



Instituto de Física

Universidade Federal do Rio de Janeiro

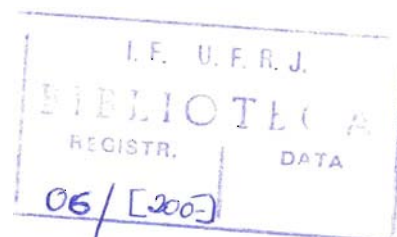
Trabalho de Final de Curso

O Efeito Fotoelétrico

Edson Alan Pinheiro da Silva

Orientador: Francisco Arthur Braun Chaves

06/[200-]



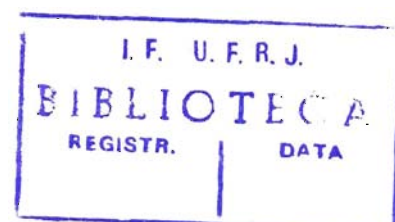
AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de agradecer a meu orientador, Francisco Artur Braun Chaves, e minhas co-orientadoras, professoras Susana de Souza Barros e Lígia de Faria Moreira, pelas críticas e sugestões.

Sou grato a todos os meus amigos da universidade que me apoiaram e acompanharam nos momentos mais difíceis.

Quero salientar a importância dos meus pais, Wilson e Pedrina, da minha noiva, Silvana, e do meu tio Felipe, na conclusão deste trabalho, dando-me completo apoio, imprescindível em todas as ocasiões.

Agradeço ao Instituto de Física e à UFRJ.



RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo sugerir ou apontar atividades no sentido de chamar a atenção do aluno para a importância e o impacto do Efeito Fotoelétrico no mundo contemporâneo e para a beleza da Física, que busca respostas para as complexidades que a natureza encerra.

A primeira atividade empregada, de acordo com o propósito acima mencionado, é mostrada em um plano de aula, abordando os temas citados abaixo, e um texto que resume em poucas linhas as principais peculiaridades do Efeito Fotoelétrico, para que os estudantes leiam antes da aula em questão.

São apresentados, em seguida, tópicos considerados importantes para a compreensão do Efeito Fotoelétrico, que é o tema principal deste trabalho, e um conteúdo histórico a respeito de alguns fatos responsáveis pela origem do Efeito Fotoelétrico. Posteriormente, este Trabalho expõe as principais características do Efeito Fotoelétrico e suas aplicações.

Uma outra atividade, de caráter mais prático, é a apresentação de um experimento relativo ao Efeito Fotoelétrico, que pode auxiliar os professores durante sua explanação.

Por fim, é exposta uma conclusão concernente ao trabalho de Einstein para o Efeito Fotoelétrico.

Sumário

1 – Introdução	1
2 – Metodologia	3
2.1 – Plano de Aula	3
2.2 – Motivação Inicial (O Efeito Fotoelétrico)	4
3 – Referencial Teórico do Século XIX	6
3.1 – Teoria Ondulatória da Luz	6
3.2 – Espectro de Luz de um Corpo Aquecido	10
3.3 – Geração de Ondas Eletromagnéticas	13
3.4 – Objeções à Natureza da Luz	16
4 – O Efeito Fotoelétrico	19
4.1 – Breve Histórico	19
– O Fóton: propriedade corpuscular da radiação	23
4.2 – Introdução ao Efeito Fotoelétrico	23
4.3 – Teoria de Einstein para o Efeito Fotoelétrico	27
– Corpúsculos de Energia	27
– Resposta de Einstein às Objeções à Natureza da Luz	30
– Considerações Finais	34
5 – Aplicações do Efeito Fotoelétrico no Cotidiano	37
6 – Experimento Envolvendo o Efeito Fotoelétrico	44
6.1 – Objetivo	44
6.2 – Material Empregado	44

6.3 – Série Triboelétrica	45
6.4 – Roteiro Experimental	46
6.5 – Descrição Experimental	46
6.6 – Questões	52
7 – Conclusão	53
8 – Bibliografia	54

1- Introdução

Segundo a parte três dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN's) [1] para o ensino médio, que trata das Ciências da Natureza, da Matemática e de suas Tecnologias, é fundamental trabalhar no ensino médio com modelos macroscópicos, sem deixar de lado a discussão de modelos microscópicos.

Os PCN's apontam que é possível encontrar espaço na óptica e no eletromagnetismo, por exemplo, para inserir esses modelos e mostram, também, que a natureza ondulatória e quântica da luz e sua interação com os meios materiais, assim como os modelos de absorção e emissão de energia pelos átomos, são bons exemplos que abrem espaço para uma abordagem da estrutura da matéria. Para isso, contudo, é inevitável que se introduzam alguns conceitos básicos de Física Moderna.

Alguns livros tais como [2, 3, 10] tratam a Física Moderna de forma introdutória. O livro [2] relaciona fenômenos químicos e biológicos com conceitos de fótons. Estabelece uma relação entre a Física Clássica e a Moderna, em interdisciplinaridade com a Geografia. Outro ponto interessante é uma atividade de contextualização, que auxilia na compreensão do caráter estatístico e dual da matéria. Em [10], a Física Moderna é abordada em três capítulos, nos seguintes tópicos: Relatividade Especial, Física Quântica e Física Nuclear. Sem aprofundamento matemático, o livro consegue tratar do tema de uma maneira interessante, ilustrativa e sem perda das informações elementares. Em [3], são abordados raios catódicos e espectro de emissão eletromagnética. É válido destacar que os capítulos são breves, sendo acompanhados por alguns exercícios resolvidos e outros a serem resolvidos.

O Efeito Fotoelétrico foi escolhido como tema deste Trabalho de Final de Curso pelos seguintes motivos, a saber: sua grande aplicação no cotidiano; o cinquentenário do falecimento de Einstein; pelo fato de este ano de 2005 ter sido escolhido pela União Internacional de Física Pura e Aplicada (e, também, adotado pela ONU) como o "Ano Mundial da Física", pelo aniversário de cem anos da publicação dos trabalhos de Albert Einstein que promoveram grandes impactos na ciência: o Efeito Fotoelétrico, o Movimento Browniano e a

Relatividade Restrita. E, finalmente, porque, dos Trabalhos citados acima, foi o Efeito Fotoelétrico que propiciou a Einstein o Prêmio Nobel em 1921.

Este Trabalho expõe, inicialmente, um plano de aula, com propostas de abordagens dos temas citados a seguir, e um texto introdutório do Efeito Fotoelétrico, no Capítulo 2, a fim de que os alunos possam adquirir um conhecimento prévio para as aulas em questão.

O Capítulo 3 (Referencial Teórico do Século XIX) é uma breve introdução para a compreensão do Efeito Fotoelétrico.

O Capítulo 4 trata o Efeito Fotoelétrico com detalhe; iniciando com sua descoberta, mostrando a limitação do conhecimento, no que dizia respeito à estrutura da matéria e ao sistema óptico, na tentativa de explicar esse efeito e mostrando, posteriormente, como Einstein conseguiu resolver questões, até então, inexplicáveis.

São mostradas, no Capítulo 5, algumas aplicações do Efeito Fotoelétrico no cotidiano, com a finalidade de motivar o aprendizado.

Há, ainda, o Capítulo 6, em que é exposto um roteiro experimental simples e de baixo custo, o que o torna acessível à sala de aula.

O Capítulo 7, por fim, mostra a conclusão do Trabalho, no que diz respeito à contribuição de Einstein para o Efeito Fotoelétrico.

2- Metodologia

O item 2.1 (Plano de aula) tem como objetivo específico mostrar ao aluno as principais peculiaridades do Efeito Fotoelétrico e algumas das diversas aplicações que são encontradas no cotidiano. O item seguinte (2.2) mostra uma motivação inicial para ser entregue aos alunos na aula que antecede a aula sobre o Efeito Fotoelétrico, para que os alunos possam ter algum conhecimento básico inicial.

2.1 Plano de Aula

- Colégio (nome).
- 3ª série – Ensino Médio – Turma Professor
- Disciplina – Física.
- Tema: O Efeito Fotoelétrico.
- Objetivos Específicos
 - ✓ Mostrar o histórico, as aplicações e principais características do Efeito Fotoelétrico.
- Duração: 90 min. (2 tempos de aula).

Tempo (min)	Materia	Atividades Docentes (estrategias)	Atividades Discentes (dinâmica)	Material Didático (auxiliar)
---	Motivação inicial na aula anterior a aula em que o plano de aula será aplicado, será distribuído um texto pertinente ao Efeito Fotoelétrico, a fim de que os alunos possam refletir e ter uma base inicial para a discussão em sala de aula.	Entregar o texto exibido no item 2.2 aos alunos	Os alunos devem ler e refletir sobre o texto (Motivação Inicial Efeito Fotoelétrico) para a próxima aula	Texto: Motivação Inicial (Efeito Fotoelétrico)
15	O desenvolvimento histórico abordado no item 4.1 deste Trabalho, focalizando o aparecimento das questões que ficaram sem explicação no século XIX.	Explicação.	Atenção e Reflexão orientada.	Exibir slides ilustrativos
15	Os experimentos que levaram à descoberta do Efeito Fotoelétrico, detalhes do experimento de Hertz e relato completo de dois experimentos do Efeito Fotoelétrico.	Explicação	Atenção e Reflexão orientada.	Quadro de giz – giz colorido e slides ilustrativos dos experimentos
20	Experimento realizado em sala de aula, mostrando o Efeito Fotoelétrico e empregando o conteúdo do capítulo 3, as 3 características principais do Efeito Fotoelétrico que não podiam ser esclarecidas em termos da teoria ondulatória clássica, e a teoria quântica de Einstein para o Efeito Fotoelétrico.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Explicação do experimento, mostrando os problemas da absorção de uma energia. ➤ Evitar termos de desconhecimento do aluno. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reflexão orientada. ➤ Anotações. ➤ Perguntas a respeito do experimento e das questões abordadas. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Experimento simples de Efeito Fotoelétrico ➤ Livro didático que trate do Efeito Fotoelétrico. ➤ Slides ilustrativos.
25	A explicação de Einstein para as 3 objeções contra o Efeito Fotoelétrico.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fazer algumas analogias com os fatos do mundo macroscópico com o qual estão familiarizados, com a absorção discreta, mostrando, com auxílio do 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reflexão orientada. ➤ Anotações. ➤ Perguntas a respeito do 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Experimento simples de Efeito Fotoelétrico. ➤ Livro didático

		<p>experimento, a necessidade da quantização da energia.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Responder as questões apresentadas no contexto anterior ➤ Estimular debate, como verificação e revisão. ➤ Começar a inserir termos desconhecidos pelos alunos. 	<p>experimento e das questões abordadas.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Debate orientado. 	<p>que trate do Efeito Fotoelétrico</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Slides ilustrativos
15	<p>Aplicações do Efeito Fotoelétrico. Últimos comentários a respeito de Einstein e do Efeito Fotoelétrico. Tarefa de fixação em grupo. os grupos devem formular perguntas a respeito do assunto para serem respondidas por outros grupos</p>	<p>Acompanhar a tarefa, atendendo aos grupos, separadamente, e estimular o debate</p>	<p>Responder às questões propostas, discutir a respeito da tarefa e redigir uma síntese a respeito do Efeito Fotoelétrico</p>	<p>Tarefas dos alunos e Slides das aplicações do Efeito Fotoelétrico.</p>

Obs.: cabe lembrar a flexibilidade de todos os planos em suas várias etapas, que dependerão do interesse da turma e das oportunidades reais.

