensidade de luz no fenômeno?

8. Observe o gráfico no lado direito da simulação. Com base no gráfico observado, qual tipo de relação matemática há entre a corrente elétrica e a intensidade de luz? **Justifique sua resposta.**

R: _____

9. De forma sintética, quais as diferenças dos efeitos causados pelas alterações na intensidade de luz e no comprimento de onda?

R: _____

10. Observando a **energia cinética dos elétrons arrancados**, qual parâmetro a influência: intensidade ou comprimento de onda?

R: _____

Etapa 05: Interpretações da Física Clássica para o Efeito Fotoelétrico e a proposta do modelo corpuscular de Albert Einstein para a luz - (01 aula).

Inicialmente, o professor deve apresentar as características do modelo corpuscular para luz proposto por Einstein como hipótese rival à “Hipótese de Disparo” para interpretação dos resultados experimentais do Efeito Fotoelétrico, explorando a relação entre a hipótese de Planck (1900) para o problema da radiação do corpo negro com a revolucionária proposta de Einstein, porém ressaltando as diferenças entre elas.

Em seguida, deverá ser apresentado o conceito de fóton, energia do fóton, intensidade de luz, o valor da constante de Planck e sua unidade de medida, função trabalho, frequência de corte (ou comprimento de onda de corte). Deve ser dada uma atenção especial às relações entre energia do fóton com a frequência e o comprimento de onda da radiação. Logo após, será utilizada a Lei de Conservação da Energia para equacionar o fenômeno. Por fim, o professor deverá explicar as conclusões obtidas por Phillip Lenard em 1902 utilizando o modelo corpuscular para a luz.

Neste momento é importante que o professor não imponha as ideias de Einstein como “verdadeiras”, mas como uma explicação alternativa para as mesmas evidências experimentais encontradas. Acreditamos que esta forma de apresentar o conteúdo possa contribuir para humanização do processo de construção de teoria científicas e desmistificar a crença de que teorias são imediatamente abandonadas perante dados experimentais discordantes. O tempo estimado para apresentação das características do modelo corpuscular da luz foi estimado em 45 minutos.

Como tarefa para aula seguinte, os alunos deverão entregar as resoluções de exercícios do livro didático para assimilação das novas informações.

Etapa 06: Resolução de exercícios; mapa conceitual e a rejeição da comunidade científica das ideias de Einstein (01 aula).

Sugerimos que inicialmente o professor resolva na lousa o seguinte exercício:

“Os postes de iluminação contem lâmpadas ligadas a um circuito que possui uma célula fotossensível. Quando a luz do dia acaba, a corrente gerada pelo Efeito Fotoelétrico é encerrada, acionando outro circuito para acender a luz que iluminará a rua”.

Sendo o valor da constante de Planck igual a $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ e considerando que a luz ultravioleta provoque na célula fotossensível o Efeito Fotoelétrico e que tenha a frequência de $8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, responda:

a) Qual o valor da energia, em joules, de cada fóton?

b) Se o trabalho (W) necessário para arrancar o elétron da célula fotossensível é $2,3 \cdot 10^{-19} J$, encontre o valor da energia cinética máxima com que o elétron foi ejetado.

Na sequência, o professor entregará e discutirá com os alunos um mapa conceitual sobre o Efeito Fotoelétrico (Anexo D). O mapa conceitual ilustra de forma hierarquizada os conceitos e suas possíveis inter-relações. Acreditamos que a discussão do mapa conceitual com os alunos é de fundamental importância, uma vez que cada aluno irá mobilizar seus conhecimentos em uma tarefa de análise conceitual. O êxito nesta atividade fornecerá fortes indícios de aprendizagem significativa dos novos conceitos.

Por fim, o professor fará junto aos alunos a leitura de pequenas citações de físicos e historiadores de Ciências, como Millikan, Planck e Klassen, nas quais poderá ser evidenciada a resistência que a comunidade científica levantou contra a hipótese de “quantum de luz”, mesmo após a realização do experimento de Millikan em 1916. Busca-se neste momento ampliar a visão dos alunos com relação ao papel da experimentação na Ciência, isto é, mostrar que os experimentos têm uma importância fundamental dentro da Ciência, porém os resultados e interpretações destes são fontes de longos e intensos debates dentro da comunidade científica. Estas citações podem ser extraídas de nosso texto histórico.

O tempo estimado para apresentação das características do modelo corpuscular da luz foi estimado em 45 minutos.

Como tarefa para aula seguinte, os alunos deverão entregar na aula seguinte as resoluções dos exercícios (**Tarefa 2**).

Etapa 07: Utilização de simulação computacional com roteiro de estudo – Segunda Parte (01 aula);

Inicialmente o professor explicará que nessa aula será executada a 2ª Parte do Roteiro de Utilização da Simulação Computacional (atividades 04, 05 e 06). Novamente, o papel do professor é auxiliar os alunos em dúvidas com relação à interpretação da tarefa a ser executada ou ajudar os alunos com alguma dificuldade de utilização da simulação. As atividades serão novamente entregues de maneira sequencial. Após o término da execução do roteiro o professor deverá comentar as respostas com os alunos. Neste momento o professor deverá buscar elucidar as dúvidas dos alunos e ressaltar os aspectos importantes do fenômeno. O professor utilizará o restante da aula para resolver na lousa exercícios do livro didático. Como tarefa para aula seguinte, os alunos entregarão por escrito as resoluções de uma lista de exercícios (**Tarefa 3**).

ROTEIRO DE ATIVIDADES – UTILIZANDO UMA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

2ª Parte

NOME: _____

DATA: ___/___/2014

ATIVIDADE 04

Certifique-se que na simulação está selecionada a opção “**mostre apenas os elétrons mais energéticos**” e os seguintes valores:

- O comprimento de onda está em 510 nm;
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V;
- A placa de metal é sódio;
- Na barra superior “*opções*” **marque a opção “mostre os fótons”**;
- A intensidade está em 0 %.

1. Procure na barra superior “*opções*” e escolha a opção “**mostrar fótons**” (fótons). Em seguida, aumente lentamente a intensidade de luz até 100%.

2. Com base em sua visualização dos fótons, a **intensidade da luz** representa qual característica do modelo corpuscular da luz?

3. Aumente lentamente a intensidade de luz de 0% a 100%. Explique por que **a quantidade de elétrons** arrancados aumentou?

4. Aumente lentamente a intensidade de luz de 0% a 100%. Explique por que **as energias cinéticas** dos elétrons arrancados permaneceram constantes?

5. Utilizando a **Lei de Conservação da Energia**, explique de onde provém a energia cinética dos elétrons.

5. Mantendo a intensidade de luz em 50%, reduza o comprimento de onda para 193 nm. Explique, utilizando a Lei de Conservação da Energia, por que a **energia cinética dos elétrons** arrancados aumentou?

8. A energia dos fótons e o comprimento de onda da luz são grandezas diretamente proporcionais? **Justifique sua resposta.**

9. A energia dos fótons e a frequência da luz são grandezas diretamente proporcionais? **Justifique sua resposta.**

10. Descreva resumidamente de que maneira o valor do comprimento de onda (λ) interfere na na energia cinética do elétron.

11. Altere o valor do comprimento de onda para 552 nm. No menu opções, selecione “*mostre fótons*”. Explique por que nenhum elétron está sendo arrancada da placa de metal.

12. Ainda nesta mesma situação, o que acontecerá se aumentarmos a intensidade de luz até 100%? Teste sua hipótese.

13. Explique o resultado encontrado no item anterior utilizando o modelo corpuscular para a luz.

ATIVIDADE 05

Certifique-se que a simulação apresente os seguintes valores:

- A intensidade está em 50 %,
- O comprimento de onda está em 152 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.
- Na barra superior “*opções*”, **opção “*mostrar fótons*” não está selecionada.**
- **Desmarque todos os gráficos.**

1. Altere o material da placa, de sódio para platina. Observe o movimento dos elétrons “arrancados”.
2. Para os mesmos valores de intensidade de luz e comprimento de onda, as energias cinéticas dos elétrons arrancados do sódio e da platina são diferentes ou permanecem iguais?

R: _____

3. Qual dos dois materiais tem maior facilidade de ejetar elétrons quando são irradiados por uma luz com as características escolhidas acima?

R: _____

4. Altere o valor de comprimento de onda para 204 nm.

5. Alterando os seis tipos de metais disponíveis, para quais deles os elétrons são “arrancados”?

R: _____

6. Explique por que para a platina, na situação anterior, o fenômeno não ocorre.

7. A energia do fóton foi transferida para quais formas de energia?

8. Utilizando platina metálica, explique por que devemos reduzir o comprimento de onda para que o efeito ocorra?

9. Utilizando platina metálica, explique por que não devemos variar a intensidade de luz para que o efeito ocorra?

ATIVIDADE 06

Certifique-se que a simulação apresente os seguintes valores:

- A intensidade está em 50 %,
- O comprimento de onda está em 400 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.
- Na barra superior “*opções*”, **opção “*mostrar fótons*” não está selecionada.**

7. Altere o valor da voltagem da pilha para - 2,00V e observe os elétrons ejetados.
8. Note que nas placas de sódio apareceram os sinais de + e -, indicando que as placas estão carregadas positiva e negativamente.
9. Utilizando a Lei de Conservação de Energia, descreva o que aconteceu.

11. Explique por que a distância percorrida pelos elétrons mudou.

12. Altere o valor do comprimento de onda para 287 nm e observe os elétrons ejetados.

13. Explique por que os elétrons não atingem a outra placa?

Desmarque a opção “**mostre apenas os elétrons mais energéticos**”.

14. Por que a distância percorrida não é a mesma para todos os elétrons?

15. Explique as condições de ocorrência do Efeito Fotoelétrico utilizando a Lei de Conservação de Energia?

Etapa 08: Efeito Compton (1921), a aceitação da comunidade científica das ideias de Einstein e Princípio da Complementariedade de Bohr (01 aula).

Nesta aula o professor discutirá inicialmente o gráfico linear da equação do Efeito Fotoelétrico. Por meio do gráfico serão identificados os valores de frequência de corte, a constante de Planck e a energia necessária para remoção dos elétrons da placa de metal. Em seguida descreverá superficialmente o Efeito Compton e a maneira como Compton tentou interpretá-lo utilizando as ideias de Einstein.

O professor deverá comentar que as ideias de Compton também sofreram inúmeros ataques dentro da comunidade científica. Entretanto, após várias comprovações experimentais de que tanto a energia como o momento linear do “quantum de luz” e do elétron estavam sendo conservados, a comunidade científica, e até mesmo Bohr, começou a aceitar o conceito de “quantum de luz”.

Por fim, o professor apresentará aos alunos o “Princípio da Complementariedade de Bohr” e o conceito de “Dualidade Onda-Partícula”. Busca-se neste momento evidenciar os fenômenos em que a luz é interpretada como onda e os fenômenos em que o modelo corpuscular é o mais adequado. O nosso texto histórico deve servir de material de apoio para o professor preparar esta aula.

O tempo estimado para apresentação das características do modelo corpuscular da luz foi estimado em 45 minutos.

BANCO DE QUESTÕES

Caro professor, nesta encontra-se um número razoável de questões que lhe permitirão elaborar sua avaliação final de acordo com seus objetivos educacionais para o conteúdo do Efeito Fotoelétrico. Os novos conceitos físicos estudados neste tópico são: 1. Função trabalho; 2. Intensidade de luz; 3. Frequência de luz; 4. Energia de um fóton; 5. Energia cinética dos fotoelétrons; 6. Dualidade onda-partícula para a luz. Assim, utilizamos a Taxonomia Revisada de Bloom (2001) para organizar em três níveis cognitivos (Lembrar, Entender, Aplicar) um número razoável de questões que abordam cada um destes novos conceitos. Desta forma, para cada novo conceito, há pelo uma questão em cada nível.

Ressaltamos que, apesar destes níveis serem hierárquicos em complexidade, esta não é uma hierarquia estritamente rígida, há uma certa flexibilidade, ou seja, é possível que uma pequena parcela dos alunos encontre mais facilidade em questão classificada no nível “Entender” do que em outra classificada no nível imediatamente anterior, “Lembrar”. Isso torna-se mais evidente em questões envolvendo operações matemática. Estas questões são geralmente classificadas no nível “Aplicar”, porém, devido ao excesso de resolução de exercícios de física ao longo do ensino médio, os alunos algumas vezes têm um desempenho melhor nestas questões do que em outras.

Além destas questões que envolvem os novos conceitos físicos, também julgamos que seria importante a adição de questões que exigissem o entendimento e a aplicação tecnológica do experimento do efeito fotoelétrico, bem como outras questões que abordassem aspectos da História da Ciência.

Nível 1 - LEMBRAR

01. Cite três situações do cotidiano, em que utilizamos dispositivos tecnológicos que tem seu funcionamento baseado no estudo do experimento do efeito fotoelétrico.

02. Defina o conceito físico de função trabalho de uma placa metálica.

03. De acordo com o modelo corpuscular de Albert Einstein, o que representa a frequência de um feixe de luz?

04. De acordo com o modelo corpuscular de Albert Einstein, o que representa a intensidade de um feixe de luz?

05. Nos diodos emissores de luz, conhecidos como LED's, a emissão de luz ocorre quando elétrons passam de um nível de maior energia para o outro de menor energia. Dois tipos comuns de LED's são o que emite **luz vermelha** e o que emite **luz azul**. De acordo com o modelo corpuscular, proposto por Albert Einstein em 1905, é correto afirmar que:

a) O fóton de luz azul possui maior energia, pois a energia de um fóton é inversamente proporcional à frequência.

b) O fóton de luz azul possui menor energia, pois a energia de um fóton é inversamente proporcional à frequência.

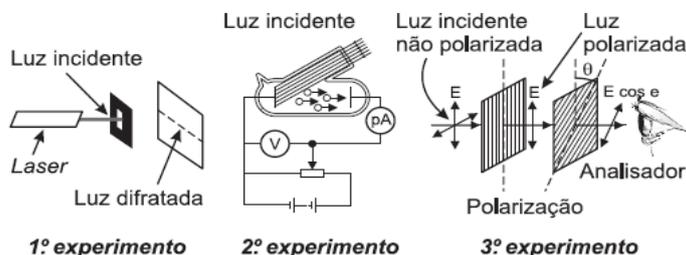
c) Se os LED's funcionam com mesma intensidade de luz, então as energias de ambos os fótons são iguais.

d) O fóton de vermelha possui maior energia, pois a energia de um fóton é diretamente proporcional à frequência.

e) O fóton de luz vermelha possui menor energia, pois a energia de um fóton é diretamente proporcional à frequência.