2.2 Motivação Inicial (O Efeito Fotoelétrico)

A teoria da luz, do físico escocês James Clerk Maxwell, proposta em 1864, em que a luz é meramente uma onda eletromagnética, abria a possibilidade de serem produzidas outras espécies de ondas eletromagnéticas, a partir de circuitos elétricos. Heinrich Hertz, no fim do século XIX, foi o primeiro a obter sucesso nessa área. Durante as suas experiências, Hertz notou que a luz produzida por uma fâsca num circuito podia induzir uma corrente elétrica em outros circuitos afastados, que empregava para detectar as ondas eletromagnéticas.

Alguns anos depois, com a descoberta do *elétron* por parte de Thomson, ficou claro que o efeito observado por Hertz, designado de **Efeito Fotoelétrico**, era devido ao escape de alguns elétrons em um metal, quando era atingido por luz.

A energia eletromagnética da luz é absorvida pelos elétrons no metal, fazendo com que alguns deles saltem para fora deste. A questão que não se conseguia esclarecer no início do século XX era: Por que a energia dos elétrons liberados por Efeito Fotoelétrico não aumentava quando a intensidade da luz era aumentada, mas sim aumentava em função da frequência da luz que incidia sobre o metal? De fato, há uma frequência limiar da luz, abaixo da qual não ocorre Efeito Fotoelétrico.

A energia dos elétrons libertados por Efeito Fotoelétrico pode ser medida, ligando-se a um dispositivo chamado célula fotoelétrica uma fonte externa que

seja contrária à força eletromotriz da célula fotoelétrica, de modo que a corrente no circuito seja anulada.

Em 1905, quando já não havia mais dúvidas acerca da natureza ondulatória da luz, Einstein publicou um artigo onde explicava perfeitamente o Efeito Fotoelétrico, admitindo que a luz fosse composta por corpúsculos, **fótons**, com energia diretamente proporcional à frequência da luz.

Na teoria dos fótons, a energia que transporta a luz não é absorvida ou emitida de forma contínua, porém de forma discreta: podem ser emitidos ou absorvidos 1, 2, 3, etc. fótons, todavia não uma fração deles. Essa teoria explanava, também, o sucesso da hipótese de Max Planck (1900), quem, para poder explicar o espectro de luz produzido por um corpo aquecido, admitiu que a energia da radiação do objeto só podia ter valores discretos: um **quantum** de energia.

Os trabalhos de Planck e de Einstein dariam origem à **física quântica**. Na física quântica todos os objetos físicos são, tanto ondas, como partículas (dualidade onda-partícula). A energia passa de um lugar para outro, como se fosse uma onda, mas é absorvida ou produzida em forma discreta, como se se tratasse de partículas.

Por fim, a energia, tal como qualquer tipo de matéria, é tanto onda como partícula. Isso é o que acontece no mundo submicroscópico, contudo ao nível macroscópico da nossa experiência cotidiana aparece uma distinção clara entre ondas e partículas.

3- Referencial Teórico do Século XIX

A fim de compreender o relevante significado do Efeito Fotoelétrico, foi considerado o grau de conhecimento dos cientistas a respeito da Teoria Eletromagnética da Luz (Teoria Ondulatória da Luz e Teoria Eletromagnética) e da estrutura da matéria, por volta de 1890. [4] [11]

3.1 Teoria Ondulatória da Luz

Desde a Antiguidade o homem especula a respeito da natureza da luz. A primeira descoberta importante surgiu ainda na Grécia, com Heron, de Alexandria, que, fazendo experiências com espelhos, descobriu que a luz caminhava em linha reta, o que levou à seguinte lei: o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

Inúmeros fatos sugerem, hoje, a propagação retilínea da luz: por exemplo, quando a luz do Sol penetra entre as árvores de uma floresta (Figura 1), ou ainda, quando se acende o farol de um carro em uma rua escura. [10]

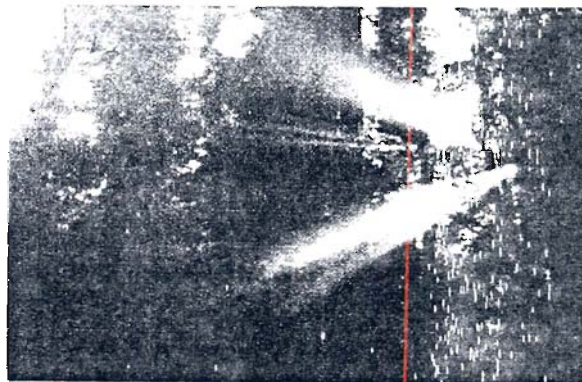


Figura 1: Propagação retilínea da luz. [10]

Tal fenômeno, porém, carecia de uma explicação mais plausível. Foi somente em 1621 que o matemático Wilbord Snell explicou esse fenômeno, mostrando que, ao penetrarem em um novo meio, os raios mudam de direção.

Contudo, isso não contradiria a lei formulada por Heron? Snell afirma que não, porque a luz continua em trajetória retilínea, depois de atravessar o novo meio. Ele mediu o desvio em vários meios como água, ar, vidro, e constatou

que o mesmo variava de acordo com o meio. A esse fenômeno ele chamou refração. Outro fato que intrigava os cientistas da época era saber se, afinal, a luz seria uma partícula ou uma onda.

Em 1678, o físico e astrônomo holandês Christian Huygens (1629-1695) sugeriu na Academia de Ciências de Paris que o índice de refração era determinado pela velocidade com que a luz atravessava o meio, formulando, como resultado, a teoria ondulatória da luz. Ele pensava que a luz fosse um movimento ondulatório, e, se estivesse certo, o índice de refração seria maior, quanto menor fosse a velocidade com a qual a luz penetrasse no meio. Mas, se a luz fosse composta de partículas, ocorreria o oposto, isto é, em um meio mais refringente a velocidade seria maior, porque as partículas seriam atraídas pelas moléculas.

Contudo, não havia, à época, tecnologia disponível para medir a velocidade da luz com precisão, de maneira que permaneceu a dúvida quanto à natureza do fenômeno luminoso, embora Huygens estivesse certo quanto à refração ser decorrente da alteração de velocidade da luz, como se observa, mais tarde.

Isaac Newton (1642-1727) também fez importantes descobertas nesse campo, principalmente com relação às cores. A princípio, fazendo um feixe de luz branca (solar) passar por um prisma, percebeu que este se decompunha em um espectro de cores (do vermelho, alaranjado, amarelo, azul, até o violeta), e que podia reverter e recompor em luz branca este espectro, utilizando um segundo prisma. Como resposta, descobriu que a luz branca era formada por todas as cores do espectro. Entretanto, isolando as cores, nada podia fazer para alterar sua natureza. Essa teoria o levou a pensar que se tratava de partículas e não de ondas, mas não havia comprovação para isso.

O fato de Newton ser um cientista de enorme influência, talvez fizesse prevalecer sua teoria, se não fossem dois fatos: o cientista italiano Francesco Grimaldi, contemporâneo de Newton, que, ao estudar a formação de sombras, verificou que elas nunca apresentavam contornos nítidos, chamando este fenômeno de difração; e, principalmente, pouco tempo depois, quando Thomas Young, por volta de 1801, partindo dos mesmos pressupostos, realizou a seguinte experiência: fez um feixe de luz atravessar uma parede com fendas, e a sombra projetada em um anteparo alternava sombras e luz. Concluiu que,

pela natureza ondulatória da luz. o anteparo. quando as cristas das ondas se interceptavam, mantinha a luz, no entanto, quando os vales se interceptavam, permanecia em sombra. Atualmente, essa alternância de luz e sombra é chamada de Padrão de Interferência, e decorre do reforço e anulação de ondas que chegam em tempos diferentes.

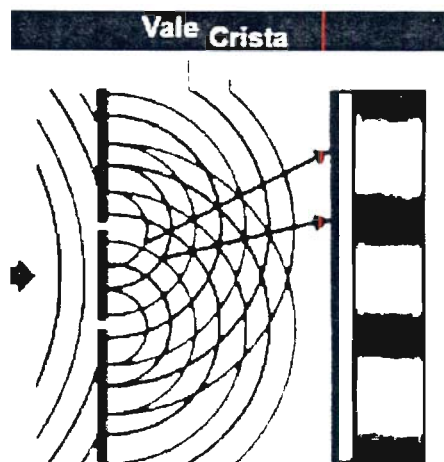


Figura 2: Experiência de Young. [15]

Com o experimento de Young, a teoria ondulatória passou a ser dominante, pois a teoria de partículas não conseguia explicar os fenômenos de interferência e difração da luz. A dúvida sobre a natureza da luz, apesar disso, era como a luz se propagava no vácuo, sem um meio material capaz de transportar suas ondas, como havia sido proposto por Huygens.

Diante deste dilema, Huygens recorreu à idéia do éter, conceito que havia surgido séculos antes, que seria o meio no qual se propagariam as ondas luminosas.

Tão evidente parecia a existência do éter, no século XVII que o próprio Newton, após estudar os fenômenos ópticos, sugeriu, para explicá-los, que a luz fosse constituída de corpúsculos muito pequenos emitidos pela fonte luminosa, conforme ele explicou em seu tratado Óptica (1704): a propagação retilínea, a reflexão nas superfícies, a refração em superfícies de separação de dois meios de densidades diferentes, a absorção e a pressão. Como a teoria corpuscular era insuficiente para explicar a interferência luminosa, Newton aceitou também a existência das ondas etéreas de Huygens.

Durante séculos, a existência do éter foi aceita, sem restrições. Em contrapartida, em fins do século XIX, o físico norte-americano Albert Abraham Michelson (1852-1931), primeiro a receber o Prêmio Nobel de seu país (em 1907), com o objetivo de demonstrar a realidade do éter, inventou no laboratório do físico alemão Hermann Helmholtz (1821-1894) um instrumento capaz de medir a velocidade da luz (Figura 3) e de comparar o intervalo de tempo gasto por dois feixes emitidos de uma mesma fonte em duas direções perpendiculares entre si. Se uma dessas direções fosse a do movimento da Terra, em sua órbita ao redor do Sol, e a outra perpendicular, uma diferença de intervalos de tempos deveria ser detectada. Inacreditavelmente, o éter mostrou, no experimento, não ter qualquer efeito sobre a velocidade da luz, quer o feixe se deslocasse na mesma direção, ou perpendicular ao movimento terrestre. Se o éter existisse, a Terra estaria em repouso!