06. O pode ser afirmado a respeito da energia cinética dos fotoelétrons quando atingimos uma superfície metálica uma radiação eletromagnética cuja frequência é igual à frequência de corte?

07. (UFRN – 2012) Estudantes interessados em analisar a natureza dual da luz preparavam uma apresentação para uma Feira de Ciências com três experimentos, conforme mostrados nas figuras abaixo.



- **1º experimento** mostra a difração da luz ao passar por uma fenda estreita;
- **2º experimento** mostra o efeito fotoelétrico caracterizado pela geração de corrente elétrica a partir da incidência de luz sobre uma célula fotoelétrica;
- **3º experimento** mostra o efeito da polarização da luz ao fazê-la incidir sobre filtros polarizadores.

A partir desses experimentos, é correto afirmar que:

- a) o efeito fotoelétrico e a polarização evidenciam a natureza ondulatória da luz, enquanto que a difração evidencia a natureza corpuscular da luz.
- b) a polarização e a difração evidenciam a natureza corpuscular da luz, enquanto o efeito fotoelétrico evidencia a natureza ondulatória da luz.
- c) a difração e a polarização evidenciam a natureza ondulatória da luz, enquanto que o efeito fotoelétrico evidencia a natureza corpuscular.
- d) o efeito fotoelétrico e a difração evidenciam a natureza ondulatória da luz, enquanto a polarização evidencia a natureza corpuscular da luz.
- e) todos os fenômenos citados evidenciam a natureza ondulatória da luz.

08. Quais eram as diferenças entre as hipóteses de Phillip Lenard (1902) e Albert Einstein (1905) para explicar o efeito fotoelétrico?

Nível II – ENTENDER

01. Justifique as **afirmativas falsas**:

- I. O efeito fotoelétrico, cuja explicação, em 1905, rendeu ao físico Albert Einstein a condecoração com o prêmio Nobel de Física de 1921, consiste na emissão de elétrons que ocorre quando a luz incide sobre uma superfície metálica.
- II. No experimento do efeito fotoelétrico, elétrons são ejetados independentemente da cor de luz utilizada, desde que a intensidade seja alta o suficiente.
- III. Existe uma frequência-limite abaixo da qual esse efeito fotoelétrico não ocorre, mesmo que se aumente consideravelmente a intensidade da luz incidente sobre o metal.
- IV. O efeito fotoelétrico somente é explicado se admitirmos que a luz é formada por partículas: os fótons.
- V. No experimento do efeito fotoelétrico, a energia dos fótons da luz incidente é imediatamente transferida para os elétrons no metal.

02. Explique por que uma placa feita alumínio tem um valor de função trabalho maior que o do valor do potássio.

03. (ITA – 2009 - Adaptado) Suponha que você esteja realizando o experimento do efeito fotoelétrico irradiando uma luz vermelha com uma intensidade relativa de 50% sobre uma placa de cálcio. No entanto, você não observa nenhuma corrente elétrica atravessando o amperímetro. Para que ocorra o surgimento de uma corrente elétrica, basta que você aumente: **Justifique sua resposta!**

- a) o comprimento de onda da luz.
- b) a intensidade da luz.
- c) a frequência da luz.

04. (ITA – 2009 - Adaptado) Suponha que você esteja realizando o experimento do efeito fotoelétrico irradiando uma luz vermelha com uma intensidade relativa de 50% sobre uma placa de cálcio. Nesta situação, você observa um pequeno valor de corrente elétrica atravessando o amperímetro. Para que ocorra um aumento na corrente elétrica, basta que você aumente: **Justifique sua resposta!**

- a) o comprimento de onda da luz.
- b) a intensidade da luz.
- c) a frequência da luz.

05. Sabe-se que incidindo uma radiação eletromagnética de comprimento de onda igual 400 nm sobre uma placa metálica de sódio ocorre a “emissão” de fotoelétrons. Porém, se trocarmos a placa metálica por outra que seja feita de platina, o efeito já não ocorre. Utilizando o modelo corpuscular de Albert Einstein, explique esta observação experimental?

06. Justifique as **afirmativas falsas**:

- A energia cinética de um fotoelétron provém da energia dos fótons incidentes.
- A energia cinética de um fotoelétron não provém da energia dos fótons incidentes.
- A energia cinética de um fotoelétron é diretamente proporcional ao comprimento de onda.
- A energia cinética de um fotoelétron é inversamente proporcional ao comprimento de onda.
- A energia cinética de um fotoelétron não depende do valor do comprimento de onda.
- A energia cinética de um fotoelétron é diretamente proporcional à frequência de luz.
- A energia cinética de um fotoelétron é inversamente proporcional à frequência de luz.
- A energia cinética de um fotoelétron não depende do valor da frequência de luz.
- A energia cinética de um fotoelétron não depende da função trabalho da superfície metálica.
- A energia cinética de um fotoelétron depende da função trabalho da superfície metálica.

07. Justifique as **afirmativas falsas**.

- No experimento de fenda dupla de Young, a luz se comporta como uma partícula devido à existência de padrões de interferência no anteparo.
- É possível construir um experimento que detecte o caráter ondulatório e corpuscular da luz simultaneamente.
- São fenômenos atualmente compreendidos pelo modelo de partículas: fotoluminescência, interferência efeito Compton.
- Todos os fenômenos luminosos conhecidos são explicados pelo modelo corpuscular da luz.

08. Utilizando a **Lei de Conservação da Energia**, explique detalhadamente como um feixe de luz pode provocar o efeito fotoelétrico sobre uma superfície metálica.

09. Preencha a tabela a seguir:

Previsões da Física Clássica	Resultados Experimentais	Explicação de Lenard	Explicação de Einstein

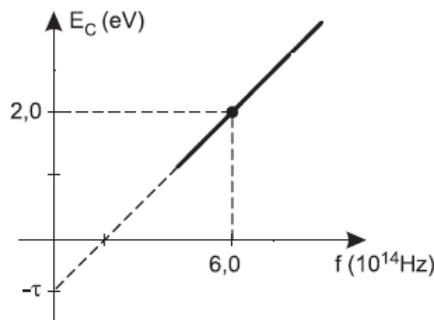
10. Justifique as **afirmativas falsas**:

- A teoria de Einstein de 1905 para efeito fotoelétrico foi uma extensão natural da teoria de Planck de 1900, a qual Einstein adotou e aplicou para a natureza da luz.
- O principal aspecto da teoria de Einstein do efeito fotoelétrico foi dar uma explicação para os experimentos que mostravam que a energia cinética dos elétrons ejetados dependia linearmente da frequência de luz incidente, mas era independente da intensidade de luz.
- Os resultados experimentais do efeito fotoelétrico são inexplicáveis sem a hipótese do fóton.
- A verificação final da teoria de Einstein foi fornecida pela experiência de Millikan.

Nível III – APLICAR

01. Explique o processo de fotossíntese utilizando o modelo corpuscular para a luz. Indique, uma possível evidência experimental, que seria um forte indício para confirmar sua explicação.

02. O gráfico mostrado adiante resultou de uma experiência na qual a superfície metálica de uma célula fotoelétrica foi iluminada por uma fonte de luz monocromática de frequência igual $6,0 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. O gráfico ainda indica a energia cinética máxima dos elétrons “arrancados” do metal.



Considerando que $h = 4,2 \cdot 10^{-15} \text{ eV}$, calcule o valor de **frequência mínima** para que ocorra o efeito fotoelétrico neste metal.

03. Nossa pele possui células que reagem a incidência de luz solar e produzem uma substância chamada melanina, responsável pela pigmentação da pele. Assim, pensando em se bronzear, uma garota vestiu um biquíni, acendeu a luz de seu quarto e deitou-se exatamente abaixo da lâmpada incandescente. Após várias horas ela percebeu que não conseguiu resultado algum. Por que?

04. Um laser, cuja potência é de 110 mW (mili-watts), emite um feixe de luz monocromático com frequência de $4,0 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Utilizando o modelo corpuscular proposto por Albert Einstein, **calcule a intensidade da luz** deste laser no intervalo de tempo igual a 6 nano-segundos.

Dados: $E = Pot \cdot \Delta t$ $1 \text{ nano-segundo} = 10^{-9} \text{ segundos}$ $1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$

05. Dois feixes de raios X, I e II, incidem sobre uma placa de chumbo e são totalmente absorvidos por ela. **O comprimento de onda do feixe II é três vezes maior que o comprimento de onda do feixe I.** Ao serem absorvidos, um fóton do feixe I transfere à placa de chumbo uma energia E_1 e um fóton do feixe II, uma energia E_2 . Considerando-se essas informações, de acordo com o modelo corpuscular de Albert Einstein, é correto afirmar que:

- a) Nada se pode afirmar, pois a energia do fóton depende somente da intensidade de luz.
- b) E_2 é 3 vezes maior que E_1
- d) E_2 é 3 vezes menor que E_1
- c) E_2 é igual a E_1
- e) E_2 é 9 vezes menor que E_1

06. (FUVEST – 2005) Suponha que você esteja realizando o experimento do efeito fotoelétrico como demonstração dos aspectos da natureza da luz em um feira de ciências e esteja utilizando uma luz cujo comprimento de onda é igual 600 nm . Para esta situação, calcule:

- a) a frequência da luz.
- b) a energia de um fóton da luz.

07. (FUVEST – 2012) Em um laboratório de física, estudantes fazem um experimento em que a radiação eletromagnética de comprimento de onda de 300 nm incide em uma placa de sódio, provocando a emissão de elétrons. **Determine a energia cinética máxima de um elétron** que escapa da placa de sódio.

NOTE E ADOTE:

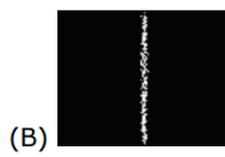
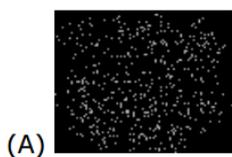
Módulo da velocidade da luz no vácuo igual $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$;

$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

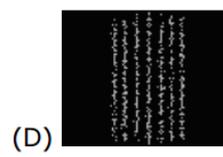
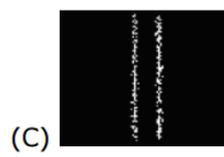
$h =$ Constante de Planck $= 4 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

W (sódio) $= 2,3 \text{ eV}$

08. Se a intensidade da luz emitida pela fonte no experimento de fenda dupla de Young (1861) fosse tão tênue que apenas um fóton fosse emitido de cada vez (regime monofotônico), qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo após algumas horas?



no centro



nenhum fóton detectado

TAREFA 01- Ondas Eletromagnéticas

01. (UFV-MG) A energia E de um fóton de uma onda eletromagnética de frequência f é dada pela equação $E = h \cdot f$, em que h é a Constante de Planck. Sabe-se também que a capacidade de penetração de uma onda eletromagnética aumenta com a energia do fóton. O diagrama abaixo ilustra a localização relativa, no espectro eletromagnético de algumas radiações conhecidas.



É correto afirmar que:

- as ondas de rádio têm maior capacidade de penetração que os raios x porque possuem maior frequência.
- os raios gama têm maior capacidade de penetração que a radiação ultravioleta porque possuem menor frequência.
- a radiação visível tem menor capacidade de penetração que a radiação micro-ondas porque possui menor frequência.
- a radiação infravermelha tem menor capacidade de penetração que os raios x por que tem menor frequência.
- a radiação visível tem maior capacidade de penetração que a radiação ultravioleta porque tem menor frequência.

02. (UFABC)

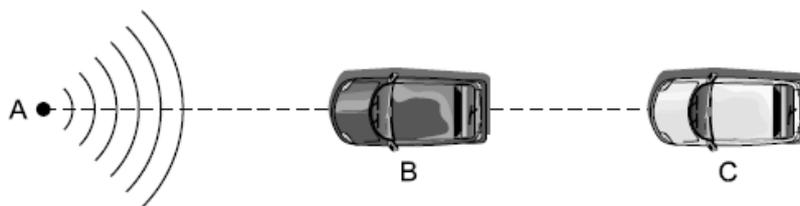


Na tirinha, vemos Calvin transformado em raio X vivo. Esse tipo de onda eletromagnética tem frequência entre 10^{17} a 10^{19} Hz e foi descoberta em 1895 por Wilhelm Röntgen. Como todas as ondas eletromagnéticas, os raios X viajam pelo vácuo com a velocidade de $3 \cdot 10^8$ m/s. Considere dois raios X, com frequência $f_1 = 1,5 \cdot 10^{18}$ Hz e $f_2 = 3,0 \cdot 10^{19}$ Hz. A razão entre os comprimentos de ondas desses

raios $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$, no vácuo, vale:

- 0,05
- 0,50
- 2,00
- 4,50
- 20,00

03. Alfredo, um jovem motorista, está posicionado no ponto A, indicado no esquema abaixo, no instante em que aciona o controle remoto visando destravar as portas de seu carro, estacionado em C. Entre as posições A e C está estacionado, porém, um outro veículo B, mas, mesmo assim, Alfredo consegue sucesso em abrir seu automóvel.



Levando-se em conta o contexto acima, assinale a alternativa correta:

- As ondas emitidas pelo controle remoto são eletromagnéticas, situadas na faixa das radiofrequências, e “contornam” o veículo B principalmente por refração.
- As ondas emitidas pelo controle remoto são eletromagnéticas, situadas na faixa da radiofrequência, e “contornam” o veículo B principalmente por difração.
- As ondas emitidas pelo controle remoto são mecânicas, situadas na faixa dos ultrassons, e “contornam” o veículo B principalmente por refração.
- As ondas emitidas pelo controle remoto são mecânicas, situadas na faixa dos ultrassons, e “contornam” o veículo B principalmente por difração.
- As ondas emitidas pelo controle remoto são eletromagnéticas, situadas na faixa dos Raios X, e “contornam” o veículo B principalmente por difração.

04. Descreva os seguintes fenômenos ondulatórios:

- Reflexão;
- Refração;
- Difração;
- Ressonância;
- Polarização;
- Interferência.

05. Baseando-se em sua resposta à questão 04, responda: *Quais destes fenômenos podem ocorrer com radiações eletromagnéticas?* Dê pelo menos 01 exemplo no cotidiano que corrobore sua afirmação.

06. (UFC) Analise as assertivas abaixo e a seguir indique a alternativa correta.

- Elétrons em movimento vibratório podem fazer surgir ondas de rádio e ondas de luz.
- Ondas de rádio e ondas de luz são ondas eletromagnéticas.
- Ondas de luz são ondas eletromagnéticas e ondas de rádio são ondas mecânicas.