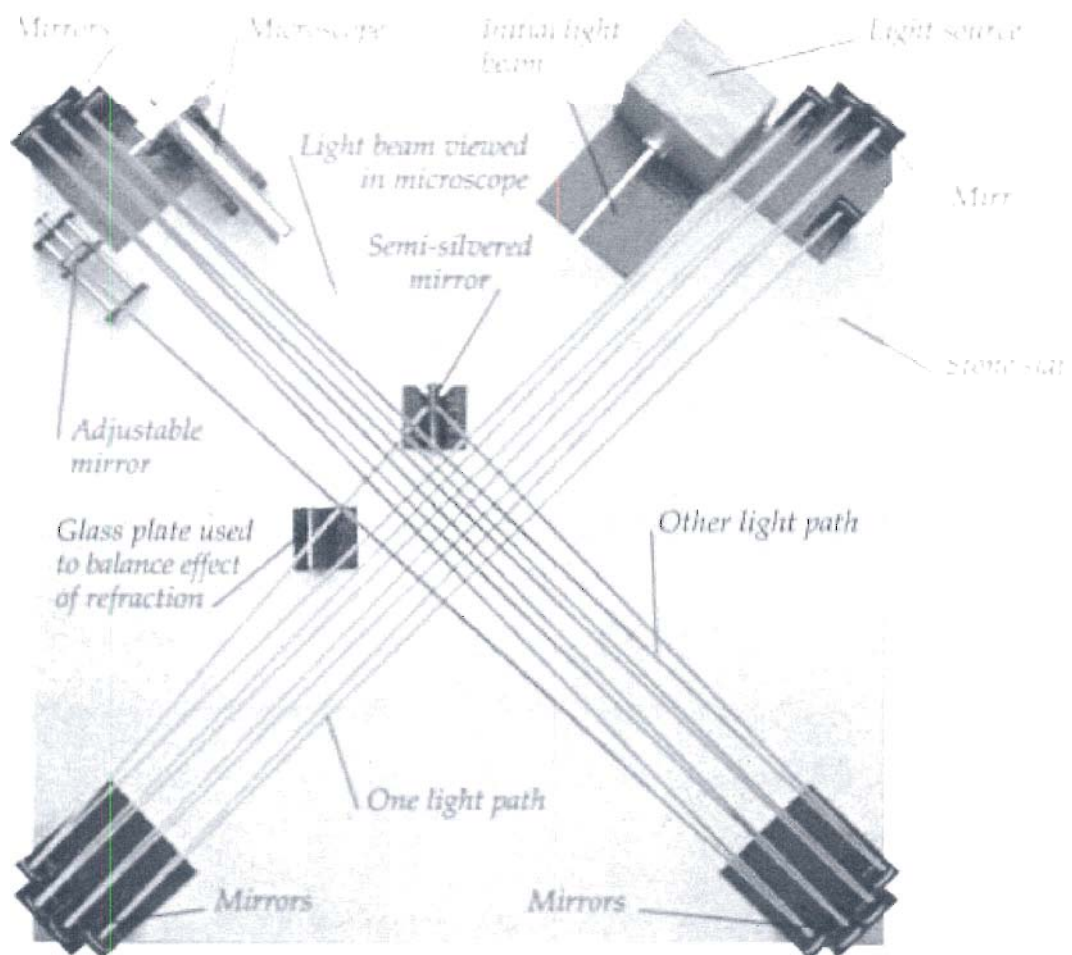


Figura 3: Aparato real do experimento de Michelson-Morley. [15]

3.2 Espectro de luz de um Corpo Aquecido

Um objeto em qualquer temperatura é capaz de emitir radiação eletromagnética, denominada frequentemente radiação térmica. A radiação emitida por um corpo aquecido depende não somente da temperatura, mas também do material de que ele é composto, de sua forma e da natureza de sua superfície. Esses detalhes, todavia, dificultam a compreensão da radiação térmica em termos de idéias físicas básicas, tal como a dificuldade que surgiu quando tentaram compreender as propriedades dos gases reais em termos de um modelo atômico simples. O "problema do gás" foi contornado, introduzindo-se a noção de um gás ideal. Da mesma maneira, o "problema da radiação" pode ser resolvido, introduzindo-se um "radiador ideal" para o qual o espectro da radiação térmica emitida dependa somente da temperatura do radiador e não do material de que ele é feito, nem da natureza de sua superfície, ou outros fatores quaisquer.

Um modelo simples para examinar a emissão de radiação por aquecimento, com boa aproximação, denominado Corpo Negro, é o interior de um objeto oco e aquecido, onde as paredes da cavidade devem ser mantidas a uma temperatura uniforme, em que a radiação escape por um pequeno orifício em sua superfície, conforme ilustra a Figura 4.

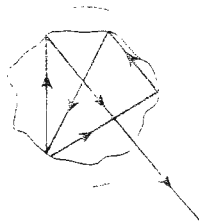


Figura 4: Corpo Negro. [3]

Cada temperatura está associada a uma frequência (aqui representada pela respectiva cor). A figura abaixo representa a distribuição espectral da radiação de um corpo negro a uma temperatura da ordem de 9.000 K, onde a parte colorida corresponde ao espectro visível.

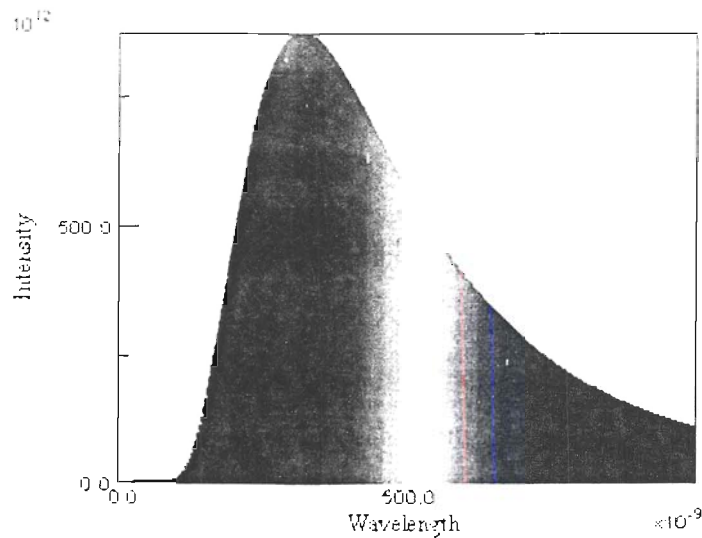


Figura 5: Distribuição espectral da radiação de um corpo negro a uma temperatura da ordem de 9.000 K. [15]

No final do século XIX, várias tentativas foram feitas para explicar essa curva. Todas essas tentativas baseavam-se nas teorias clássicas da termodinâmica. Stefan e Boltzmann mostraram, por exemplo, que a emissão de energia cresce com a temperatura, ou seja,

$$I \propto T^4 \quad (1)$$

Atualmente, este resultado é conhecido como lei de Stefan-Boltzmann.

O físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928) mostrou que o máximo da curva espectral se desloca com a temperatura. Quando a temperatura aumenta, o máximo da curva espectral se desloca no sentido dos menores comprimentos de onda, conforme ilustra a Figura 6.

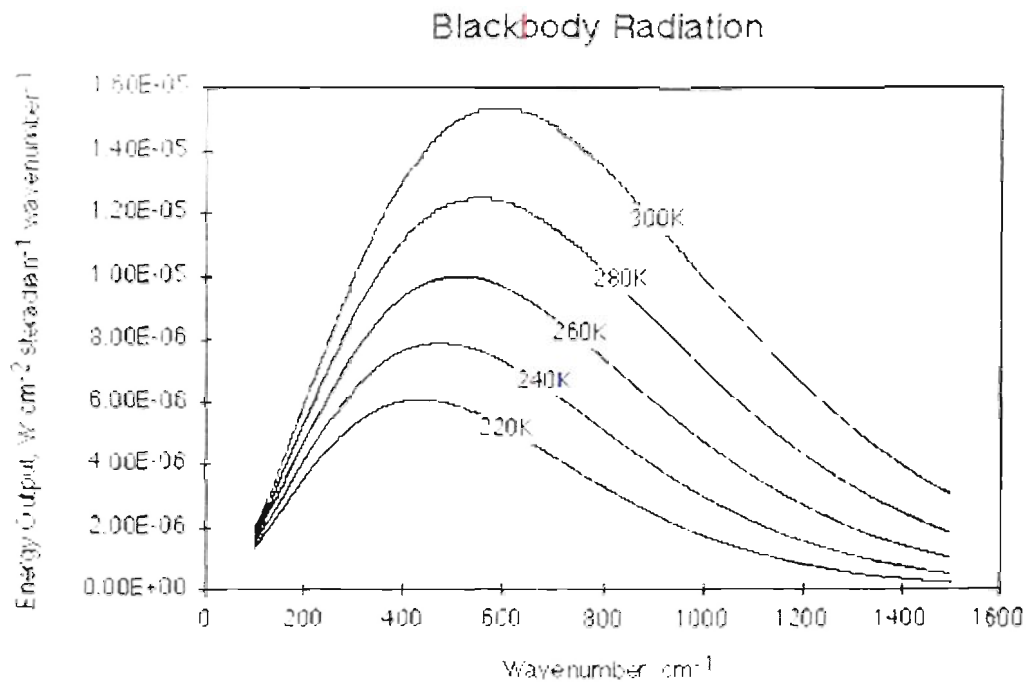


Figura 6: Radiação do Corpo Negro. [15]

Rayleigh e Jeans partiram da idéia de que a energia irradiada vem da oscilação do campo eletromagnético, e mostraram que:

$$I = T\lambda^{-4}, \quad (2)$$

A lei de Rayleigh-Jeans ajustava a curva na faixa dos altos comprimentos de onda, contudo divergia na faixa de baixos comprimentos, o que passou a ser conhecido como a 'catástrofe do ultravioleta'. A Figura 7 ilustra esta situação.

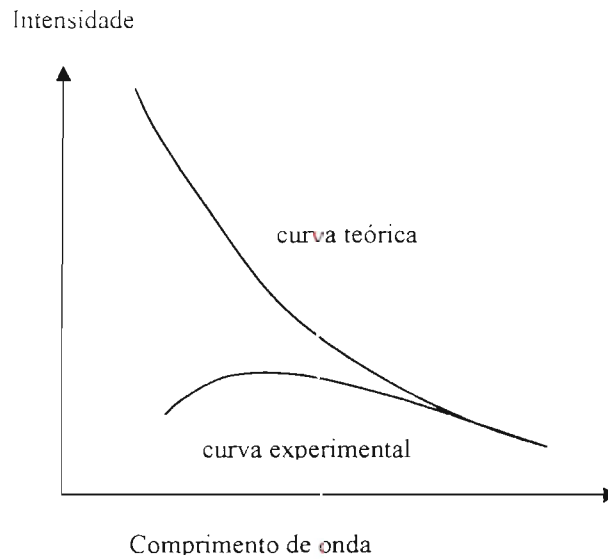


Figura 7: Catástrofe do Ultravioleta. [15]

3.3 Geração de Ondas Eletromagnéticas

Nos anos de 1886 e 1887, Heinrich Rudolf Hertz (Figura 8), um jovem estudante alemão, em sua investigação da natureza eletromagnética da luz, executou experimentos que primeiro confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas e a teoria eletromagnética de Maxwell para a propagação da luz. Assim como um desses fatos fascinantes e paradoxais na história da ciência, Hertz foi o primeiro a observar, por acaso, em um de seus experimentos, o Efeito que Einstein mais tarde empregou para contradizer outros aspectos da teoria eletromagnética clássica. Hertz descobriu que descargas elétricas entre dois eletrodos ocorrem mais facilmente, quando luz ultravioleta recai sobre um dos eletrodos.



Figura 8: Heinrich Hertz (1857 – 1894). [10]

Com a morte prematura de Hertz, Lenard, seu assistente, continuando alguns experimentos, mostrou que a luz ultravioleta facilitava a descarga, pois fazia com que elétrons fossem emitidos da superfície do catodo. A ejeção de elétrons de uma superfície por ação da luz foi chamada de *Efeito Fotoelétrico*.

Hertz, professor da Escola Politécnica de Karlsruhe, na Alemanha interessou-se pela teoria eletromagnética de Maxwell. Desde 1884, ele pensou em uma maneira de gerar e detectar em laboratório as ondas eletromagnéticas que Maxwell havia predito. Após muito trabalho e experiências sem sucesso, Hertz construiu um dispositivo com que obteve sucesso (Figura 9).

O aparelho construído por Hertz consistia de um circuito elétrico (transmissor), capaz de produzir diferenças de potencial elétrico (d.d.p.), e um detector. Era constituído de duas hastes metálicas, cada qual com uma esfera metálica em uma das extremidades, separadas por um condensador gerador de alta tensão. Quando a d.d.p. entre as esferas alcançava um valor máximo, o ar entre elas tornava-se condutor, fazendo saltar uma faísca. Esse processo se repetia periodicamente, gerando, segundo a predição de Maxwell, um conjunto de ondas eletromagnéticas. [9] [11]

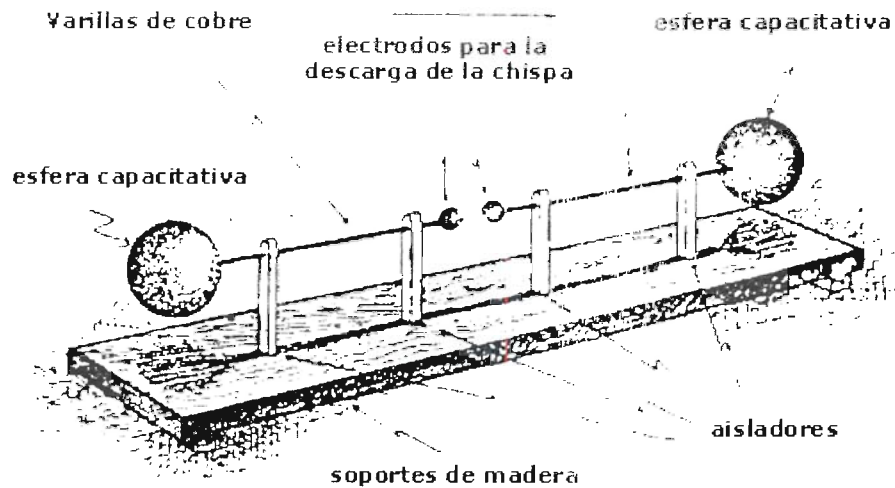


Figura 9: Esquema do aparelho gerador de ondas eletromagnéticas, construído por Hertz.

[15]

Para comprovar que, de fato, um campo eletromagnético se propaga pelo espaço, Hertz preparou um receptor (antena), denominado ressonador, que consistia de um arco de metal. As ondas eletromagnéticas se existissem, seriam detectadas, porque a variação de campo magnético da onda ao atravessar o ressonador daria lugar a uma força eletromotriz induzida que provocaria uma faísca entre seus extremos.

Com intuito de analisar o fenômeno mais comodamente, situou em seu laboratório uma superfície refletora que permitiria confinar as ondas produzidas no espaço vazio compreendido entre o circuito emissor e a placa. Com isso, e com a ajuda do ressonador, foi capaz de descobrir as características das ondas geradas mediante seu aparato emissor e de medir um comprimento de onda de 66cm . As previsões teóricas de Maxwell foram confirmadas e Hertz demonstrou experimentalmente que as ondas eletromagnéticas são refletidas, refratadas e sofrem interferência, como se fossem ondas luminosas. Em sua homenagem, elas foram chamadas de *ondas hertzianas* (Figura 10).

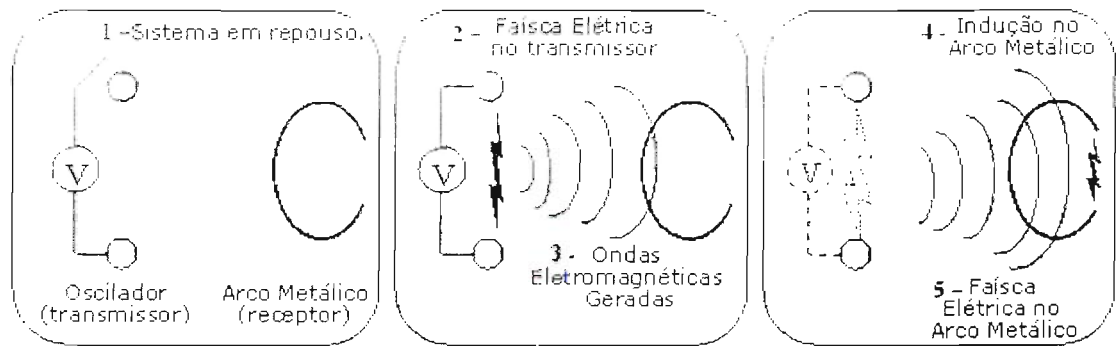


Figura 10: A experiência de Hertz: as centelhas provocadas no aparelho transmissor provocam, “ao mesmo tempo”, centelhas no arco metálico, comprovando a existência de ondas eletromagnéticas. [15]

3.4 Objeções à Natureza da Luz

Há três características principais do Efeito Fotoelétrico que não podem ser explicadas em termos da teoria ondulatória clássica da luz:

- A teoria ondulatória requer que o vetor campo elétrico oscilando, \vec{E} , da onda de luz aumente em amplitude conforme a intensidade do feixe de luz é aumentado. Uma vez que a força aplicada ao elétron é $e\vec{E}$, é sugestivo que a energia cinética dos fotoelétrons deveria, também, crescer conforme a intensidade do feixe de luz fosse sendo aumentada. Entretanto, a energia cinética máxima, que é igual a eV_0 , independe da intensidade da luz. Esse resultado tem sido testado ao longo de uma faixa de intensidades de 10^7 .
- De acordo com a teoria ondulatória, o Efeito Fotoelétrico poderia ocorrer para qualquer frequência da luz, desde que aquela luz fosse intensa o bastante para dar a energia necessária para ejetar os fotoelétrons. Por outro lado, existe para cada superfície uma frequência de corte característica ν_0 . Para frequências inferiores a ν_0 , o Efeito Fotoelétrico não ocorre.
- Se a energia adquirida por um fotoelétron é absorvida de uma onda incidente na placa metálica, a “área-alvo efetiva” para um elétron no metal é limitada e, provavelmente, não muito maior que a correspondente ao diâmetro atômico. Na Teoria Clássica, a energia

da luz é uniformemente distribuída sobre a frente de onda. Por isso, se a luz é fraca o bastante, deveria haver um atraso no tempo mensurável, que será estimado mais adiante, entre o instante em que a luz começa a colisão com a superfície e o instante da ejeção do fotoelétron. Durante esse intervalo, o elétron deveria estar absorvendo energia de um feixe, até que ele tivesse acumulado o bastante para escapar. No entanto, nenhuma defasagem de tempo detectável foi, jamais, medida. Essa discussão é, particularmente, notável, quando a substância fotoelétrica é um gás: nessas circunstâncias, mecanismos de absorção coletiva podem ser descartados e a energia do fotoelétron emitido deve ser, certamente, desprendida do feixe luminoso por um único átomo ou molécula.

Exemplo: Uma placa de potássio é colocada a $1m$ de uma fonte luminosa fraca cuja potência é $1W$. Admitindo que um fotoelétron ejetado possa coletar sua energia de uma área circular de uma placa cujo raio seja um raio atômico:

$$r \approx 1 * 10^{-10} m,$$

e que a energia requerida para remover um elétron através da superfície do potássio seja cerca de:

$$E = 2.1eV = 3.4 * 10^{-19} J \text{ (sendo um elétron volt } = 1eV = 1.6 * 10^{-19} J$$

a energia ganha por um elétron de carga $1.6 * 10^{-19} C$ submetido a uma diferença de potencial de $1V$).

Quanto tempo será preciso para que o alvo absorva toda a energia necessária para a ejeção, presumindo-se que a energia da luz seja uniformemente espalhada sobre a frente de onda?

$$\text{A área-alvo é } a = \pi r^2 = \pi * 10^{-20} m^2.$$

A área de uma esfera de $1m$ centrada na fonte é:

$$A = 4\pi(1m)^2 = 4\pi m^2.$$

Com isso, se a fonte irradia uniformemente em todas as direções (i.e., se a energia é uniformemente distribuída sobre as frentes de onda esférica, espalhando-se para fora da fonte, de acordo com a Teoria Clássica), a intensidade com que a energia atinge a superfície é:

$$I = \frac{W}{A} = \frac{1W}{4\pi.m^2} = \frac{1J}{4\pi.s.m^2}. \quad (12)$$

A quantidade de energia que atinge o alvo por segundo é.

$$i = I * a = \frac{1J}{4\pi.s.m^2} * \pi * 10^{-20} m^2 = \frac{10^{-20} J}{4s}. \quad (13)$$

E, conseqüentemente, o tempo total para a absorção é:

$$\Delta t = \frac{E}{i} = \frac{3.4 * 10^{-19} J}{10^{-20} J} * 4s = 136s \approx 2 \text{ min.} \quad (14)$$

É óbvio que a ilustração precedente poderia ser modificada, para reduzir o tempo calculado, assumindo uma área-alvo efetiva maior. A suposição mais favorável, em que a energia é transferida por um processo de ressonância da onda luminosa para o elétron, conduz a uma área alvo de λ^2 , onde λ é o comprimento da onda de luz incidente, todavia haveria um retardamento do tempo finito, que pode ser medido experimentalmente (para a luz ultravioleta de $\lambda = 100 \text{ \AA}$, da ordem de $\Delta t \approx 10^{-2} s$), ou seja, o intervalo de tempo necessário para que o elétron receba energia suficiente para a ejeção. No entanto, nenhum atraso foi detectado sob qualquer circunstância. Os primeiros experimentos realizados estabelecem um limite superior de 10^{-9} do atraso possível. [7, 8, 11]

Havia, a essa altura da história da Física, a necessidade do surgimento de novas idéias, que chegaram para revolucionar a ciência, produzindo uma ruptura dos modelos vigentes. As idéias de Einstein, publicadas há 100 anos (1905), tiveram esse caráter. Naquela época toda a Física era baseada na Mecânica Newtoniana, na teoria eletromagnética de Maxwell e na termodinâmica. Em contrapartida, existiam questões que não eram explicadas por essas teorias. Nesse aspecto, as idéias de Einstein vieram balançar os alicerces da Física Clássica, pois introduziram conceitos novos e revolucionários.

4- O Efeito Fotoelétrico

4.1 Breve Histórico

Nos últimos anos do século XIX, experimentos demonstraram que certos tipos de luz incidindo em determinadas superfícies metálicas causavam a emissão de elétrons por essas superfícies. Esse fenômeno é conhecido como Efeito Fotoelétrico.