- Somente I é verdadeira.
- Somente II é verdadeira.
- Somente III é verdadeira.
- Somente I e II são verdadeiras.
- Somente I e III são verdadeiras.

07. Um professor de Física que ministrava a primeira aula sobre Ondas dava exemplos de ondas eletromagnéticas. Ele dizia: “São exemplos de ondas eletromagnéticas as ondas de rádio, a luz, as ondas de radar, os raios X, os raios γ . Um aluno entusiasmado completou a lista de exemplos, dizendo: “Raios α , raios β e raios catódicos”.

Pode-se afirmar que

- pelo menos um exemplo citado pelo professor está errado.

- b) todos os exemplos citados pelo professor e pelo aluno estão corretos.
- c) apenas um exemplo citado pelo aluno está errado.
- d) os três exemplos citados pelo aluno estão errados.
- e) há erros tanto nos exemplos do professor quanto nos do aluno.

08. (UDESC) – Analise as afirmações abaixo, com relação às ondas eletromagnéticas.

- I. Os raios gama são radiações eletromagnéticas de frequência maior do que a luz visível.
- II. As micro-ondas são ondas eletromagnéticas que se propagam, no ar, com velocidade maior do que as ondas de rádio.
- III. Os campos elétrico e magnético em uma radiação infravermelha vibram paralelamente à direção de propagação da radiação.

Assinale a alternativa correta.

- a) Somente as afirmativas I e III são verdadeiras.
- b) Somente a afirmativa II é verdadeira.
- c) Somente a afirmativa III é verdadeira.
- d) Somente as afirmativas II e III são verdadeiras.
- e) Somente a afirmativa I é verdadeira.

09. (FUVEST) A energia de um fóton de frequência f é dada por $E = h.f$, em que h é a constante de Planck. Calcule a frequência e a energia de um fóton de luz, cujo comprimento de onda é igual a 500nm ?

Dados:

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$1\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

Resposta: $6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ e $4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

10. Admita que ondas de rádio de frequência igual a $1,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ estejam sendo enviadas da Lua para a Terra por um grupo de astronautas tripulantes de uma missão satélite. Sabendo que as ondas de rádio se propagam com velocidade de módulo igual a $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ e que a distância da Lua à Terra é de $3,6 \cdot 10^5 \text{ km}$, aproximadamente, calcule:

- a) o tempo gasto pelas ondas no trajeto da Lua à Terra;
- b) o comprimento de onda dessas ondas.

Resposta: a) **1,2 s** b) **200 m**

11. (UFT) – Neste diagrama, está representado o espectro de ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo.

TAREFA 2 – O Efeito Fotoelétrico.

01. O efeito fotoelétrico, explorado em sensores, células fotoelétricas e em outros detectores eletrônicos de luz, refere-se à capacidade da luz de retirar elétrons da superfície de um metal. Quanto a este efeito, pode-se afirmar que:

- a) a energia dos elétrons ejetados depende da intensidade da luz incidente.
- b) a energia dos elétrons ejetados é discreta, correspondendo aos quanta de energia.
- c) a função trabalho depende do número de elétrons ejetados.
- d) a velocidade dos elétrons ejetados depende da cor da luz incidente.
- e) o número de elétrons ejetados depende da cor da luz incidente.

02. (UFMG – 2007) Nos diodos emissores de luz, conhecidos como LEDs, a emissão de luz ocorre quando elétrons passam de um nível de maior energia para o outro de menor energia. Dois tipos comuns de LEDs são o que emite **luz vermelha** e o que emite **luz verde**.

Sejam λ_{verde} o comprimento de onda da luz emitida pelo LED verde e E_{verde} a diferença de energia entre os níveis desse mesmo LED. Para o LED vermelho, essas grandezas são, respectivamente, $\lambda_{\text{vermelho}}$ e E_{vermelho} .

Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que

- a) $E_{\text{verde}} > E_{\text{vermelho}}$ e $\lambda_{\text{verde}} > \lambda_{\text{vermelho}}$
- b) $E_{\text{verde}} > E_{\text{vermelho}}$ e $\lambda_{\text{verde}} < \lambda_{\text{vermelho}}$
- c) $E_{\text{verde}} < E_{\text{vermelho}}$ e $\lambda_{\text{verde}} > \lambda_{\text{vermelho}}$
- d) $E_{\text{verde}} < E_{\text{vermelho}}$ e $\lambda_{\text{verde}} < \lambda_{\text{vermelho}}$

03. (UFMS-2003) Ondas de rádio e raios-X estão se propagando no vácuo. As ondas de rádio possuem comprimento de onda $\lambda_R = 3,0 \text{ m}$ e os raios-X, $\lambda_X = 7 \cdot 10^{-11} \text{ m}$. Sejam: E_R a energia dos fótons da onda de rádio e E_X a energia dos fótons dos raios-X e V_R e V_X , respectivamente, suas velocidades de propagação. Com base nessas informações, é correto afirmar que:

- a) $E_X = E_R$ e $V_X = V_R$
- b) $E_X > E_R$ e $V_X < V_R$
- c) $E_X > E_R$ e $V_X = V_R$
- d) $E_X < E_R$ e $V_X = V_R$
- e) $E_X < E_R$ e $V_X > V_R$

04. (UNICAMP-2005) O efeito fotoelétrico, cuja descrição por Albert Einstein está completando 100 anos em 2005 (ano internacional da Física), consiste na emissão de elétrons por um metal no qual incide um feixe de luz. No processo, “pacotes” bem definidos de energia luminosa, chamados fótons, são absorvidos um a um pelos elétrons do metal. O valor da energia de cada fóton é dado por $E = h \cdot f$, onde $h = 4 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ é a chamada constante de Planck e f é a frequência da luz incidente. Um elétron só é emitido do interior do metal se a energia do fóton absorvido for maior que uma energia mínima. Para os elétrons mais fracamente ligados ao metal, essa energia mínima é chamada função trabalho W e varia de metal para metal (ver a tabela a seguir).

metal	W(eV)
césio	2,1
Potássio	2,3
sódio	2,8

- a) Calcule a energia do fóton (em eV), quando o comprimento de onda da luz incidente for de 500 nm.
- b) A luz de 500 nm é capaz de arrancar elétrons de quais dos metais apresentados na tabela?
- c) Qual será a energia cinética dos elétrons emitido pelo potássio, se o comprimento de onda da luz incidente for 300 nm.

05. (UFMG – 1995) A natureza da luz é uma questão que preocupa os físicos há muito tempo. No decorrer da história da física, houve predomínio ora da teoria corpuscular – a luz seria constituída de partículas – ora da teoria ondulatória - a luz seria uma onda.

1. Descreva, a concepção atual sobre a natureza da luz.
2. Descreva, resumidamente, uma observação experimental que sirva de evidência para a concepção descrita no item anterior.

06. A função trabalho de um dado metal é de 2,5 eV.

- a) Verifique se ocorre a emissão fotoelétrica quando sobre esse metal incide luz de comprimento de onda 600 nm. A constante de Planck é $h = 4,2 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ e a velocidade da luz é 300 000 km/s.
- b) Qual é a frequência mais baixa de luz incidente capaz de arrancar elétrons do metal?

07. A função trabalho do zinco é 4,3 eV. Um fotoeltron do zinco é emitido com uma energia cinética máxima de 4,2 eV. Considerando $h = 4,2 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$, pergunta-se:

- a) Qual a energia do fóton incidente?
- b) Qual a frequência do fóton incidente no zinco?
- c) Qual o comprimento de onda do fóton incidente, em nanômetros?

08. Entre as radiações eletromagnéticas mencionadas nas alternativas, qual tem fótons de maior energia?

- a) Microondas.
- b) Infravermelho.
- c) Raios X.
- d) Ultravioleta.
- e) Luz visível.

TAREFA 3 – Simulando o Efeito Fotoelétrico

01. Suponha que você construiu um experimento no qual um alvo metálico emite elétrons quando determinada radiação eletromagnética incide sobre ele. Se você quiser aumentar a energia cinética máxima dos fotoelétrons, quais das seguintes ações seriam eficazes? **Justifique sua resposta.**

- Aumentar a intensidade da radiação incidente.
- Diminuir a intensidade da radiação incidente.
- Aumentar o comprimento de onda.
- Diminuir o comprimento de onda.
- Aumentar a frequência da radiação incidente.
- Diminuir a frequência da radiação incidente.
- Aumentar a voltagem da bateria.
- Diminuir a voltagem da bateria.
- Trocar o alvo por um outro material que tem uma maior função trabalho.
- Trocar o alvo por um outro material que tem uma menor função trabalho.

02. Suponha que você construiu um experimento tal que a intensidade de luz é diferente de zero, mas a o alvo metálico ainda não emite elétrons. Quais das seguintes ações poderiam fazer o alvo metálico começar a emitir fotoelétrons? **Justifique sua resposta.**

- Aumentar a intensidade da radiação incidente.
- Diminuir a intensidade da radiação incidente.
- Aumentar o comprimento de onda.
- Diminuir o comprimento de onda.
- Aumentar a frequência da radiação incidente.
- Diminuir a frequência da radiação incidente.
- Aumentar a voltagem da bateria.
- Diminuir a voltagem da bateria.
- Trocar o alvo por um outro material que tem uma maior função trabalho.
- Trocar o alvo por um outro material que tem uma menor função trabalho.

03. O que causa a emissão de elétrons de um alvo metálico quando determinada radiação eletromagnética incide sobre ele? **Justifique sua resposta.**

- a) A força exercida sobre os elétrons pela bateria.
- b) A intensidade da radiação incidente.
- c) Ambos (a) e (b).
- d) Nem (a) e nem (b).

04. Se você construiu um experimento onde elétrons estão sendo emitidos de uma placa metálica por causa de um feixe de luz incidente, assinale **verdadeiro** ou **falso**. **Justifique sua resposta.**

- Mantendo a condições do experimento, todos os elétrons emitidos terão as mesmas energias cinéticas.
- A função trabalho dos metais pode ter valor diferente para diferentes elétrons.
- A energia dos fótons que incidem na placa metálica deve ser menor que a função trabalho do metal.
- Os elétrons emitidos com altas energias cinéticas são aqueles que estavam mais fracamente ligados no metal.

05. Como você explicaria o que é a função trabalho para uma criança de 05 anos?

06. Construa uma tabela na qual poderão ser observadas as previsões do modelo ondulatório para o experimento do efeito fotoelétrico, os resultados experimentais encontrados por Philip Lenard em 1902 e a explicação do modelo corpuscular da luz para cada resultado experimental.

(Anexo A) Aspectos da História da Ciência e seu processo evolutivo

1. Os diversos modelos propostos para a natureza da luz

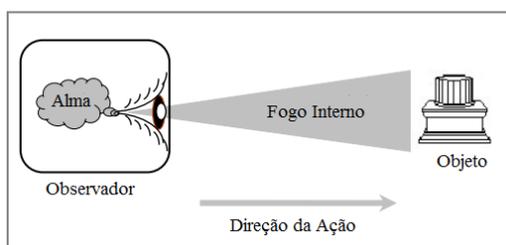
Os estudos iniciais sobre a luz foram induzidos pela necessidade do homem em compreender vários fenômenos naturais e suas implicações para a vida das pessoas, tais como: relâmpago; fogo; luz solar; brilho das estrelas; fases da Lua; eclipses e todas as outras situações que produzem luz. Na antiga cultura egípcia, por exemplo, a luz, proveniente do fogo, tornou-se parte essencial de rituais religiosos antigos e o Sol foi associado ao nome de diversas divindades, como por exemplo, Rá, Amon-Rá e Atum.

A cultura chinesa também reconhecia a importância mística ou espiritual da luz para vida humana,

[...] os textos de antigos médicos chineses, escritos por volta do século III a. C., conjecturavam a existência de *Ying* e *Yang*, os quais formavam a essência do universo. *Yang* representava a força da luz enquanto que *Ying* correspondia a força da escuridão. O fogo e o calor seriam manifestações de *Yang*. [...] Assim, quando uma pessoa estava doente e seu corpo frio, os antigos médicos chineses julgavam a aparência da pessoa e tomavam seu pulso para afirmar se um desequilíbrio entre *Ying* e *Yang* era a causa da doença (OON e SUBRAMANIAM, 2009a, p. 386).

Percebe-se que estas primeiras ideias estavam envolvidas por uma crença espiritual. No entanto, foi na Grécia Antiga que ocorreram as primeiras tentativas de explicar racionalmente as propriedades da luz e, principalmente, o mecanismo da visão. Por volta dos séculos V e IV a. C., os filósofos Pitágoras, Empédocles e Platão, afirmavam que os olhos emitiam “partículas de luz” que colidiam com os objetos do ambiente externo e, no retorno destas para os olhos, era completado o processo que permitia a visão (PEREIRA, 2011). Esta teoria ficou conhecida como “Teoria Tátil” ou “Teoria da Extromissão”. A figura 4 abaixo ilustra o modelo de luz imaginado por Pitágoras e seus seguidores.

Figura 4: Representação dos raios de luz de acordo com o modelo de Pitágoras

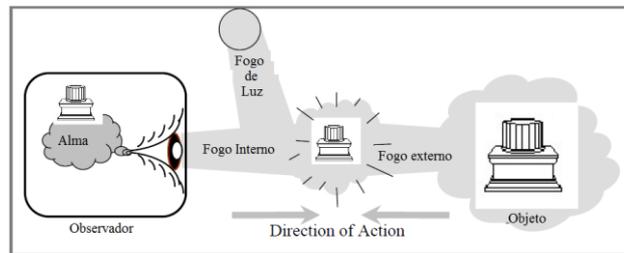


FONTE 4: GALILI, 2010, p. 04.

Outros antigos filósofos gregos, como Aristóteles, Demócrito, Leucipo e Lucrecio, também da mesma época, defendiam um modelo diferente. Eles argumentavam que além dos olhos

emitirem “partículas de luz”, os objetos também deveriam emitir “partículas” (átomos) de diversas formas e tamanhos, as quais permitiam a formação das inúmeras imagens possíveis. Assim, o processo da visão seria o resultado das várias colisões entre os “átomos” emitidos pelos objetos e as “partículas de luz” emitidas pelo olho (PEREIRA, 2011). Esta teoria ficou conhecida como “Teoria da Emissão” ou “Teoria da Intromissão”. A figura 5 abaixo ilustra o modelo de luz imaginado por Leucipo.

Figura 5: Representação do mecanismo da visão de acordo com Leucipo e seus seguidores.



FONTE 5: GALILI, 2010, p. 07.

Confrontando as ideias desses antigos filósofos, percebe-se que na Teoria Tátil o processo da visão dependeria exclusivamente dos olhos, enquanto que na Teoria da Intromissão a visão dependeria tanto dos olhos como do ambiente externo.