O estudo do Efeito Fotoelétrico fornece evidências de que a radiação possui natureza corpuscular quando interage com a matéria e natureza ondulatória em sua propagação. [7] [11]

Desde a Antiguidade, o homem se preocupa em compreender e explicar o mundo em que vive. A visão de mundo dos gregos antigos foi dominante durante séculos. Os experimentos relativos aos fenômenos elétricos e magnéticos, porém, principiaram somente no final do século XVIII. A partir daí, a ciência passou a ser mais utilizada no sentido de melhorar a condição de vida das pessoas, e a física obteve muitas conquistas e possíveis simplificações.

Dentre as diversas aplicações da Física, é importante citar o Efeito Fotoelétrico, que se encontra sempre presente no cotidiano do homem atual.

O modelo ondulatório da luz explica os fenômenos, até então conhecidos, concernentes à propagação da luz, tal como óptica geométrica, interferência, difração e polarização. Na medida em que esses fenômenos foram sendo observados, a teoria ondulatória da luz foi sendo completada.

Além disso, o desenvolvimento da teoria eletromagnética, coroado pelas realizações brilhantes de James Clerk Maxwell, predisse a existência de ondas eletromagnéticas cuja velocidade escalar no vácuo deveria ter o mesmo valor da velocidade escalar da luz. Esses desenvolvimentos, junto com o trabalho experimental de Heinrich Hertz, que em 1887 demonstrou, convincentemente, a existência de radiações eletromagnéticas, compuseram evidências conclusivas de que a luz é certamente uma onda eletromagnética; a luz é reconhecida, agora, como uma pequena parte do espectro muito largo de radiação eletromagnética.

Com respeito à estrutura da matéria, a existência de átomos foi firmemente estabelecida por abundância de fenômenos químicos, a teoria cinética dos gases e outras evidências. O trabalho de Faraday (e outros na eletrólise) mostrou a existência de três unidades elementares de carga; por volta de 1890, estava razoavelmente claro que os átomos consistiam de cargas positivas e negativas e que parte da carga negativa poderia ser removida sob algumas condições.

Finalmente, em 1897, o trabalho experimental de J. J. Thomson com os “raios catódicos” mostrou, definitivamente, a existência de elétrons e, também, proveu uma medida da razão carga-massa do elétron. Ele sugeriu um modelo no qual os elétrons com cargas negativas estariam distribuídos uniformemente, mais ou menos como passas num panetone, em um grande volume de carga positiva, tornando o átomo eletricamente neutro. Por conseguinte, ficou claro que os átomos não são indivisíveis, como já se pensou, entretanto possuem alguma estrutura interna.

Os detalhes dessa estrutura interna, por outro lado, eram completamente desconhecidos e tiveram de esperar para serem investigados e entendidos, até os experimentos pioneiros de Rutherford e seus alunos Hans Geiger e Ernest Marsden, em 1911. Esses experimentos levaram à conclusão de que o novo modelo de átomo seria constituído por uma parte positiva, localizada em uma região muito pequena no centro do átomo, o núcleo, e por uma parte negativa, constituída pelos elétrons muito pequenos, situada em uma vasta região externa envolvendo o núcleo.

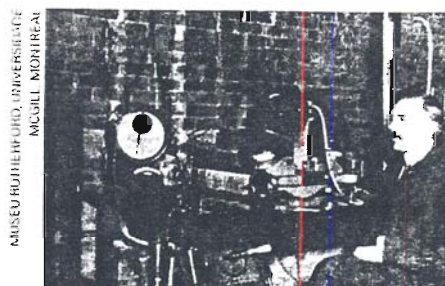


Figura 11: Ernest Rutherford. [10]

Fenômenos associados com a emissão e absorção da luz pela matéria não eram tão bem compreendidos como a propagação da luz era. Havia, para estar

seguro, um certo grau de compreensão qualitativa: estava claro que a radiação eletromagnética era produzida por cargas oscilando ou correntes, exatamente quando Hertz produziu radiação eletromagnética por meio de oscilações em um circuito de ressonância. Para explicar o comprimento de onda observado da luz, como determinado pelos fenômenos de interferência e difração, a frequência deve ser da ordem de 10^{15} ciclos por segundo, comparando-se com frequências da ordem de 10^8 nos experimentos de Hertz. Suspeitou-se que as vibrações da frequência óptica deveriam estar associadas com movimento de cargas individuais dentro dos átomos.

Em 1862, Faraday colocou uma fonte luz entre os pólos de um imã forte, em uma tentativa de detectar mudanças no comprimento de onda no espectro emitido.



Figura 12: Michael Faraday [10]

Seu equipamento não foi suficientemente sensível para detectar mudanças, porém, em 1896, um experimento similar foi executado por Zeeman, com a observação de que os deslocamentos mensuráveis do comprimento de onda ocorrem. Isso deu sustentação ao modelo de vibrações de cargas elétricas dentro dos átomos como as fontes fundamentais de luz.

Com exceção dessa explicação qualitativa, havia pouca compreensão do fenômeno de emissão da luz. O que se sabia até 1752 era que, quando substâncias no estado gasoso são excitadas por calor ou por uma descarga elétrica, elas ordinariamente emitem luz somente em determinados comprimentos de onda, em vez de um espectro contínuo. Pelo fato de os espectrômetros empregados para observar espectro usarem, freqüentemente, uma fenda para definir um feixe estreito, que é, então, dispersado por um prisma, os vários comprimentos de onda apareciam no espectrômetro como

linhas de várias cores: daí, tal espectro veio a ser chamado de “espectro de linhas”. Por volta de 1823, foi mostrado que cada elemento tem um espectro característico e que os elementos podem ser identificados por seu espectro.

O fenômeno de espectros de absorção foi também observado até o século XIX. Quando a luz passa através de um elemento no estado gasoso, alguns comprimentos de onda são absorvidos muito mais fortemente que outros e descobriu-se que os comprimentos de onda absorvidos em tais circunstâncias eram os mesmos que alguns daqueles emitidos pelo mesmo elemento, quando excitados térmica ou eletricamente.

Um enorme esforço foi feito nas pesquisas para estabelecer as regularidades nos espectros observados dos elementos. Nenhum progresso real nesse sentido ocorreu, até que Balmer, em 1885, conseguiu formular uma regra empírica que governa os comprimentos de onda do espectro visível emitidos pelo hidrogênio, que é o átomo mais simples (série de Balmer). Esta regra não tinha base fundamental teórica. Esta procura por esquemas que correlacionassem e sistematizassem espectros lembra longos esforços de Kepler, culminando com as suas três regras empíricas governando o movimento dos planetas, e os esforços dos químicos tentando encontrar a ordem entre os elementos químicos, culminando com a tabela periódica de Mendeleeff. Tal procura é, freqüentemente, uma parte vital do avanço do conhecimento científico.

Havia mistérios correspondentes a respeito da luz emitida por matéria sólida. Soube-se, no século XIX, que quando corpos sólidos são muito aquecidos (“quente vermelho” ou “quente branco”), eles emitem, geralmente, luz em espectro contínuo, isto é, um espectro contínuo de comprimentos de onda, em vez de um espectro de linhas. Observou-se que a freqüência da radiação mais intensa é diretamente proporcional à temperatura absoluta do corpo radiante e que a energia total irradiada é proporcional à quarta potência da temperatura. Algumas tentativas parcialmente bem sucedidas foram feitas para prover uma base teórica para essas observações, contudo o entendimento completo teve de esperar até os primeiros anos do século vinte, quando uma das partes-chave do enigma foi encontrada por Max Planck.

Havia outros fenômenos de interação da radiação com a matéria que também eram difíceis de entender na base da teoria clássica da luz. Um deles

era o efeito fotoelétrico, descoberto por Hertz, em 1887 e investigado, detalhadamente, por Hallwachs e Lenard, em que elétrons (chamados fotoelétrons) são liberados de uma superfície metálica de um material, quando ela absorve radiação eletromagnética. Uma outra dificuldade foi a produção de raios x em tubos de raios catódicos, que foi descoberta por Roentgen, em 1895. [10] [11]

O Fóton: propriedade corpuscular da radiação

Por conseguinte, na virada do século, estava claro que, enquanto a teoria eletromagnética da luz era adequada para o tratamento de fenômenos concernentes à propagação da luz, era inadequada para aqueles envolvendo emissão e absorção da luz.

Somente idéias de proporções maiores poderiam trazer compreensão nessas áreas e, em 1900, o tempo era maduro para tais idéias. A revolução na teoria física, que ocorreu nos 25 anos seguintes, foi uma das mais significativas de toda a história do pensamento científico. Este período testemunhou o nascimento e o florescimento da teoria quântica e da teoria da relatividade, ambas formam o pilar ou a base da ciência física contemporânea. [9] [11]

4.2 Introdução ao Efeito Fotoelétrico

Já se sabia que cargas móveis em condutores elétricos eram impedidas de escapar do material do condutor pela barreira de energia-potencial na superfície e que por vários meios as partículas carregadas podiam ganhar bastante energia para superar essa barreira e escapar. Na emissão termo-iônica, primeiramente observada por Edison, a energia era fornecida através do aquecimento do material a uma temperatura muito elevada.

A Figura 13 mostra um esquema para a observação de fluxo de elétrons do filamento aquecido para um outro eletrodo num tubo evacuado, como resultado da emissão termo-iônica do filamento. Descobriu-se, também, que elétrons poderiam ser liberados de uma superfície, diante de campos elétricos muito fortes nessa superfície para afastar as partículas.

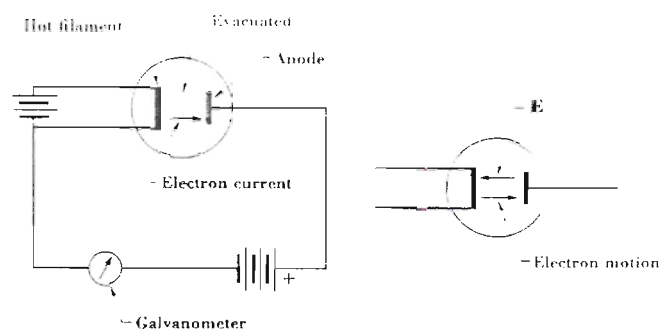


Figura 13: Instrumento para observação da emissão termo-iônica de elétrons. O filamento é aquecido por uma corrente elétrica, liberando elétrons. O anodo é mantido em um potencial positivo com relação ao filamento, estabelecendo um campo elétrico, como é mostrado. Os elétrons são empurrados em direção ao anodo e a corrente resultante é detectada pelo galvanômetro. [11]

Um sistema experimental empregado para investigar o efeito fotoelétrico é exibido na Figura 14. [7] [11]

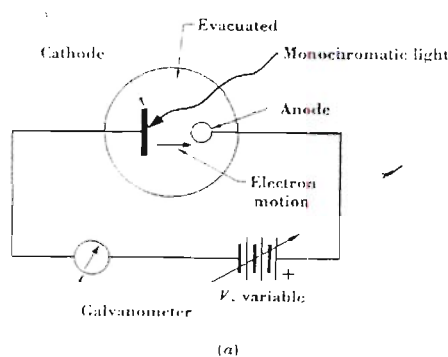
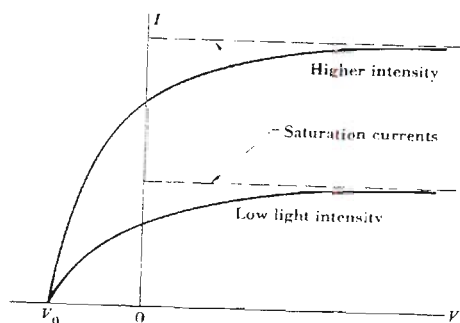


Figura 14: Equipamento empregado para observar a emissão fotoelétrica. O catodo é iluminado por luz monocromática e a corrente resultante é medida com um galvanômetro, como uma função da diferença de potencial V . A intensidade da iluminação pode, também, ser variada. [11]

Dois eletrodos são selados em um tubo de vidro evacuado e conectado a uma bateria que fornece uma diferença de potencial ajustável V entre os dois eletrodos. A luz monocromática fornecida por uma fonte de espectro contínuo com um espectrômetro de prisma ilumina o catodo, liberando elétrons, alguns dos quais são capturados pelo anodo. A corrente resultante pode ser medida com um galvanômetro sensível, como mostrado na Figura 14.

A corrente fotoelétrica pode ser medida em função da diferença de potencial, conforme mostrado no gráfico da Figura 15.



(b)

Figura 16: Gráfico da corrente I em função da voltagem para várias intensidades da mesma luz incidente. Valores da corrente de saturação são diretamente proporcionais à intensidade da luz, porém o potencial de corte V_0 é independente da intensidade. [11]

Essa curva mostra que, se for aplicada uma diferença de potencial suficientemente elevada, todos os elétrons ejetados do catodo iluminado serão coletados pelo anodo. A corrente fotoelétrica máxima alcançada é chamada de corrente de saturação. Para valores de V menores, nem todos os elétrons são coletados. Todavia, mesmo para valores negativos pequenos de V (correspondentes à reversão da polaridade da bateria), a corrente fotoelétrica não cai imediatamente a zero, isto é, alguma corrente ainda flui, apesar do fato de, neste caso, a força eletrostática sobre as partículas ser em direção ao catodo, em vez do anodo. Isso significa que os elétrons deixam o catodo com uma certa energia cinética e alguns têm energia bastante para alcançar o anodo, apesar da força repulsiva. [7, 10, 11]

Recordando que o potencial elétrico é a energia potencial por unidade de carga verifica-se que quando o anodo está negativo (V) em relação ao catodo, um elétron com carga e que vai do catodo ao anodo ganha energia potencial eV , com o correspondente decréscimo de sua energia cinética. Se essa diferença de potencial for maior que a energia cinética com que os elétrons deixam o catodo, eles podem nunca alcançar o anodo. Quando a diferença de potencial invertida aumenta, alcançando um certo valor crítico V_0 , chamado de potencial de corte, a corrente cai a zero, mostrando que os elétrons não saem do foto-catodo com energias cinéticas maiores que eV_0 , ou seja,

$$K_{\max} = eV_0, \quad (15)$$

onde e é a carga elementar e K_{\max} é a energia cinética máxima com que os fotoelétrons são ejetados da superfície.

Quando a intensidade é acrescida, haverá mais energia disponível para liberar elétrons e, então, a corrente de saturação deveria aumentar. Paralelamente, contudo, pôde-se pensar que os elétrons devessem deixar a superfície com mais energia e, por conseguinte, um valor negativo grande de V_0 deveria ser necessário, a fim de reduzir a corrente a zero. Em vez disso, descobriu-se que o valor de V_0 é, dentro do erro experimental, exatamente o mesmo e é, de fato, independente da intensidade da radiação. Isso sugere que a energia cinética máxima com que os elétrons deixam o catodo depende somente do comprimento de onda da radiação e não de sua intensidade. Quando o experimento é repetido para diferentes comprimentos de onda, conclui-se que V_0 depende inversamente do comprimento de onda. Especialmente, conclui-se que é diretamente proporcional à frequência da radiação, em outras palavras, a energia cinética máxima dos elétrons emitidos é uma função linear da frequência.

A Figura 17 mostra o potencial de corte V_0 , como função da frequência da luz incidente em uma superfície de sódio. Nota-se que há uma frequência de corte ν_0 , abaixo da qual o Efeito Fotoelétrico não ocorre. Esses dados foram obtidos por Millikan, em 1916, o que lhe rendeu o Prêmio Nobel, em 1923. [7] [11]

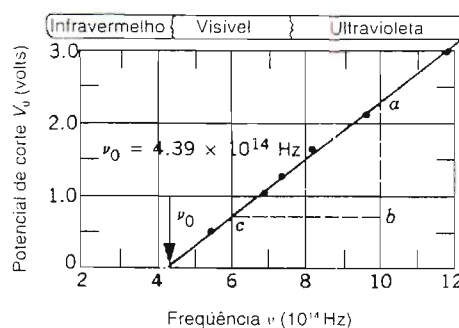


Figura 17: Um gráfico de dados obtidos por Millikan, em 1916, para o potencial de corte em várias frequências para a superfície do sódio. A frequência de corte, ν_0 , é 4.39×10^{14} Hz. [9]

Pelo fato de o Efeito Fotoelétrico para a luz visível ou próxima do visível ser em grande parte um fenômeno de superfície é necessário que nos experimentos se evitem películas de óxido, graxas ou outras contaminações.

4.3 Teoria de Einstein para o Efeito Fotoelétrico

Em 1905, Albert Einstein analisou a Teoria Clássica da luz, propôs, então, uma nova teoria e mencionou o Efeito Fotoelétrico como uma aplicação que poderia descrever qual teoria estaria correta. Embora isso tenha ocorrido muitos anos antes do trabalho de Millikan, Einstein foi influenciado pelos experimentos de Lenard.

Corpúsculos de Energia

Einstein mostrou que a relação linear entre a energia cinética máxima dos fotoelétrons e a frequência poderia ser compreendida na base de uma hipótese revolucionária a respeito da natureza da luz. Sua hipótese era que a energia transportada por radiação eletromagnética era composta de quantidades individuais e indivisíveis de energia (“pacotes” de energia), cada uma proporcional à frequência de radiação correspondente. A idéia de que a energia associada à radiação eletromagnética estava empacotada nas unidades de uma magnitude proporcional à frequência (geralmente chamada de hipótese quântica) não foi inteiramente concebida por Einstein, tinha sido proposta 5 anos antes por Max Planck, na tentativa de compreender a natureza do espectro contínuo emitido por corpos sólidos a altas temperaturas. Planck, originalmente, restringiu, conforme foi mencionado, seu conceito de quantização de energia ao elétron irradiante nas paredes da cavidade de um corpo-negro, tendendo a considerá-la como uma técnica de cálculo, sem significado físico.

Einstein raciocinou da seguinte forma: a exigência de Planck que a energia contida nas ondas eletromagnéticas de frequência ν na fonte irradiante (exemplo: uma fonte de luz ultravioleta em um experimento fotoelétrico) podia ser somente 0, ou $h\nu$, ou $2h\nu$, ..., ou $nh\nu$, ... implicava que, no processo de

passagem do estado de energia $nh\nu$ para o estado de energia $(n-1)h\nu$. haveria uma emissão discreta de energia eletromagnética da energia $h\nu$.

Se a radiação com uma dada frequência for mais intensa, maior número desses corpúsculos de energia será transmitido, mas a quantidade de energia em cada pacote permanecerá inalterada. Na emissão fotoelétrica, cada elétron absorve somente, e completamente, um pacote de cada vez no fotocátodo (caráter discreto do fenômeno). Essas quantidades individuais e indivisíveis de energia, originalmente chamadas de *quanta*, são, agora, mais comumente chamadas de fótons. Einstein concluiu que tal pacote de energia estava inicialmente localizado em um volume pequeno no espaço e que permanecia localizado, enquanto se distanciava da fonte com a velocidade da luz.

Expressando essa hipótese, matematicamente, é possível dizer que a energia de um fóton é:

$$E = h\nu, \quad (16)$$

onde h é uma constante de proporcionalidade (constante de Planck).

Einstein (Figura 18), caracteristicamente, considerou o fenômeno EFE como uma propriedade fundamental da luz. Embora esse novo conceito fosse revolucionário, estava, em certo sentido, em desenvolvimento natural, visto que introduziu um aspecto atomístico à teoria da radiação eletromagnética, que pode ser comparado com o aspecto atomístico da estrutura da matéria, que foi introduzida por Dalton, cem anos antes.



Figura 18: Albert Einstein. [10]

Einstein argumentou que os experimentos ópticos bem conhecidos em interferência e difração de radiação eletromagnética foram executados somente em situações envolvendo números muito grandes de fótons. Esses experimentos fornecem resultados que representam médias dos comportamentos individuais dos fótons. A presença dos fótons não é mais aparente neles do que a presença de uma gota d'água o é em um pulverizador fino de uma mangueira de jardim, se o número das gotas for muito elevado. É claro que os experimentos de interferência e difração mostraram, definitivamente, que os fótons não viajam de onde eles são emitidos para onde são absorvidos, nas maneiras simples das partículas clássicas, como as gotas de água o fazem. Eles viajam como ondas clássicas, no sentido de que os cálculos baseados na forma como tais ondas se propagam (e, em particular, as ondas componentes das duas maneiras reforçam-se ou anulam-se uma em relação à outra, dependendo de suas fases relativas) explicam corretamente as medidas das viagens dos fótons como uma média. Einstein focou sua atenção, entretanto, não no comportamento ondulatório, mas sim no comportamento corpuscular. [7, 10, 11]

Retornando à situação experimental, podem-se considerar, agora, os relacionamentos da energia, com um detalhe um tanto maior. Conforme já mencionado, para que um elétron deixe a superfície de um condutor, ele deve

superar uma barreira de energia potencial. A quantidade de energia necessária para um elétron ser removido de uma superfície metálica é denotada por W . Por assim dizer, quando um elétron absorve um fóton de energia $E = h\nu$, sua energia cinética fora da superfície será:

$$K = h\nu - W. \quad (17)$$

O trabalho “ W ” é necessário para vencer os campos atrativos dos átomos na superfície e perdas de energia cinética durante as colisões internas do elétron. Alguns elétrons são ligados mais firmemente do que outros; alguns perdem energia em colisões durante a saída. No caso de ligações mais folgadas e sem perdas internas, o fotoelétron emergirá com energia cinética máxima, $K_{máx}$. Logo,

$$K_{máx} = h\nu - w_0, \quad (18)$$

onde w_0 , uma energia característica do metal, chamada função trabalho, é a energia mínima necessária para que um elétron passe através da superfície do metal e escape das forças atrativas que, normalmente, unem o elétron ao metal.

Resposta de Einstein às Objeções à Natureza da Luz

A hipótese do fóton de Einstein foi de encontro às três objeções levantadas contra a interpretação da teoria ondulatória do Efeito Fotoelétrico. Quanto à objeção 1 [página 30] (a falta de dependência de $K_{máx}$ com a intensidade da iluminação), há um consenso completo com relação à teoria do fóton, mediante experiência. Dobrar a intensidade da luz, dobra, simplesmente, o número de fótons e, dessa maneira, dobra a corrente fotoelétrica; não é alterada a energia $h\nu$ dos fótons individuais ou a natureza do processo fotoelétrico individual descrito por (18).