Por volta do século III a.C., Euclides de Alexandria, promoveu um avanço significativo na compreensão do mecanismo da visão ao introduzir o princípio de que a luz emitida pelos olhos deveria propagar-se em linha reta (OON e SUBRAMANIAM, 2009a). Para representar o caminho percorrido pela luz, ele criou o conceito de “raios de luz” e, assim, introduziu uma abordagem geométrica rigorosa dos fenômenos luminosos.

Esta abordagem, juntamente com o desenvolvimento dos primeiros instrumentos de medida voltados para astronomia (Gnômon, Astrolábio, Sextante, entre outros), seria a fonte de inspiração para outros filósofos calcular, por exemplo, as primeiras medidas de distâncias e tamanhos dos planetas, da Lua e do Sol e da Terra.

Entretanto, mesmo com a ideia de “raios de luz” de Euclides, haviam muitas perguntas sem uma resposta satisfatória: Se a luz parte de nossos olhos e vai até os objetos e, ao retornar novamente até os olhos, possibilita o processo de visão, por que não somos capazes de enxergar objetos no escuro? Por que alguns animais, como os gatos, conseguem enxergar no escuro? Como a imagem de um objeto gigante, como uma montanha, pode entrar num olho tão pequeno? Qual órgão dentro do olho produz luz? Por que não enxergamos várias imagens das mesmas coisas em

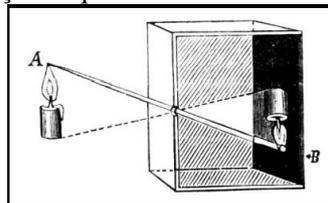
nossa volta? Assim, estas questões permaneceram sem uma explicação irrefutável por mais de 1000 anos.

Influenciados pelos estudos de Euclides, o astrônomo indiano Aryabhata, em 499 d.C, no seu livro *Aryabhativa*, foi o primeiro a propor que o mecanismo da visão ocorria exclusivamente por causa da reflexão da luz nos objetos. Segundo ele, a Lua e os cinco planetas conhecidos na época (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) não emitiam luz própria, mas apenas refletiam a luz do Sol. Assim, o mecanismo da visão ocorria quando os raios de luz refletidos atingiam os olhos (OON e SUBRAMANIAM, 2009a). Porém, o trabalho de Aryabhata não ganhou apoio e foi rejeitado por quase todos os outros filósofos.

Ao longo dos 500 anos subsequentes a compreensão da humanidade sobre o mecanismo da visão não avançou significativamente: o sentido da visão permaneceu associados a emissão de partículas e/ou feixes de luz pelos olhos.

Foi somente na Idade Média, no início do século XI, que o matemático árabe Abu Ali al-Hasan Ibn Al-Haitham, conhecido como Alhazen, levantou sérios questionamentos sobre a existência de emanção de feixes de luz partindo dos olhos no processo de visão. Baseando-se em experimentos envolvendo uma câmera escura (também chamada câmera pinhole), por analogia, ele propôs que os raios de luz, formados por infinitas partículas, após serem refletidos pelos objetos e alcançar o olho humano, permitiam a formação da imagem destes objetos (PEREIRA, 2011). Diferentemente dos modelos gregos, a teoria da emissão de Alhazen considera a iluminação do ambiente a essência do mecanismo da visão. A figura 6 ilustra a câmera escura proposta por Alhazen.

Figura 6: Representação esquemática da Câmera Escura proposta por Alhazen.



FONTE 6: GALILI, 2010, p. 14.

Deve-se ressaltar que atitude de Alhazen foi muito incomum para os filósofos da época, uma vez que abordagem matemática dos fenômenos, especialmente com um forte fundamento em geometria, era a mais usual. As conclusões obtidas por ele, lançando mão unicamente da experimentação como base de argumentação, deixou espaço para vários questionamentos. Como poderia a luz ser refletida em todas as direções sem resultar num caos e confusão de imagens formadas? Quais órgãos dentro do olho recebem a luz?

Alhazen explicou que, embora haja um número infinito de raios de luz sendo refletidos em todas as direções, apenas aqueles raios que incidissem perpendicularmente à superfície do olho poderiam penetrar sem ser refratados e formar a imagem do objeto. Sobre a anatomia do olho humano, todas as religiões da época proibiam a prática de dissecação de corpos humanos como forma de buscar respostas para a ciência, assim, as ideias de Alhazen sobre a visualização de objetos ganhou muitos adeptos, como Bacon, Pechan e Vitélio (TOSSATO, 2007).

No entanto, a dissecação em animais (macacos, por exemplo) sempre fora permitida e os primeiros estudos da anatomia do olho, principalmente de Cláudio Galeno (130 d.C – 200 d.C), sugeriram que as imagens dos objetos eram formadas sobre o cristalino (lente biconvexa multifocal).

A partir do século XIII, o desejo de saber a causa da morte por razões essencialmente médico-legais ou de averiguar o que havia matado uma pessoa importante ou elucidar a natureza de uma doença ou enfermidade infecciosa, levou à liberação dos estudos da anatomia humana.

No século XVI, o famoso astrônomo matemático dinamarquês Johannes Kepler (1571-1630), descobridor das três leis dos movimentos planetários (Lei da Elipse, Lei das Áreas e Lei Harmônica), se interessou pelo estudo da óptica quando estava buscando responder porque a Lua apresenta uma diminuição aparente em seu diâmetro durante um eclipse solar (TOSSATO, 2007). Em suas investigações, ele contribuiu significativamente para o entendimento do mecanismo da visão e fez importantes correções na teoria de Alhazen e seus seguidores.

Kepler discordava da explicação de Alhazen de que somente os raios que incidissem perpendicularmente à superfície do olho poderiam formar a imagem (OON e SUBRAMANIAM, 2009a). Fundamentado nos trabalhos anatômicos de Felix Platter (1536-1614), os quais mostraram que o nervo óptico está na verdade ligado diretamente à retina, e não ao cristalino como afirmavam a tradição galênica, Kepler argumentou que o líquido orgânico (humor aquoso) refrata todos raios de luz convergindo-os sobre a retina, dando origem as imagens invertidas dos objetos dentro do olho, tal qual ocorre com uma câmera escura. A explicação de Kepler é até hoje aceita pela comunidade científica sobre como ocorre o mecanismo da visão.

Um passo importante em direção à compreensão da natureza da luz foi dado durante a era do iluminismo europeu² pelos filósofos naturais (físicos) René Descartes (1596-1650),

² O termo “Iluminismo” designa “o período das luzes”, ou seja aquele amplo movimento cultural, filosófico e político que se desenvolveu na Europa no decurso do século XVIII e que representou uma guinada intelectual destinada a influenciar profundamente o desenvolvimento da sociedade europeia. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=IOvB7jpmUEC&pg=PA164&dq=iluminismo+europeu&hl=ptBR&sa=X&ei=>

considerado pai da matemática e filosofia moderna, e Isaac Newton (1642-1727), fundador da Mecânica Clássica e descobridor da Lei da Gravitação Universal.

Em meados de 1644, opondo-se à ideia de vácuo (ausência de todas as substâncias), Descartes propôs que o Universo fosse totalmente preenchido por um “oceano de éter” e por causa da rotação do Sol, originavam-se ondas ou redemoinhos, os quais fariam os planetas girarem em torno dele. Para ele, o éter também deveria ser o meio material necessário para a transmissão da luz e do calor das estrelas através do espaço, análogo a necessidade de um meio material para propagação das ondas sonoras (BROCKINGTON e PIETROCOLA, 2005). Assim, a luz seria uma variação de pressão produzida pelo Sol que propagava no éter. Este é o nascimento do modelo ondulatório para a luz.

Isaac Newton concordava com a ideia de existência onipresente do éter no Universo, porém ele tinha uma visão diferente com relação à natureza da luz proposta por Descartes. Ele estava convencido de que a luz seria composta de inúmeras partículas que estavam sendo emitidas a grandes velocidades por objetos iluminados (modelo corpuscular da luz) e que interagiam com as partículas do meio. Para apoiar suas conclusões, ele realizou vários experimentos em uma sala escura sobre os fenômenos luminosos conhecidos na época, tais como: reflexão, refração, dispersão, formação de cores, entre outros.

Nos anos seguintes, Newton e outros físicos da época, como John Harris e Wilhem Jacob's Gravesande, buscaram elaborar um modelo corpuscular para explicar todos os fenômenos ópticos conhecidos baseando-se na fortemente estabelecida Mecânica Newtoniana. Por exemplo, para explicar a reflexão da luz em superfície espelhada, o modelo corpuscular afirmava que existia uma “força refratante” uniformemente distribuída na superfície do objeto. Fazendo cálculos sobre a trajetória percorrida pela luz, era demonstrado que o ângulo de incidência era igual ao ângulo de reflexão (PEREIRA, 2011). A figura 7 abaixo ilustra esta ideia.

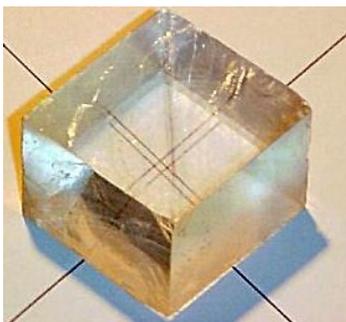
No prisma ABC a luz branca é decomposta nas sete cores do arco íris. Em seguida, por meio de uma lente MN, estas cores são recombinadas opticamente formando novamente a luz branca. Por fim, esta luz branca é separada novamente pelo prisma KIH e projetada na tela LV.

No entanto, o modelo corpuscular da luz proposto por Newton e seus colaboradores apresentava sérias dificuldades. Por exemplo, este modelo não explicava satisfatoriamente como a reflexão e a refração poderia ocorrer ao mesmo tempo (algo muito comum quando a luz incide na superfície de um lago), pois a “força refratante” deveria ser atrativa e repulsiva ao mesmo tempo para ocorrer os dois fenômenos, o que tornava a explicação contraditória (PEREIRA, 2011).

A interferência de luz se mostrou extremamente difícil de ser explicada utilizando o modelo corpuscular. Imaginar e defender a ideia de que partículas que compõem duas cores distintas de luz poderiam gerar uma terceira cor, por meio de interferência, foi praticamente impossível. Além disso, em 1665, Robert Hooke (1635-1703) e Robert Boyle tinham observado e explicado que as cores que apareciam em filmes de óleo na água seriam padrões de interferência provocada por reflexão de ondas de luz na superfície superior e inferior da película fina de óleo.

Os fenômenos de birrefringência⁵ e difração da luz também representavam obstáculos para aceitação do modelo corpuscular, uma vez que era difícil imaginar como poderiam ser formadas duas imagens diferentes de um único objeto, em um mesmo cristal, ou como partículas poderiam contornar obstáculos e gerar um padrão de interferência num anteparo. A figura 9 abaixo ilustra o fenômeno da birrefringência em um cristal de calcita.

Figura 9: Fenômeno denominado birrefringência ocorrendo em um cristal de calcita



FONTE 9: Portal 11:11⁶

⁵ A birrefringência é um fenômeno, descoberto em 1669 por Erasmus Bartholinus, que consiste na propriedade que certos cristais anisotrópicos possuem de originar dois raios refratados, a partir de um único raio incidente. Estes raios serão polarizados em direções mutuamente perpendiculares e terão velocidades de propagação diferentes (TIPLER, 1995, p. 50).

⁶ Disponível em: <http://www.portal11-11.com.br/art10.htm>. Acessado em 05/02/2015.

É neste contexto de controvérsia entre modelo ondulatório e corpuscular que físicos como Christian Huygens, Willebrord Snell, Pierre de Fermat, Gustav Kirchhoff, Leonard Euler, Thomas Young, Augustin-Jean Fresnel, entre outros, buscaram fortalecer o modelo ondulatório da luz proposto inicialmente por Descartes. O físico holandês Huygens, por exemplo, em seu livro “Tratado Sobre a Luz”, publicado em 1690, assumiu que a luz era uma onda longitudinal que ficava mais lenta quando penetrava em meios de maior densidade (OON e SUBRAMANIAM, 2009a).

Huygens também propôs uma explicação para o fenômeno da difração da luz, conhecido atualmente como Princípio de Huygens. Segundo ele, as ondas têm a capacidade de contornar obstáculos se o tamanho destes for da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda. Assim, cada ponto da frente de onda luminosa possui a funcionalidade de uma nova fonte pontual, ou seja, a cada instante de tempo, a própria frente de onda gera novas ondas infinitesimais, a partir de cada um de seus pontos, dando origem a uma nova frente de onda no instante seguinte (HEWITT, 2002).

No modelo ondulatório, os fenômenos da reflexão e interferência luminosa eram facilmente explicados de forma análoga ao que ocorria com as ondas sonoras. Já a refração da luz era explicada pelo Princípio de Fermat. Este princípio afirma que a luz ao se propagar diretamente entre dois pontos, deverá fazer isto no menor tempo possível, no entanto, este poderá não ser o menor caminho. Como a luz passará por meios diferentes, esta mudará sua velocidade, assim, a luz terá sua trajetória alterada para que ela percorra um menor trecho no meio em que ela será mais lenta.

Apesar do modelo ondulatório se sobressair em fenômenos em que a explicação por meio do modelo corpuscular era insatisfatória, ele também apresentava sérias dificuldades e desvantagens em outros fenômenos, como a explicação para formação das cores – era mais simples explicar utilizando o modelo corpuscular.

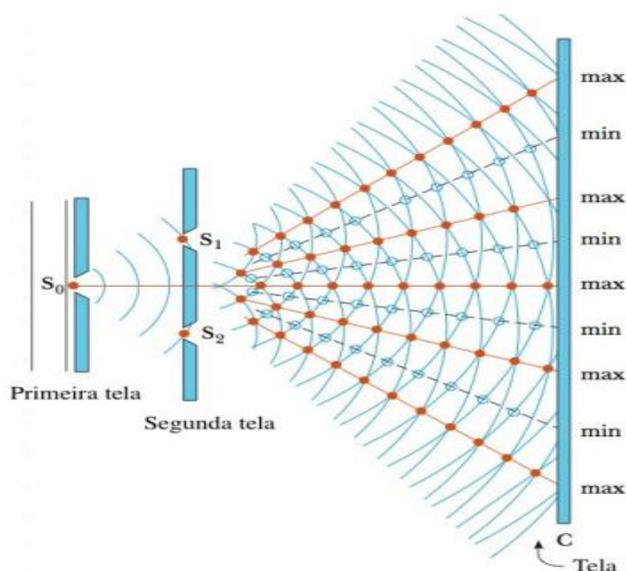
Já o fenômeno da birrefringência também não tinha explicação dentro do modelo ondulatório, pois Huygens dava um tratamento vibracional para a luz, excluindo a hipótese de que a luz era uma onda transversal. Por fim, a excelente reputação de Isaac Newton dentro da comunidade científica, devido ao prestígio da Mecânica Newtoniana, fez com que a maior parte dos físicos da época apoiassem o modelo corpuscular em detrimento do modelo ondulatório (PEREIRA, 2011).

No início do século XIX os trabalhos de Thomas Young contribuíram decisivamente para que a controvérsia fosse resolvida a favor do modelo ondulatório. Primeiramente, Young buscou explicar a formação das cores utilizando o modelo ondulatório, propondo que a luz poderia apresentar diversos valores de comprimentos de onda e as cores estariam associadas aos diferentes comprimentos de onda possíveis, assim, haveria uma relação entre as cores e o movimento vibratório do éter luminífero, o que levantou a hipótese da luz ser uma onda transversal (PEREIRA, 2011).

No final do século XVIII o modelo ondulatório da luz foi aperfeiçoado graças aos trabalhos de Thomas Young, François Jean Dominique Arago e de Augustine-Jean Fresnel. Em 1801, Young propôs o famoso “Experimento de Interferência em Fenda Dupla”, no qual um feixe de luz monocromática difrata e interfere consigo mesmo após atravessar duas fendas, cuja abertura é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda do feixe de luz, produzindo um padrão de interferência em um anteparo (TIPLER, 1995).

A formação deste padrão de interferência somente poderia ser explicada utilizando o Princípio de Huygens para a difração da luz. Os sucessivos e equidistantes pontos luminosos no anteparo demonstrariam claramente que a luz tinha sofrido interferência construtiva e destrutiva em diferentes momentos e locais. A figura 10 abaixo ilustra um esquema do experimento de dupla fenda de Young para a luz. Nela uma fonte de luz coerente incide sobre as fendas S_1 e S_2 e difratam até a tela de observação, onde formam um padrão de interferência.

Figura 10: Esquema ilustrativo do aparato do experimento de Young.



FONTE 10: Universidade de São Paulo⁷

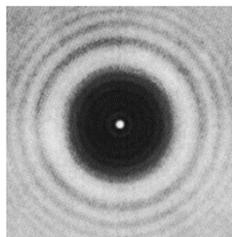
⁷ Disponível em http://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/4320293_2012/Cap3.pdf. Acessado em 05/02/2015.

Em 1818, buscando resolver definitivamente a controvérsia entre modelo corpuscular e modelo ondulatório, a Academia de Ciência Francesa, por intermédio dos físicos Pierre Simon de Laplace, Jean-Baptiste Biot e Siméon Denis Poisson, defensores do modelo corpuscular para a luz, ofereceram um prêmio para quem colocasse um ponto final a disputa. Contrariamente as esperanças destes físicos, a teoria ondulatória da luz de Young para o padrão de interferência recebeu um considerável apoio do físico francês Fresnel.

Barthem (2005), relata este episódio histórico da seguinte forma:

Um dos juízes era o matemático Siméon Denis Poisson (1781 - 1840). Poisson, querendo mostrar que a teoria de Fresnel estava incorreta, apresentou um argumento através da prova pelo absurdo. Tomando o inverso de um orifício, ele mostrou que, pela teoria de Fresnel, deveria aparecer um ponto brilhante no centro da sombra de um objeto circular o que, logicamente, seria impossível. Arago, com quem Fresnel manteve uma colaboração durante algum tempo, era o juiz e decidiu montar imediatamente a experiência. O ponto luminoso foi observado e passou a ser conhecido como a “Mancha de Poisson” (BARTHEM, 2005, p. 65).

Figura 11: Mancha de Poisson



FONTE 11: Universidade de Harvard⁸

Além do episódio descrito acima, pode-se afirmar que Fresnel deu três grandes contribuições ao trabalho de Young, a saber: i) O tratamento matemático utilizado no estudo da difração e polarização de uma luz monocromática foi extremamente rigoroso; ii) As observações experimentais de difração e polarização da luz eram de melhor qualidade, isto é, foi possível destacar detalhes que passaram despercebidos por Young; iii) Propôs que o fenômeno da polarização poderia ser melhor explicado assumindo que a luz fosse uma vibração transversal no éter, e não longitudinal como Young imaginava (OON e SUBRAMANIAM, 2009a).

O último grande passo dado a favor do modelo ondulatório da luz foi proporcionado pelos trabalhos de James Clerck Maxwell em 1874. Como um dos resultados derivados das famosas “Quatro Equações de Maxwell”, foi previsto que a velocidade das ondas eletromagnéticas,

⁸ Disponível em: <http://isites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic186206.files/images/PoissonsSpot13-1024.jpg>. Acessado em 27 de setembro de 2014.

produzidas por um circuito de corrente alternada, coincidia com o valor da velocidade da luz e seria dada por $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$, onde ϵ_0 é a permissividade elétrica do meio e μ_0 é a permeabilidade magnética do meio. Assim, Maxwell concluiu que a luz também deveria ser formada por oscilações do campo eletromagnético propagando-se através do “oceano de éter” contido espaço.

Em 1888, Heinrich Rudolf Hertz, demonstrou experimentalmente a existência das ondas eletromagnéticas tal como previsto teoricamente por Maxwell, bem como formas de controlar a frequência destas ondas produzidas.

O fenômeno da birrefringência, o qual representa um grande obstáculo tanto para o modelo corpuscular quanto para o ondulatório, somente foi explicado levando-se em consideração que a luz seria onda eletromagnética transversal e a existência de materiais com anisotropia óptica. Desta forma, a luz ao penetrar no cristal anisotrópico poderia ser dividida em dois feixes polarizados e perpendiculares que se propagariam com velocidades diferentes, formando duas imagens em locais diferentes (PEREIRA, 2011).

Esse breve relato histórico buscou mostrar como foi construída a visão de mundo dos físicos sobre a natureza da luz na virada do século XX. Ao final, procuramos evidenciar que qualquer nova questão relacionada à natureza da luz seria prontamente investigada por quase todos os cientistas utilizando o modelo eletromagnético para a luz, pois este tinha vencido, pelo menos até aquele momento, vencido a batalha científica contra o modelo corpuscular.

2. O contexto histórico da descoberta do Efeito Fotoelétrico por hertz

No final do século XIX haviam alguns problemas centrais que direcionavam o desenvolvimento da Física, muitos dos quais estavam diretamente ligados às novas formas de comunicação, especialmente no desenvolvimento da comunicação sem fio, isto é, a busca por mecanismos capazes de transmitir eletricidade em ambientes de baixa pressão (gases rarefeitos). É neste contexto que as ondas eletromagnéticas, previstas teoricamente pelas equações de Maxwell, se apresentavam como uma área de pesquisa muito promissora.

Assim, a comunidade científica tinha alguns objetivos imediatos com relação às ondas eletromagnéticas, tais como: i) demonstrar sua existência experimentalmente; ii) descrever sua natureza; iii) compreender a sua interação com o meio de propagação e iv) compará-las com a luz (MANGILI, 2012).

Com relação à visão de mundo da comunidade científica europeia por volta do ano de 1890, podemos citar a consequente “explosão” de trabalhos científicos após a descoberta dos raios catódicos e dos raios X em meados da década de 1800, por Julius Plücker. Estes trabalhos levaram à descoberta das primeiras partículas subatômicas e a proposta do modelo atômico conhecido como “Pudim de Passas” por Sir John Joseph Thomson em 1889.

Estes eram os principais campos de pesquisa para futuros físicos como Heinrich Rudolf Hertz. Ele teve a oportunidade de trabalhar com um dos maiores nomes do campo da Física alemã, o físico Herman Von Helmholtz (1821 – 1894). “Em 1878, Helmholtz tinha como tema de pesquisa os efeitos elétricos em diversos meios, assunto que viria a interessar a Hertz” (MANGILI, 2012, p. 06). Após resolver rapidamente alguns trabalhos oferecidos por Helmholtz, Hertz dedicou-se ao desafio da Academia de Ciências de Berlim, que

[...] ofereceu um prêmio para a verificação experimental da teoria de James Clerk Maxwell (1831-1879). Todavia, naquele momento, Hertz declinou da oferta de Helmholtz, retornando a ela somente alguns anos mais tarde. O trabalho para a resolução desse problema veio a ser o cerne de seus estudos sobre propagações elétricas em meios físicos e, provavelmente, teve influências importantes naquilo que conhecemos hoje por Efeito Fotoelétrico (MANGILI, 2012, p. 07).

Nos cinco anos seguintes, já em 1883, Hertz estudava os fenômenos luminosos em gases rarefeitos, pois estes ainda eram considerados “obscuros” e “inexplorados” pela comunidade científica. No entanto, alguns aspectos relacionados a este estudo o levou inevitavelmente ao problema da propagação da eletricidade através dos meios materiais, pois Hertz já desconfiava que as descargas elétricas (denominadas de *sparks*) geradas nos experimentos poderiam ser comparadas à luz. Segundo Mangili (2012, p. 08), Hertz afirmou: “A conclusão é clara: raios catódicos têm tanto a ver com eletricidade, como a luz de uma lâmpada de bulbo incandescente”.

Em 1886, quando Hertz já era professor na Universidade de Karlsruhe, ele decidiu dedicar-se inteiramente ao antigo e ainda não solucionado desafio oferecido pela Academia de Ciências de Berlim em 1879. Em seu laboratório, ele tinha elaborado e construído aparatos experimentais em que era possível controlar habilmente as *sparks* e, assim, verificar se existia alguma relação entre o comportamento delas com o esperado pelas ondas eletromagnéticas previstas pela Teoria de Maxwell, em diversos meios.

Em 1888 Hertz publicou os resultados de suas pesquisas em um artigo intitulado “A Força das Oscilações Elétricas Tratadas de acordo com a Teoria de Maxwell⁹”. Entretanto, um fenômeno

⁹ Tradução: “Die Kräfte elektrischer Schwingungen, behandelt nach der Maxwell'schen Theorie”

estranho chamou a atenção de Hertz durante as investigações, um efeito notório que, segundo ele, não poderia ser negligenciado,

[...] uma série de experimentos sobre os efeitos de ressonância entre oscilações elétricas muito rápidas que eu conduzi e, recentemente, publiquei, duas *sparks* elétricas eram produzidas pela mesma descarga de uma bobina de indução, e conseqüentemente simultâneas. Uma delas, a *spark* A, era a *spark* da descarga da bobina de indução e servia para criar a primeira oscilação. A segunda, a *spark* B, pertencia ao circuito induzido ou secundária oscilação. A última não era muito luminosa; nos experimentos, seu máximo comprimento tinha que ser habilmente medido. Eu ocasionalmente encapsulava a *spark* B numa caixa escura, sendo assim mais fácil para fazer a observação; e fazendo isso eu percebi que o máximo comprimento ficava decididamente menor dentro da caixa do que fora. Removendo em sucessão várias partes da caixa, era visto que a única porção que exercia esse efeito prejudicial era a que escondia a *spark* B da *spark* A. [...] Eu não tive a intenção de permitir que esse fenômeno distraísse minha atenção do objetivo principal que eu tinha em mente; mas isso ocorreu de um modo tão definido e perplexo que eu não poderia completamente negligenciá-lo (HERTZ, 1888 apud MANGILI, 2012, p. 14).

É neste momento que Hertz se refere a descoberta de um novo efeito, o “Efeito Hertz”, denominado posteriormente de “Efeito Fotoelétrico”. No entanto, assim que ele soube que estava lidando com efeitos da luz ultravioleta sobre as *sparks*, ele decidiu fazer três coisas: 1) Publicar um artigo sobre o tema intitulado “Sobre o Efeito da Luz Ultravioleta Sobre Descargas Elétricas¹⁰” (tradução Mangili (2012)); 2) Voltar sua atenção ao problema da criação e propagação das *sparks* e 3) Oferecer o desafio de explicar este novo fenômeno a alguns de seus assistentes de laboratório, como Wilhelm Hallwachs e Philip von Lenard.

Infelizmente Hertz não viveu o suficiente para ver o desfecho desta história. O físico alemão faleceu em 1894, seis anos após a comprovação experimental das ondas eletromagnéticas, aos 37 anos, devido a uma infecção bacteriana na orelha.

3. A explicação de Phillip Von Lenard para o Efeito Fotoelétrico

Os assistentes de laboratório de Hertz decidiram buscar uma explicação teórica para o “Efeito Hertz” somente após a realização de um exaustivo trabalho experimental, no qual pretendiam identificar as principais características do fenômeno. Wilhelm Hallwachs, em 1890, utilizando dois eletroscópios de placas de zinco carregados, um negativamente e outro positivamente, concluiu que a luz ultravioleta emitida pelas *sparks* descarregava imediatamente o eletroscópio de carga negativa, mas não influenciava o eletroscópio de carga positiva (KLASSEN, 2009).

¹⁰Tradução: "Über einen Einfluß des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung"

Outros cientistas também se interessaram pela descoberta do novo efeito. Em 1890, Sir J. J. Thomson, na Inglaterra, provou que a “eletricidade negativa” emitida pelas placas de zinco sob incidência de luz ultravioleta era da mesma natureza dos raios catódicos. Sua conclusão foi de que a placa de zinco estava emitindo “partículas negativas”, conhecidas como elétrons (KLASSEN, 2009).

Em 1902, Philip von Lenard, ex-assistente de Hertz e que tinha um conhecimento aprofundado em raios catódicos, realizou importantes experimentos nos quais era possível afirmar qualitativamente a influência de algumas variáveis do fenômeno, tais como: frequência e intensidades da radiação, potencial de corte dos raios produzidos e o tipo placa metálica.

A pesquisa de Lenard sobre o Efeito Fotoelétrico produziu evidências surpreendentes, pelo menos inicialmente, para os físicos da época. Segundo Tipler (1995),

1. Abaixo de certa frequência mínima de luz, o Efeito Fotoelétrico simplesmente não ocorre, mesmo utilizando luz com alta intensidade;
2. Acima da frequência mínima o efeito ocorre imediatamente e a intensidade de luz não influencia nas energias cinéticas dos elétrons emitidos, mas sim na quantidade de elétrons;
3. A energia cinética máxima dos elétrons é maior para as frequências mais altas de luz (TIPLER, 1995, p. 181).