A objeção 2 [página 30] (a existência da frequência de corte) é removida em uma vez por (19). Se $K_{máx}$ é igual a zero, tem-se:

$$h\nu_0 = w_0 \quad (19)$$

que afirma que um fóton de frequência ν_0 tem somente energia o bastante para ejetar os fotoelétrons, e nenhum acréscimo aparece como energia cinética. Se a frequência for reduzida abaixo da frequência ν_0 , os fótons individuais, não importando quantos deles haja (ou seja, não importando a intensidade da iluminação), não terão, individualmente, energia suficiente para ejetar os fotoelétrons.

A objeção 3 [página 30] (a ausência de uma retardação do tempo) é eliminada na teoria do fóton porque a energia requerida é fornecida em pacotes concentrados, não sendo espalhada uniformemente sobre uma área grande. Se houver um mínimo de iluminação em qualquer eventualidade no catodo, então haverá pelo menos um fóton chegando nele; esse fóton será imediatamente absorvido por algum átomo, conduzindo à emissão imediata de um fotoelétron.

Reescrevendo a equação fotoelétrica de Einstein (18), por substituição de K_{max} por eV_0 , obtém-se:

$$V_0 = \frac{h\nu}{e} - \frac{w_0}{e} \quad (20)$$

Por consequência, a teoria de Einstein prediz um relacionamento linear entre o potencial de corte V_0 e a frequência ν , em completo acordo com os resultados experimentais, como mostrado na Figura 17. A inclinação da curva experimental na figura seria h/e , ou:

$$\frac{h}{e} = \frac{2.20V - 0.65V}{10.0 \times 10^{14} / s - 6.0 \times 10^{14} / s} = 3.9 \times 10^{-15} Vs. \quad (21)$$

O valor de h pode ser encontrado pela multiplicação dessa razão pela carga eletrônica e .

Por consequência, $h = 3.9 \times 10^{-15} Vs \times 1.6 \times 10^{-19} C = 6.2 \times 10^{-34} Js$. De uma análise cuidadosa desses e outros dados, incluindo os dados de análise com

superfície do lítio. Millikan encontrou o valor da constante de Planck: $h = 6.57 \times 10^{-34} \text{ Js}$, com uma acurácia de aproximadamente 0.5 %. Esta medida concordou bem com o valor h derivado da expressão para a radiação de Planck. O fato de as duas determinações de h terem concordado, partindo de fenômenos e teorias diferentes é importante. O valor atual de h é $h = 6.6262 \times 10^{-34} \text{ Js}$.

Para citar Millikan:

“O Efeito Fotoelétrico ... fornece uma prova de que seja completamente independente dos fatos da radiação de corpo negro da exatidão da suposição fundamental da teoria quântica, a saber, a suposição de uma emissão descontínua ou explosiva da energia absorvida pelos constituintes eletrônicos dos átomos de ... ondas. Ela materializa-se, só para dizer, a quantidade h descoberta por Planck através do estudo da radiação do corpo negro e dá-nos uma confiança inspirada em nenhum outro tipo de fenômeno que o trabalho de Planck subjacente da conceituação física elementar correspondente à realidade.”

Millikan R. (7)

Apud H. Eisberg & Resnick

Para deduzir a função de trabalho para o sódio, basta substituir o valor ν_0 , que é o valor da interseção da curva com o eixo horizontal (da Figura 17), isto é,

$$\begin{aligned} w_0 &= h\nu_0 = (6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}) \times (4.39 \times 10^{14} / \text{s}) = \\ &= 2.92 \times 10^{-19} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} = 1.82 \text{ eV} \end{aligned} \quad (22)$$

O mesmo valor é obtido da Figura 17 como a magnitude da interseção da curva com o eixo vertical. No entanto, experimentos modernos dão valores maiores que 2.27 eV .

Para a maioria dos metais condutores o valor da função trabalho é da ordem de alguns elétrons-volts. É a mesma função trabalho para a emissão termo-iônica desses metais.

A fim de calcular a taxa por unidade de área com que os fótons colidem com a placa de potássio citada no final do item 6.1, em que a placa distava $1m$ da fonte com $1W$ de potência e assumindo-se que a luz é monocromática e com comprimento de onda 5890 \AA (luz amarela), tem-se que a taxa por unidade de área em que a energia recai sobre uma placa de metal a 11 de uma fonte luminosa de potência $1W$ é:

$$I = \frac{W}{A} = 8.0 \times 10^{-2} J/m^2 s = 5.0 \times 10^{17} eV/m^2 s. \quad (23)$$

Cada fóton tem uma energia de:

$$\begin{aligned} E = h\nu &= \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} Js \times 3.00 \times 10^8 m/s}{5.89 \times 10^{-7} m} = \\ &= 3.4 \times 10^{-19} J = 2.1 eV \end{aligned} \quad (24)$$

Logo, a razão I_n em que os fótons atingem uma unidade de área da placa é:

$$I_n = 5.0 \times 10^{17} eV/m^2 s \times \frac{1 \text{ fóton}}{2.1 eV} = 2.4 \times 10^{17} \frac{\text{fótons}}{m^2 s}. \quad (25)$$

O Efeito Fotoelétrico só pode ocorrer porque a energia do fóton se iguala à função trabalho $2.1 eV$ para a superfície do potássio. É válido notar que se o comprimento de onda é ligeiramente aumentado (dito de outra maneira, se ν é ligeiramente aumentado) o Efeito Fotoelétrico não ocorrerá, não importando o quão grande a razão R possa ser.

Esses resultados sugerem que a intensidade de luz I pode ser considerada como o produto de N , o número de fótons por unidade de área por unidade de tempo, e $h\nu$, a energia de um único fóton. Foi visto que até mesmo em intensidade relativamente baixa, neste caso $\approx 10^{-1} W/m^2$, o número N é

extremamente grande ($\approx 10^{17}$ fótons/ m^2s), pois a energia de um único fóton é muito pequena.

Considerações Finais

Em 1921, Einstein recebeu o Prêmio Nobel por ter feito a previsão teórica do Efeito Fotoelétrico. Antes da validação experimental de Millikan para este efeito, em 1914, Einstein foi recomendado por Planck e outros para compor a Prussian Academy of Science. Os membros da Academia escreveram: “Resumindo, nós podemos dizer que dificilmente há um entre os grandes problemas, em que a Física Moderna é tão rica, em que Einstein não tenha dado uma contribuição importante. Que ele pode ter errado o alvo algumas vezes em suas especulações, como, por exemplo, em sua hipótese quântica da luz (fótons), realmente não pode ser sustentado demasiadamente contra ele, por não ser possível introduzir fundamentalmente novas idéias, até mesmo na maioria das ciências exatas, sem, ocasionalmente, correr um risco”.

Hoje, a hipótese do fóton é aplicada em todo o espectro eletromagnético, não somente na região do visível. Pode-se dizer, por exemplo, que uma cavidade de microonda ‘contém’ fótons. Para $\lambda = 10cm$, um comprimento de onda típico de microonda, a energia do fóton pode ser computada como maior que $1.20 \times 10^{-5} eV$. A energia é muito baixa para permitir fotoelétrons da superfície metálica. Para raios x , ou para raios γ energéticos, tal como os emitidos dos núcleos radioativos, a energia do fóton pode ser $10^6 eV$ ou $10^5 eV$. Os fótons na região visível do espectro eletromagnético não são energéticos o bastante para fazer isso; os fotoelétrons que eles ejetam começam a ser chamados, então, de elétrons de condução, que estão ligados ao metal por energias de apenas alguns elétrons-volts.

Os fótons são absorvidos no processo fotoelétrico. Isso requer que os elétrons ligados aos átomos ou sólido por um elétron realmente livre não possam absorver um fóton e conservar, tanto a energia ($E = mc^2$), quanto o momento relativístico total ($p = E/c$), no processo. Deve-se ter um elétron unido e, conseqüentemente, as forças de contato servindo para transmitir momento ao átomo ou sólido. Devido à grande massa de um átomo, ou sólido,

comparada com a de um elétron, o sistema pode absorver uma quantidade enorme de momento, sem adquirir uma quantidade significativa de energia. A equação de energia fotoelétrica continua válida, o efeito sendo possível, somente porque há uma partícula pesada retrocedendo, além de um elétron ejetado. O Efeito Fotoelétrico é uma importante forma em que fótons de energia, incluindo a energia dos raios x , são absorvidos pela matéria. Em energias superiores, outros processos de absorção de fótons tornam-se mais importantes.

Finalmente, deveria ser enfatizado aqui que no exemplo de Einstein um fóton de frequência ν tem exatamente a energia $h\nu$ e não múltiplos de $h\nu$. É óbvio que pode haver n fótons de frequência ν , então aquela energia naquela frequência pode ser $nh\nu$. Em se tratando da radiação de cavidade do corpo negro, na ilustração de Einstein, faz-se referência a um "gás fóton", porque a energia radiante está localizada no espaço em pacotes, em vez de continuamente através do espaço em ondas estacionárias. Anos depois da dedução de Planck da expressão da radiação de cavidade, Bose e Einstein obtiveram a mesma expressão nas bases de um gás de fótons. [7. 11]

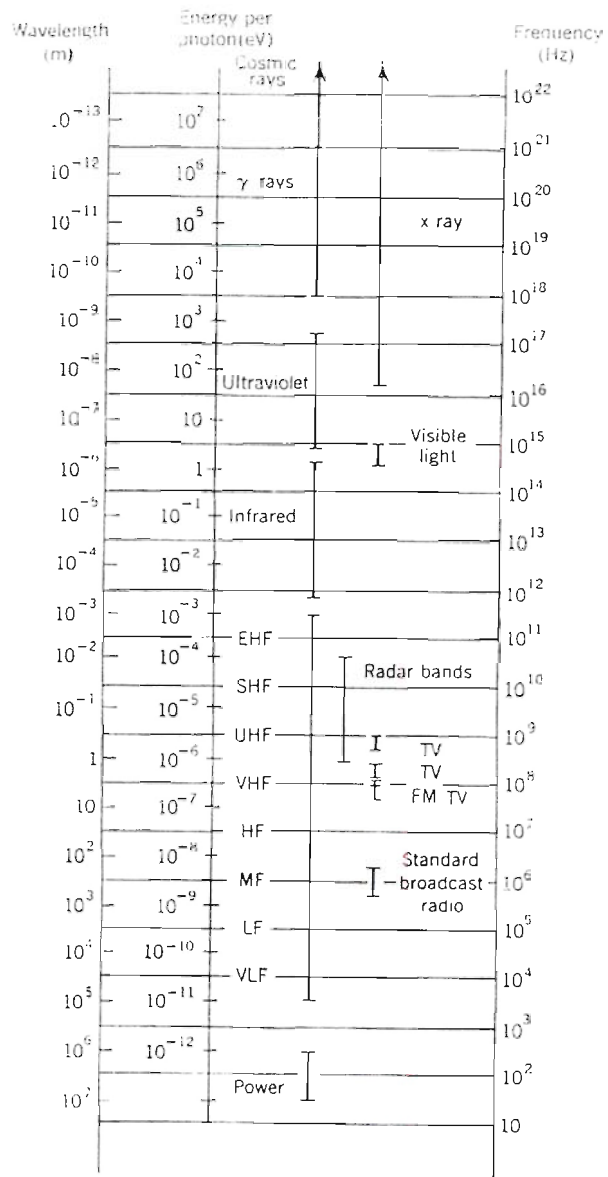


Figura 19: O espectro eletromagnético mostrando o comprimento de onda, a frequência e a energia por fóton, na escala logarítmica. [7]

5- Aplicações do Efeito Fotoelétrico no Cotidiano

Atualmente as células fotoelétricas ou fotocélulas são largamente usadas em diversos dispositivos eletrônicos, como fotômetros, controles remotos, circuitos de segurança, etc.