As conclusões de Lenard foram inicialmente surpreendentes porque refutavam as previsões da Teoria de Maxwell para o Efeito Fotoelétrico. Considerando o modelo ondulatório para a luz e acreditando que na incidência da radiação sobre a placa há um processo de transferência de energia, a teoria eletromagnética previa:

1. O efeito deverá demorar a ocorrer após a incidência da radiação eletromagnética;
2. O efeito deverá ocorrer para todas as frequências de radiação incidente;
3. Um número grande elétrons deverá ser emitido, pois a radiação eletromagnética se espalhará pela superfície;
4. A energia cinética dos elétrons emitidos dependerá unicamente da intensidade de luz incidente, pois a energia de toda onda eletromagnética é função da intensidade da onda (amplitude) e não da frequência (TIPLER, 1995, p. 183).

As contradições entre as previsões da Teoria de Maxwell e os resultados experimentais, convenceram Lenard e muitos outros físicos de que na incidência da radiação eletromagnética sobre a placa metálica não haveria transferência de energia. Lenard elaborou uma explicação para o Efeito Fotoelétrico, denominada “Hipótese de Disparo”. Segundo ele, uma vez que os elétrons eram “ejetados” imediatamente quando a luz incidia na placa e eles tinham energia cinética que

não dependia da intensidade de luz, esta energia cinética seria decorrente do átomo. A luz apenas estava “disparando” os elétrons (NIAZ, et al 2009). Como a estrutura interna do átomo ainda era um problema em aberto, a solução de Lenard pareceu razoável para quase todos os físicos da época, pois não representava uma dificuldade para teoria de Maxwell (KLASSEN, 2009).

Entretanto, a “Hipótese de Disparo” de Lenard (1902) não estava imune a críticas pontuais. Imaginando-se que os elétrons já possuíssem tal energia cinética dentro do átomo antes de serem “ejetados”, esperava-se que o simples aquecimento da placa metálica de zinco fosse suficiente para aumentar a velocidade dos elétrons e “ejetá-los”, analogamente como ocorria com a luz ultravioleta. No entanto, não foi encontrada nenhuma evidência experimental de que temperatura influenciava no fenômeno (NIAZ et al, 2009).

Devido às limitações dos experimentos, os resultados da Lenard eram em sua maioria qualitativa e ele não foi capaz de obter relações quantitativas específicas das variáveis do fenômeno. No entanto, ele teve muitas honras por seu trabalho. Em 1905, Lenard foi agraciado com o Prêmio Nobel em Física por seu trabalho sobre os raios catódicos.

4. O modelo corpuscular de Albert Einstein como teoria rival à hipótese de Phillip Von Lenard

Em 1905, aos 26 anos de idade, o físico teórico alemão Albert Einstein refletia sobre as profundas diferenças existentes entre os conceitos teóricos (surgidos a partir dos estudos dos gases e corpos aquecidos) e a Teoria de Maxwell para propagação de ondas eletromagnéticas no espaço vazio. Suas reflexões sobre a interação de uma onda eletromagnética com um átomo resultaram em seu famoso artigo intitulado “Sobre um Ponto de Vista Heurístico Referente à Produção e Transformação da Luz¹¹”.

Na introdução deste artigo, Einstein de imediato apresenta sua ideia revolucionária de “quanta de energia da luz”, conhecida atualmente como fóton.

[...] Parece-me que as observações da “radiação de corpo negro”, fotoluminescência, produção de raios catódicos por luz ultravioleta e outros fenômenos relacionados com a emissão ou transformação de luz são facilmente e melhor compreendidas assumindo que a energia luminosa está descontinuamente distribuída no espaço. De acordo com essa afirmação aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido de uma fonte pontual, a energia não está distribuída continuamente ao longo do volume crescente do espaço, mas consiste de um número finito de energia quanta localizada em pontos do espaço que

¹¹ Tradução: “Über einen dir Erzeugung und Versandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”

move-se sem se dividir e podendo ser absorvida ou gerada apenas em unidades completas (EINSTEIN, 1905, p. 02)

Segundo Einstein, cada “quantum de luz” transportava uma quantidade de energia bem definida que era diretamente proporcional à frequência da radiação eletromagnética. A constante de proporção teria o mesmo valor da constante de Planck (h), que tinha sido recentemente proposta por Max Planck no estudo da radiação do corpo negro.

No entanto, as interpretações para a quantização da energia dada pelos dois cientistas foram completamente diferentes. Planck acreditava que os osciladores das paredes do corpo negro (átomos, na visão moderna) deveriam vibrar com, e somente com algumas quantidades de energia e que a luz estava totalmente explicada pela Teoria de Maxwell. Já Einstein propôs que, em certos fenômenos luminosos, a luz deveria ser interpretada como “pacotes de energia” ou “partículas de luz” e não como uma onda eletromagnética.

Ao longo de seu artigo, Einstein listou alguns fenômenos que poderiam ser compreendidos e utilizados para testar seu modelo corpuscular para a luz, um deles era a geração de raios catódicos por luz ultravioleta em metais, ou seja, o Efeito Fotoelétrico. Ao contrário de Phillip von Lenard, Einstein tinha convicção que a energia cinética dos elétrons emitidos era proveniente da radiação eletromagnética incidente, assim, ele utilizou a Lei de Conservação da Energia para explicar este fenômeno.

Nas palavras de Einstein este fenômeno poderia ser compreendido da seguinte forma:

[...] A energia “quanta” ($E=h.f$) penetra na camada de superfície do corpo e é transferida, pelo menos em parte, para energia cinética dos elétrons. A concepção mais simples é que um quantum de luz transfere toda a sua energia a um único elétron; assumiremos que isso acontece. [...] Um elétron com energia cinética no interior do corpo perderá parte de sua energia cinética até que atinja a superfície. Além disso, assumiremos que cada elétron, para deixar o corpo, tem de realizar uma quantidade de trabalho W (característica de cada corpo). Os elétrons emitidos com maiores velocidades [$E_c(\text{máx})$] serão aqueles localizados próximos a superfície e ejetados perpendicularmente a ela (EINSTEIN, 1905, p. 18)

Matematicamente, o fenômeno pode ser descrito da seguinte forma:

$$E_c(\text{máx}) = h.f - W$$

Se os elétrons, cuja carga elétrica é “ e ”, são freados pela aplicação de uma diferença de potencial negativa (potencial de corte) de valor V , então a relação acima torna-se:

$$e.V = h.f - W$$

Sobre as evidências experimentais encontradas por Lenard em 1902, Einstein ainda afirmou:

Além do mais eu posso afirmar que esta descrição do Efeito Fotoelétrico não contradiz as propriedades encontradas por Mr. Lenard. Se a energia de cada “quantum de luz” é transferida para energia cinética de um elétron, independentemente dos outros, então a distribuição de velocidade dos elétrons, isto é, a natureza dos raios catódicos produzidos, será independente da intensidade de luz incidente, por outro lado, sob circunstância idênticas, o número de elétrons que deixa o objeto será proporcional a intensidade de luz incidente (EINSTEIN, 1905, p. 19).

Além disso, Einstein colocou a sua ideia a prova na seguinte afirmação, “[...] se a minha fórmula derivada estiver correta, então o potencial de corte, quando plotado em coordenadas cartesianas como função da frequência da luz incidente, deverá ser uma linha reta cuja inclinação é independente da natureza das substâncias em estudo” (EINSTEIN, 1905, p. 19). Embora Lenard (1902) tivesse apontado que havia uma dependência entre a energia cinética do elétron emitido, com a frequência de luz incidente (medida através do potencial de corte), não havia ainda nenhuma teoria física que afirmasse qual era o tipo de relação matemática entre estas duas grandezas. Einstein foi o primeiro a propor que elas eram linearmente dependentes.

Esta previsão de Einstein se tornaria o principal tema de pesquisa do programa de Robert Millikan pelos próximos dez anos.

5. A rejeição da comunidade científica à proposta de Einstein e o experimento de Robert Millikan

Como a hipótese de Einstein abria mão da bem-sucedida teoria de Maxwell para os fenômenos que envolviam a interação da radiação eletromagnética com o átomo, ela foi amplamente rejeitada pela comunidade científica por cerca de 15 anos.

Em 1913, oito anos após a publicação de seu artigo revolucionário, Einstein foi indicado para Academia Prussiana de Ciência, em Berlim. Nesta época, segundo Wheaton (1983), Max Planck escreveu várias cartas a outros físicos defendendo a indicação do jovem cientista alemão, porém com algumas ressalvas:

Eu penso que ele [Einstein] pudesse ter ocasionalmente se perdido em suas especulações, como por exemplo com sua hipótese de “quanta de luz”, penso que não seja seguro nos opormos demasiadamente a ele, pois é impossível introduzir novas ideias, mesmo em ciências exatas, sem correr riscos (WHEATON, 1983, p. 194).

Niels Bohr, que tinha sido o primeiro a formular a teoria quântica do átomo, em seu discurso de recebimento do Prêmio Nobel, também expressou sua divergência em relação ao conceito de “quanta de luz” dizendo: “A despeito de seu valor heurístico, a hipótese dos quanta de

luz, o que é bastante incompatível com os chamados fenômenos de interferência, não é capaz de lançar luz sobre a natureza da radiação.” (BOHR, 1922, p. 14).

Já para o físico norte-americano Robert Millikan, o Efeito Fotoelétrico era mais fácil de ser explicado por um raciocínio bem próximo à “Hipótese de Disparo” de Lenard (1902). Segundo ele, um metal fotossensível contém osciladores de todas as frequências e estão, a todo o momento, oscilando com valores de energia ($E = h.f$). Alguns poucos destes osciladores estão em ressonância com a frequência da radiação incidente (f_0) e, assim, absorvem energia luminosa até alcançar um valor crítico de energia até ocorrer a emissão do elétron do átomo (KLASSEN, 2009).

No intuito de refutar o modelo corpuscular de Einstein (1905) para a luz, Millikan dedicou-se arduamente em construir um aparato experimental que pudesse testar a equação de Einstein para o Efeito Fotoelétrico. Após dez anos de pesquisas, em 1915, Millikan tinha verificado experimentalmente que a equação de Einstein estava correta. Além disso, ele também encontrou um valor experimental muito próximo ao valor teórico para a constante de Planck (erro de 0,5%) (KLASSEN, 2009).

No entanto, Millikan rejeitou enfaticamente o conceito de “quanta de luz”. Na publicação de seus resultados em 1916, Millikan afirmou: “[...] atrevida, para não dizer imprudente, a hipótese de que luz eletromagnética tem uma partícula de energia. Isso vai contra todas as evidências completamente estabelecidas de interferência da luz” (WHEATON, 1983, p. 241).

Millikan recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1924 por seus trabalhos sobre o Efeito Fotoelétrico e pela determinação do valor experimental da carga elétrica fundamental.

6. A explicação do efeito Compton como fator definitivo para aceitação do modelo corpuscular de Albert Einstein pela comunidade científica

O físico norte-americano Arthur Holly Compton tinha como tema de pesquisa a o espalhamento dos raios-X em alvos de alumínio em meados da década de 1920. Diversos trabalhos anteriores sobre este tema tinham relatado a diferença entre os comprimentos de onda dos feixes incidentes e espalhados. Após trabalhar por muitos anos sobre algumas explicações especulativas, como por exemplo o modelo do grande elétron, Compton percebeu que o aumento do comprimento de onda (diminuição da energia) do feixe dos raios-X, após deixar o alvo de alumínio, era influenciado pelo ângulo de espalhamento.

Então, Compton resolveu utilizar uma abordagem quântica para o fenômeno. Ele imaginou o espalhamento dos raios-X com o alvo de alumínio como uma colisão entre bolas de bilhar, ou

seja, uma colisão entre um “quantum de luz” e um elétron livre. Nesta situação, o momento linear e a energia total do sistema deveriam ser absolutamente conservados. No entanto, esta descrição tornou-se razoavelmente complicada, por que o elétron adquiria uma velocidade altíssima após a colisão, o que fez Compton levar em consideração expressões relativísticas para o momento linear do elétron (KLASSEN, 2009). Porém, ele conseguiu ao final obter uma expressão simples para o efeito,

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos\theta)$$

onde λ' é o comprimento de onda do feixe espalhado em um ângulo θ , λ_0 é o comprimento de onda do feixe incidente, m_e é a massa do elétron, h é a constante de Planck e c é a velocidade da luz.

Em seu discurso ao receber o Prêmio Nobel em maio de 1924, Millikan já previa que a solução para o dilema do “quantum de luz” estava bem próxima: “[...] Possivelmente os recentes avanços tidos por Duane, Compton, Epstein e Ehrenfest, podem vir a dar frutos trazendo até mesmo a interferência sob o controle de “quanta de luz” localizado. Mas este ainda é um caminho obscuro” (MILLIKAN, 1966, p. 65).

A explicação de Compton também não foi bem aceita pela comunidade científica. O físico Niels Bohr, que refutava veementemente a hipótese de “quanta de luz”, foi um dos principais cientistas que se dedicaram a refutar esta explicação. Entretanto, em 1925, após várias comprovações experimentais de que tanto a energia como o momento linear do “quantum de luz” e do elétron estavam sendo conservados, Bohr teria afirmado: “Parece-me que não há mais nada a fazer do que dar aos nossos esforços um possível e honrável funeral” (KLASSEN, 2009, p. 729).

Em 1926, o químico Gilbert Lewis inventou a palavra fóton para designar o conceito de “quanta de luz” e desde então a comunidade científica não teve outra alternativa a não ser reconhecer que, para determinados fenômenos, a interpretação mais adequada para luz é tratá-la como sendo composta de “pacotes de energia”.

7. O conceito de dualidade onda-partícula

A nova interpretação para da natureza da luz desafiou a compreensão e a visão determinista do mundo. No entanto, a proposta revolucionária de Einstein de 1905 de “quanta de

luz” exigia uma visão dual da natureza luz, sendo talvez esta a razão pela enorme rejeição da comunidade científica a ela. Na introdução de seu artigo, Einstein afirma:

A teoria ondulatória da luz, que opera com funções espaciais contínuas, provou-se exacerbadamente na descrição de fenômenos puramente ópticos e provavelmente nunca será trocada por outra teoria. Deve-se ter em mente, entretanto, que observações ópticas referentes à média de tempo em vez de valores instantâneos, [...] levam a contradições quando aplicada aos fenômenos de emissão e transformação de luz (EINSTEIN, 1905, p. 02).

Pela citação acima fica evidente a tentativa de Einstein negar, de certa forma, a aplicação da teoria de Maxwell aos fenômenos luminosos recentemente investigados (o problema da radiação de corpo negro, fotoluminescência, produção de raios catódicos por luz ultravioleta, etc.), porém, sem invalidar os enormes sucessos obtidos pela teoria eletromagnética da luz anteriormente.

As ideias de Einstein forneceram as bases para uma nova questão: Se uma onda (campo eletromagnético) pode apresentar-se em determinadas situação como partículas, seria possível que partículas pudessem também ter uma natureza ondulatória?

O físico francês Louis de Broglie (1892 – 1987) foi um dos primeiros a tentar responder a esta questão, influenciado pelas ideias de seu irmão mais velho, Maurice de Broglie (1875 – 1960), que investigava o fenômeno de difração de raios-X há muitos anos. Quando de Broglie sugeriu que os raios-X poderiam ser descritos como uma combinação de ondas e partículas, Louis propôs, como sua tese de seu doutorado, que o comprimento de onda do fóton, uma propriedade ondulatória, poderia ser associado ao seu momento linear, uma propriedade corpuscular, pela combinação das equações de Planck e Einstein. Assim,

$$\begin{array}{l} (1) E = h.f = \frac{h.c}{\lambda} \\ (2) E = m.c^2 \end{array} \quad \longrightarrow \quad m.c = \frac{h}{\lambda}$$

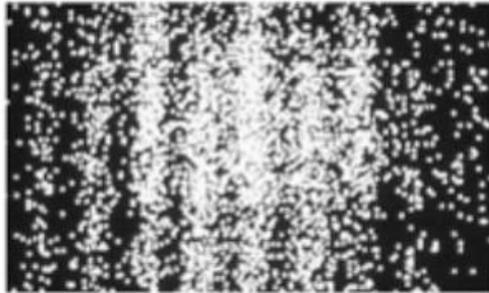
Definindo o momento linear do fóton como $p=m.c$, ele obteve:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

A equação acima estabelece que a matéria (elétrons, prótons ou nêutrons, pedras, bolas de ping-pong, etc) não tem apenas energia e momento linear como característica intrínsecas, mas também um comprimento de onda característico. Louis sugeriu que se o experimento da dupla-fenda, idealizado por Young em 1801 para a luz, fosse realizado com feixe de elétrons ou com

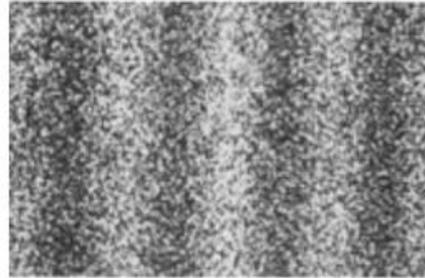
outras partículas, o resultado seria um padrão de interferência idêntico ao resultado encontrado para a luz. As figuras 12 e 13 abaixo ilustram que a previsão de Louis de Broglie estava correta.

Figura 12: Padrão de interferência construído no experimento de dupla-fenda utilizando um feixe de luz



Fonte 12: Hobson (2013)

Figura 13: Padrão de interferência construído no experimento de dupla-fenda utilizando um feixe de elétrons.



Fonte 13: Hobson (2013)

Em ambas figuras, podemos notar aspectos ondulatórios (padrão de interferência) e aspectos corpusculares (pequenos impactos localizados). A similaridade entre fótons e elétrons tornou-se um mistério.

Esta interpretação dos fenômenos quânticos, atualmente conhecida como “Paradoxo Dualidade Onda-Partícula”, tanto para a luz quanto para a matéria, foi posteriormente estabelecida no Princípio da Complementariedade de Niels Bohr de 1928. Este princípio afirma que:

A natureza da luz e da matéria é dual e os aspectos ondulatório e corpuscular não são contraditórios, mas complementares. Assim, as naturezas corpusculares e ondulatórias só podem ser detectáveis separadamente e surgem de acordo com o tipo de experiência proposta pelo cientista (HEWITT, 2007, p. 369).

Desta forma, em fenômenos como refração, difração, interferência, polarização, na experiência de dupla-fenda, a natureza evidenciada da luz é a ondulatória, ao passo que na fotoluminescência e nos efeitos fotoelétrico e Compton a natureza que ressalta é a corpuscular.

8. A Teoria Quântica de Campos – Uma possível resposta determinística e muito controversa

Os esforços da humanidade para compreender a natureza da luz contribuíram para aos estudos da estrutura da matéria. No entanto, estas duas investigações convergiram para uma pergunta final (ou inicial): Afinal de contas, do que o Universo (ou a realidade) é feito? Muitos responderiam: “Ora, de campos e partículas! ”. No entanto, a aceitação de que o Universo tem uma natureza dual está longe de ser uma unânime na comunidade científica.

O próprio Einstein expressou sua discordância em relação a outros cientistas numa troca de cartas com seu amigo Michelle Besso em 1954, “[...] Todos estes 50 anos reflexão consciente não me trouxeram para perto da resposta à pergunta: “O que são os quantas de luz”? Atualmente, Tom,

Dick e Harry pensam que eles sabem, mas eles estão errados” (EINSTEIN, 1954 apud HOBSON 2005).

Antes de discutirmos se o Universo tem uma natureza singular ou dual, vejamos resumidamente como a comunidade científica construiu os conceitos de campo e partículas.

Para construção do conceito de campo podemos citar principalmente as contribuições dos trabalhos de Isaac Newton, Michael Faraday, James C. Maxwell e Albert Einstein. Na década de 20, após a elaboração da Teoria da Relatividade Geral, pode-se afirmar que a comunidade científica concordava que todas as forças conhecidas estavam descritas em termos de campos clássicos, definidos unicamente como uma condição (estado) do próprio espaço (HOBSON, 2013).

Einstein teria expressado esta ideia da seguinte forma:

Antes de Maxwell, a realidade física [...] era pensada ser constituída de partículas de matéria [...] Após os trabalhos de Maxwell, a realidade física tem sido pensada como representação de campos contínuos, [...] e não compatíveis com qualquer interpretação mecânica”. (Apud HOBSON 2013, p. 06),

Já a construção do conceito de partícula remota aos filósofos atomistas na Grécia Antiga até o desenvolvimento da chamada Física Quântica em 1930. Ironicamente, a equação central da Física Quântica para a estrutura da matéria, a equação não-relativística de Schroedinger, é uma equação de campo. No entanto, devido à chamada Interpretação de Copenhagen, na qual $\Psi(x,t)$ foi interpretada como a probabilidade de que, no instante t , uma partícula estivesse na posição x ou de que alguma interação ocorresse com a partícula neste ponto, a equação de Schroedinger passou a tratar de partículas e não de campos (HOBSON, 2013).

É chamada Teoria Quântica de Campos – TQC – o desenvolvimento da equação de Schroedinger relativística, unindo a Teoria da Relatividade com princípios de Física Quântica, para descrição de campos eletromagnéticos quantizados. De acordo com a TQC, o “quantum” é definido como contáveis excitações de campos estendidos e a energia de um “quantum” ($E = h.f$) representa a energia adicionada a estes campos. Não existe fração do “quantum”, por isso ele é instantaneamente criado ou destruído. Por fim, ele está espacialmente estendido até o infinito, não existindo posição específica para o “quantum” (HOBSON, 2013).

O físico colaborador de maior destaque no desenvolvimento da TQC foi Dirac. Ele mostrou que a equação de Schroedinger era a versão não-relativística de uma equação relativística geral de campos, a qual ele denominou de “Equação de Dirac”. Assim, ele concluiu que nenhuma destas duas equações descreviam o comportamento partículas, somente de campos.

A TQC também tem como princípio geral que todos os campos são intrínsecos ao espaço, isto é, todos os campos já estão lá. Desta forma, elétrons, prótons, nêutrons, quarks e outras partículas (e anti-partículas), são definidos como “campos quantum de matéria”, ou simplesmente, “quantum de um campo fundamental” (HOBSON, 2013). Uma vez que todas estas partículas geram um padrão de interferência no experimento de dupla-fenda, conclui-se que este campo não pode ser somente um campo eletromagnético. Esse campo fundamental que dá origem a todas as partículas de matéria é comumente denominado “Campos de Matéria” ou “Campos Fermions” (HOBSON, 2004).

De acordo Hobson (2013), a TQC elimina o paradoxo dualidade onda-partícula no experimento de dupla-fenda, pois é assumido que no Universo só existem campos. A estranha e estreita similaridade entre os efeitos produzidos por fótons e elétrons ilustrada na seção anterior (Figuras 12 e 13) pode ser explicada por uma similaridade fundamental entre eles.

O padrão de interferência pode ser facilmente explicado se é assumido que os “quantuns” (elétrons, prótons, nêutrons ou fótons) são campos estendidos que passam pelas duas fendas por difração e, em seguida, sofrem interferência em diferentes pontos do espaço. Duas variações neste experimento foram feitas pelos cientistas. Na primeira, reduziram a intensidade de tal forma que cada “quantum” fosse emitido individualmente. Na segunda, ainda emitindo os “quantuns” individualmente, é deixado apenas uma única fenda aberta. Enquanto que na primeira situação o padrão de interferência permanece o mesmo, na segunda tem-se apenas uma única faixa brilhante alinhada com a fenda aberta, evidenciando que agora não há mais interferência (HOBSON, 2013).

Nas figuras 12 e 13 também podemos notar o que muitos físicos acreditam ser os aspectos corpusculares dos “quantuns”, inúmeros impactos pontuais, como se tivessem sido feitos por partículas. Os pequenos pontos brilhantes na figura 12 mostram que o “quantum” pode interagir localmente com átomos, mas isto não mostra que o “quantum” é uma partícula. Por exemplo, um balão também pode interagir localmente com a ponta de uma agulha. Segundo Hobson (2013), a localização vista nas figuras 12 e 13 é uma característica do detector, que é feito de átomos localizados, mais do que “quantuns” localizados. Argumentos similares são utilizados para descrever a trajetórias de “partículas” em câmaras de bolhas.

Em suma, o padrão de interferência nas figuras 12 e 13 confirmam que os “quantuns” são campos e excluem a possibilidade de serem partículas, enquanto que as interações pontuais podem ser explicadas tanto por campos como por natureza corpuscular. Portanto, pode-se explicar facilmente todas as evidências experimentais citadas anteriormente assumindo que o “quantum” é um campo estendido que atravessa as fendas abertas.

Entretanto, é importante destacar que os apontamentos de Hobson (2013) não são aceitas totalmente dentro da comunidade científica. Por exemplo, Robert J. Sciamanda, cientista da Universidade da Pensilvânia Edinboro, ao comentar o artigo de Hobson (2013), afirma que se estendermos as ideias do autor chegaremos à conclusão de que não existem nem partículas nem campos. Para Sciamanda, a TCQ é um modelo matemático muito útil, mas com pouco ou nada faz para identificar um modelo para realidade ontológica (partículas, campos, ondas ou qualquer coisa que seja) da entidade descrita.

Anexo B – As máquinas fotográficas digitais e o *chip* CCD

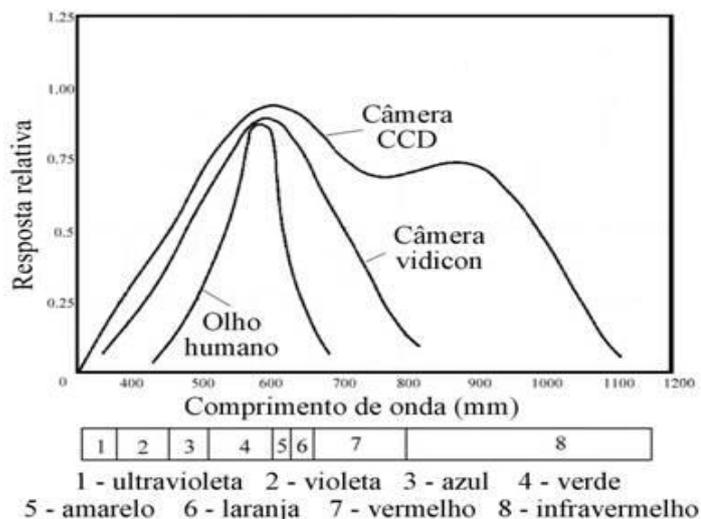
Nos últimos anos, um dos aparelhos eletrônicos que mais se popularizaram foi a máquina fotográfica digital. A facilidade para tirar fotos, sem a necessidade de escolher e comprar o filme mais adequado para cada ocasião e tipo de iluminação, a qualidade das imagens e a possibilidade de armazenar uma quantidade enorme de fotos em computadores são algumas das vantagens responsáveis por essa popularização.

Mas qual o recurso tecnológico que torna a máquina fotográfica digital tão mais versátil que a máquina fotográfica tradicional? Trata-se de um componente chamado **dispositivo de carga acoplada**, mais conhecido como CCD (sigla do nome em inglês, *charge-coupled device*). O CCD é um dispositivo de captação de luz muito sensível, formado por um pequeno *chip* quadrado de material semicondutor e que possui uma grande quantidade de sensores fotoelétricos.

Cada sensor fotoelétrico registra o que chamamos de **pixel**, que é um pedaço muito pequeno da imagem, como se ela fosse um mosaico formado de pedras minúsculas. Quanto maior o número de sensores fotoelétricos no *chip*, menor será o pedaço da imagem capturado em um *pixel* e, portanto, maior será a definição da imagem completa.

E como funcionam esses sensores fotoelétricos? Quando um fóton proveniente do objeto fotografado atinge um desses sensores, um elétron é liberado por **efeito fotoelétrico** e captado por um sistema eletrônico que registra qual sensor recebeu. Quanto mais fótons atingem determinado sensor, mais elétrons são registrados pelo sistema eletrônico. Em seguida, o sistema soma a quantidade total de elétrons vindos de cada sensor e mapeia sua localização, reconstituindo a imagem completa. É dessa maneira que se forma uma imagem digital.

A máquina fotográfica digital também possui um sistema de lentes que, como nas máquinas fotográficas tradicionais, serve para focalizar a imagem. A diferença é que essa imagem, que antes era projetada sobre filme fotográfico e ali registrada por reação química, agora é formada sobre o CCD e registrada por um sistema eletrônico. Podemos dizer que esses dois últimos dispositivos assumiram a função antes desempenhada pelo filme fotográfico e com eficiência muito maior na detecção de luz, melhor do que a do próprio olho humano.



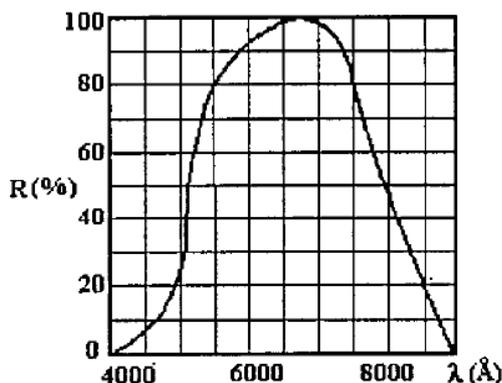
A crescente miniaturização dos componentes eletrônicos provavelmente tornará as máquinas digitais cada vez menores e mais eficientes e fará com que as máquinas fotográficas tradicionais e os filmes fotográficos se tornem obsoletos.

Referência:

B. S. Anna, G. Martini, H. G. Reis e W. Spinelli - **Conexões com a Física** – Volume 03 – Capítulo 18 - 1ª Edição – Ed. Moderna, 2010. p. 370.

Anexo C - Sistema Automático de Iluminação Pública

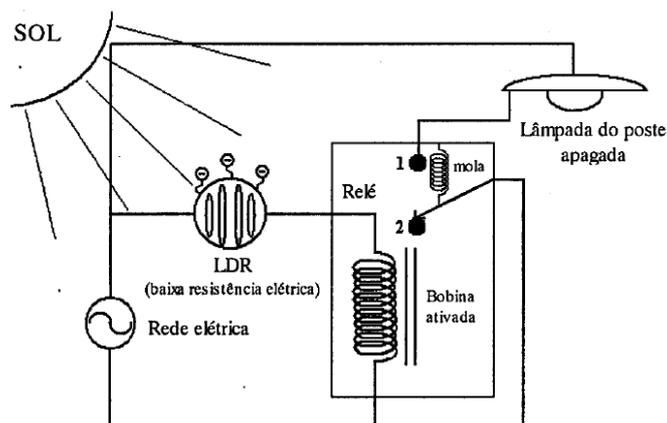
Inúmeras aplicações deste efeito estão presentes em nosso dia a dia. Um exemplo disso é o dispositivo LDR (resistência dependente de luz). A figura abaixo mostra a sensibilidade da resistência elétrica (R) de um dispositivo LDR para diferentes valores de comprimento de onda da luz incidente.



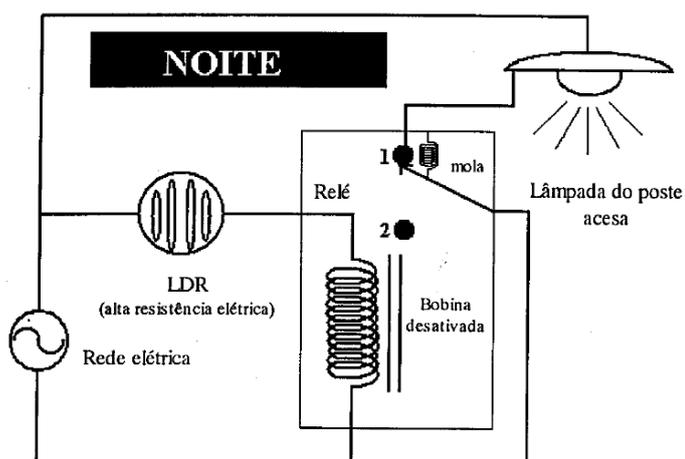
Sensibilidade de um LDR para vários comprimentos de onda da luz incidente.

O funcionamento deste dispositivo é baseado no efeito fotoelétrico. Ao ser iluminado, por exemplo, quando exposto ao sol, o dispositivo passa a ter uma resistência elétrica menor, uma vez que ele passa a dispor de elétrons livres devido à ação da luz incidente, conforme ilustrado na figura a seguir. A resistência do LDR aumenta enormemente na ausência de luz, por exemplo, à noite, uma vez que faltam elétrons livres. Note que sensibilidade máxima da resistência do LDR se encontra na faixa da luz visível (4000 a 7000 Å). O material base do LDR é o sulfeto de cádmio (CdS) que é sensível à luz na faixa do visível. Para outras aplicações (por exemplo, na faixa do infravermelho, como no caso do controle remoto de televisão) é necessário utilizar outros materiais (por exemplo, o arseneto de gálio).

Uma aplicação do dispositivo LDR está no princípio de funcionamento do sistema de iluminação pública. Durante o dia a luz solar promove no LDR elétrons ligados a elétrons livres, conforme indicado acima. A resistência elétrica do LDR se torna mais baixa e a corrente elétrica atravessa a bobina, gerando um campo magnético, como se ela fosse um ímã. A chave do relé é então atraída para a posição 2, impedindo que a corrente elétrica passe pelo filamento da lâmpada. Observe a figura abaixo.



À noite, a resistência elétrica do LDR é alta, pois a luz solar não está presente, impedindo que a corrente elétrica atravesse a bobina, que deixa de atuar como ímã. A mola obriga então a chave do relé a retornar para a posição 1, acionando a lâmpada, que se apagará automaticamente no dia seguinte, uma vez que o circuito volta à situação mostrada abaixo

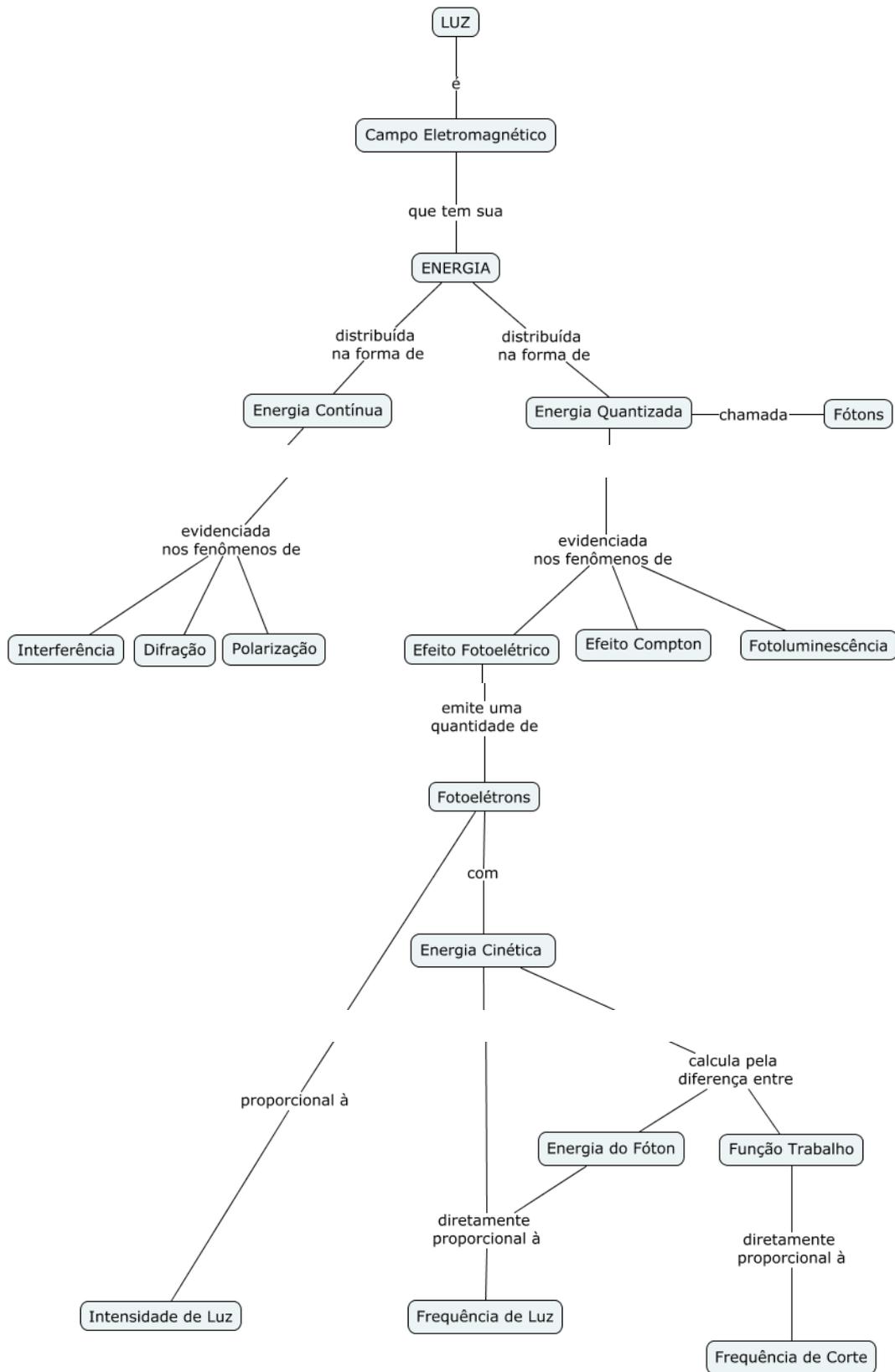


Outras aplicações do efeito fotoelétrico: controle automático de portas de elevadores e de esteiras de supermercados. Neste caso um feixe de luz, ao ser interrompido, aciona um sistema automático que abre a porta do elevador ou movimenta a esteira.

Referência:

VALADARES, E. de C. e MOREIRA, A. M: *In: Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 15, n. 2, p. 121-135, ago. 1998 (adaptado)

Anexo D - Mapa conceitual para natureza dual da luz



REFERÊNCIAS

BARTHEM, Richard. *A Luz*. São Paulo: Editora Livraria da Física – Sociedade Brasileira de Física, 2005.

BOHR, N. (1922). *The structure of the atom. Nobel lecture*, 11 de Dezembro, 1922. Disponível em: <http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1922/bohr-lecture.html>. Acessado em 27 de setembro de 2014.

BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. *Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de Física Moderna*. Investigações em Ensino de Ciências, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 387-404, dez. 2005.

CARVALHO, S. H. M. *Einstein: Uma Luz sobre a Luz*. Disponível em: <<http://fisica.cdcc.usp.br/Professores/EinsteinSHMCarvalho/EinsteinSHMCarvalho.pdf>>. Acessado em 05/02/2015.

EINSTEIN, A. *Concerning the heuristic point of view toward the emission and transformation of light*. American Journal of Physics, v. 33, n. 5, 1–16.

FORATO, T. C. M. *A Natureza da Ciência como Saber Escolar: um estudo de caso a partir da história da luz*. Tese (Doutorado em Educação) Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo. 2009.

GALILI, I. *Excursion to the history of image concept and vision: From pythagoras to kepler*. Disponível em: http://hipst.eled.auth.gr/hipst_docs/Image_Igal.pdf. Acessado em 01/04/2015.

GOMES, J. L. A. M. C. *Conceito de calor: Contexto Histórico e Proposta para sala de aula*. 2013. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2013.

HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. 9ª Edição – Ed. Bookman, 2007.

HOBSON, A. *Electrons as field quanta: A better way to teach quantum physics in introductory general physics courses*. 2005. Disponível em: <<http://physics.uark.edu/hobson/pubs/05.03.AJP.pdf>>. Acessado em 05/02/2015.

HOBSON, A. *There are no particles, there are only fields*. 2013. Disponível em: <<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1204/1204.4616.pdf>>. Acessado em 05/02/2015.

KLASSEN S. *The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom*. Science & Education, v. 20, p. 719-731, nov. 2009.

KRAGH, H. *A sense of history: History of science and the teaching of introductory quantum theory*. Science & Education, v. 1, p. 349–363. 1992.

LEVIN, E. *Conceitos e métodos da física moderna numa perspectiva histórica*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 3, p. 305-306. 2007.

MANGILI, A. I. *Heinrich Rudolph Hertz e a “descoberta” do Efeitofotoelétrico: Um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula*. História da Ciência e Ensino: Construindo Interfaces, v. 6, 2012 – pp. 32-48.

MARQUES, D. M.; CALUZI, J. J. *Contribuições da história da ciência no ensino de ciências: alternativa de inserção de física moderna e contemporânea no ensino médio*. Revista Enseñanza de las Ciencias, número extra. VII Congreso. 2005. Disponível em: <http://ddd.uab.cat/pub/edlc/edlc_a2005nEXTRA/edlc_a2005nEXTRAp71conhis.pdf>. Acessado em 28/04/2015.

- MARTINS, A. F. P. *História e filosofia da ciência no ensino: Há muitas pedras nesse caminho...* Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 24, n. 1, p. 112-131, abr. 2007.
- MILLIKAN, R. *The electron and the light-quant from the experimental point of view* (Nobel Prize acceptance speech delivered on May 23, 1924). Nobel lectures (pp. 54-66). Amsterdam: Elsevier. 1965.
- MOREIRA, M. A.; MASSONI, N. T.; OSTERMANN, F. “*História e epistemologia da Física*” na licenciatura em física: uma disciplina que busca mudar concepções dos alunos sobre a natureza da Ciência. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 1, p. 127-134. 2007.
- NIAZ, M.; KLASSEN, S.; McMILLAN, B.; METZ, D. *Reconstruction of the history of the photoelectric effect and its implications of general physics textbooks*. Science & Education, v. 94, n. 5, p. 903-931, sep. 2010.
- OON, P. T.; SUBRAMANIAM, R. *The nature of light: I. A historical survey up to the pre-Planck era and implications for teaching*. Physics Education, v. 44, n. 4, p. 384-391. Jul. 2009a.
- OON, P. T.; SUBRAMANIAM, R. *The nature of light: II. A historical survey from the Planck era and implications for budding physicists*. Physics Education, v. 44, n. 4, p. 392-397. Jul. 2009b.
- PEREIRA, J. L. *Controvérsia entre o modelo corpuscular e ondulatório da luz: um caminho para o ensino de óptica no nível médio*. Dissertação, 2011, 98 f. (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ. Rio de Janeiro, 2011.
- SAMBA, K. K. K.; RICARDO, E. C. *Categorias da inserção da História e Filosofia da Ciência no ensino de ciências da natureza*. Revista Educação Pública, v. 23, n. 54, p. 943-970, dez. 2014.
- SILVA, B. V. C. *A natureza da Ciência pelos alunos do ensino médio: um estudo exploratório*. Latin American Journal of Physics Education, v. 4, n. 3, set. 2010.
- SILVA, B. V. C.; MARTINS, A. F. P. *Júri simulado: um uso da história e filosofia da Ciência no ensino de óptica*. A Física na Escola, v. 10, n. 1, 2009. SILVA, I; JÚNIOR, O. F. *A descoberta do efeito Compton: De uma abordagem semi-clássica a uma abordagem quântica*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 1, 1601. 2014.
- TIPLER, P. *FÍSICA: FÍSICA MODERNA*. Vol. 4. 3ª edição. LTC, Rio de Janeiro. 1995
- TOSSATO, C. R. *Os fundamentos da óptica geométrica de Johannes Kepler*. Scientia& Studia, São Paulo, v. 5, n. 4, p. 471-99, 2007.
- WHEATON, B. R. *The tiger and the shark: Empirical roots of wave-particle dualism*. Cambridge, England: Cambridge University Press. 1983.