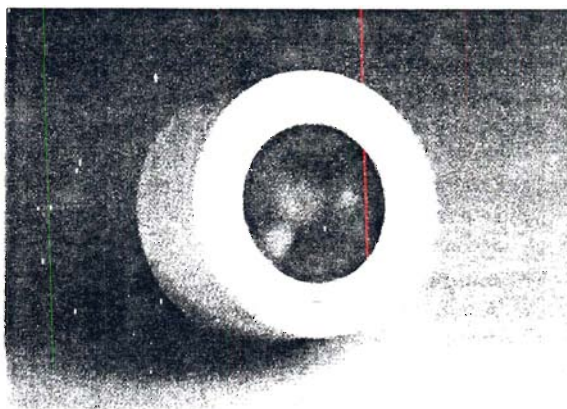


Figura 20: Célula fotoelétrica. [3]

Quando se usa uma filmadora portátil de vídeo, que é praticamente uma estação de televisão de mão, a captura da luz visível também é feita por dispositivos fotoelétricos.

O CCD (Charge-Coupled Device ou dispositivo de carga acoplada) é um aparelho detector de luz muito sensível. Ele é um chip quadrado formado por uma matriz de sensores fotoelétricos feitos de material semicondutor, distribuídos em linhas e colunas. Em qualquer imagem digital, cada um dos pontos da matriz é chamado de pixel. Assim, cada sensor do CCD dará origem a um pixel da imagem digital final. Por isso, é bastante comum haver referência a cada sensor fotoelétrico do sistema como um pixel.

Quando um fóton atinge um desses sensores, um elétron é liberado pelo Efeito Fotoelétrico e registrado como sendo proveniente daquele determinado pixel. Quanto mais fótons atingem um certo pixel, mais elétrons são liberados. Um sistema eletrônico registra os elétrons, somando a quantidade total deles, sensor por sensor, pixel por pixel. Depois de um certo tempo, o sistema tem informações

armazenadas e “sabe” de onde veio a maior ou menor intensidade luminosa. Assim, é possível conseguir uma imagem digital.

A eficiência de um CCD é enorme quando comparada ao olho humano ou até mesmo aos mais sensíveis filmes fotográficos (veja gráfico comparativo). Por isso mesmo, o uso profissional dos dispositivos CCD é cada vez maior. Atualmente, as mais diversas câmeras de vídeo, desde as amadoras até as profissionais, utilizam o CCD como detectores de luz. Em astronomia, dispositivos CCD são cada vez mais utilizados para registrar imagens de objetos no espaço. A grande vantagem é que, mesmo de regiões escuras, onde aparentemente não existe nenhum objeto, o CCD consegue somar fóton por fóton ao longo do tempo. Assim, é possível registrar imagens até mesmo de objetos cuja radiação eletromagnética que chega à Terra é muito fraca.

Nas câmeras fotográficas ou de vídeo, um conjunto de lentes faz a captação óptica, conjugando uma imagem real que será projetada sobre a matriz de pixels. Nos telescópios, a parte óptica já existe. Nesse caso, o CCD entra no lugar da lente ocular apenas para captar a imagem que já está “pronta”. A partir de agora, com todo o domínio tecnológico da microeletrônica e do Efeito Fotoelétrico, cada vez mais os profissionais que precisam, de alguma forma, capturar e registrar fótons vão utilizar aparelhos dotados de CCD.

O fato de a luz ter uma certa quantidade de energia associada não é de se estranhar. Basta lembrar os painéis solares nos telhados das casas que convertem a energia da luz em energia elétrica e/ou calor (esquentando a água que passa por tubos, por exemplo). Esses aquecedores só funcionam bem de dia e à luz do sol: sem luz, não há energia e o sistema (coletor solar) fornece apenas o que foi armazenado durante o dia em baterias e/ou reservatórios de água quente.

Se a energia associada à luz for suficientemente alta, ela pode quebrar as ligações químicas entre moléculas e/ou átomos, como é o caso da luz ultravioleta e dos raios X. Quando uma quebra de ligação química ocorre, encontramos átomos que perdem elétrons (chamamos de íons positivos) e/ou ganham elétrons (íons negativos): por esta razão, muitas vezes, luz com energia razoavelmente alta é chamada de radiação ionizante.

A quebra em grande quantidade de ligações químicas em um organismo vivo pode ser nociva. É esta a razão do caráter nocivo de se expor intensamente à luz ultravioleta e aos raios X. Por isso, recomenda-se protetor solar que possua em sua composição filtros que bloqueiam boa parte da radiação ultravioleta (UVA e UVB) proveniente do sol. Como os raios X têm uma energia associada mais alta que a radiação ultravioleta, usualmente são utilizados materiais mais densos (“pesados”) para bloqueá-los, como o chumbo.

Existem muitos estudos para tentar determinar os limites seguros de exposição dos seres vivos à radiação, porém isto é muito difícil de se estabelecer devido à grande quantidade de variáveis envolvidas. Contudo, existem normas muito bem estabelecidas de proteção radiológica envolvendo métodos e equipamentos que fornecem uma boa confiabilidade em termos de segurança, e que, se obedecidos, mantêm as exposições à radiação abaixo do limite onde os danos se tornam importantes.

Podemos fazer uma comparação com o monóxido de carbono (CO) que é emitido pelos escapamentos dos automóveis, que é altamente tóxico, e, nem por isto, deixamos de andar pelas ruas das cidades. Mas devemos evitar situações, por exemplo, de garagens fechadas, sem ventilação forçada, com o motor do carro em funcionamento.

Foi o Efeito Fotoelétrico que viabilizou o cinema falado, assim como a transmissão de imagens animadas (televisão). Os aparelhos fotoelétricos permitiram construir maquinaria capaz de produzir peças, sem intervenção alguma do homem. Os aparelhos baseados no Efeito Fotoelétrico controlam o tamanho das peças melhor do que qualquer operário. Isto se tornou possível devido aos aparelhos chamados células fotoelétricas, em que a energia da luz controla a energia da corrente elétrica ou se transforma em corrente elétrica.

Uma célula fotoelétrica moderna consta de um balão de vidro cuja superfície interna está revestida, parcialmente, de uma fina camada de metal com pequeno trabalho de arranque: é o cátodo. (Figura 21) Através da parte transparente do balão, dita “janelinha”, a luz penetra no seu interior. No centro da bola há uma chapa metálica, que é o ânodo e tem como objetivo captar elétrons fotoelétricos. O

ânodo é ligado ao pólo positivo de uma pilha. As células fotoelétricas modernas reagem à luz visível e até mesmo aos raios infravermelhos.

Quando a luz incide no cátodo da célula, produz-se uma corrente elétrica no circuito que aciona um relé apropriado. A combinação da célula fotoelétrica com um relé permite construir um sem-número de dispositivos capazes de ver e distinguir objetos. Os aparelhos de controle automático de entrada no metrô constituem um exemplo de tais sistemas. Tais aparelhos acionam uma barreira que impede o avanço do passageiro, caso ele atravesse o feixe luminoso, sem ter previamente introduzido a moeda necessária.

Esse tipo de aparelho torna possível a prevenção de acidentes. Por exemplo, nas empresas industriais uma célula fotoelétrica faz parar quase instantaneamente uma prensa potente e de grande porte se, digamos, o braço de um operário se encontrar na zona de perigo.

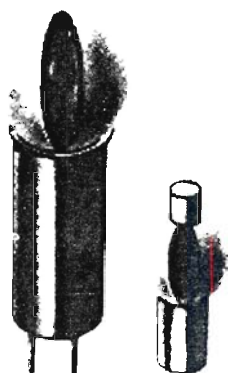


Figura 21: Célula fotoelétrica moderna. [14]

O visor noturno é uma aplicação tecnológica do Efeito Fotoelétrico muito utilizada atualmente, como se pode ver nas figuras abaixo.

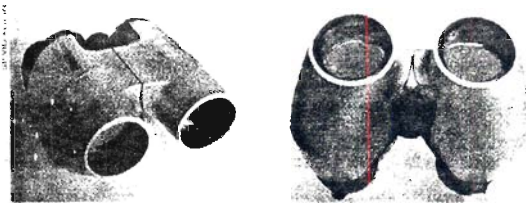


Figura 22: Visor noturno. [3]



Figura 23: Supostos integrantes do Taleban e da rede terrorista al-Qaeda observados por membros das Forças Especiais Norte-americanas com um visor noturno. Foto de 24 de agosto de 2002, em Narizah, a cerca de 140 km a leste de Cabul, capital do Afeganistão. [3]

A Figura 24 esquematiza uma célula fotoelétrica. Quando a luz incide nela, no circuito da pilha P_1 produz-se uma corrente elétrica de pequena intensidade que atravessa a resistência R cujas extremidades estão ligadas à grelha e ao cátodo do triodo T . O potencial do ponto G (grelha) é inferior ao ponto C (cátodo). A válvula, nestas condições, não deixa passar a corrente elétrica e, portanto, no circuito anódico do triodo não há corrente. Se a mão ou o braço do operário se encontrar, por casualidade ou negligência, na zona de perigo, ela faz com que seja cortado o fluxo luminoso que normalmente incide na célula fotoelétrica.

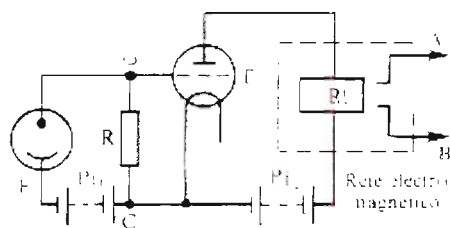


Figura 24: Esquema de uma célula fotoelétrica. [14]

A válvula fica aberta e através do enrolamento do relé eletromagnético ligado ao circuito anódico passa a corrente elétrica, acionando o relé cujos contatos fecham o circuito de alimentação do mecanismo responsável por parar a prensa.

Além do Efeito Fotoelétrico, dito Efeito Fotoelétrico externo, existe também o chamado Efeito Fotoelétrico interno, próprio dos semicondutores, muito utilizado, por exemplo, nas resistências fotoelétricas. Isto é, aparelhos elétricos cuja resistência depende da intensidade da iluminação. Aplica-se igualmente nos aparelhos fotoelétricos semicondutores que transformam, de forma direta, a energia luminosa em energia elétrica. Tais aparelhos podem servir de fonte de corrente elétrica, permitindo avaliar a intensidade da iluminação, por exemplo, em fotômetros. No mesmo princípio assenta o funcionamento das pilhas solares, de que estão munidas todas as naves cósmicas.

Uma outra aplicação do Efeito Fotoelétrico é o alarme contra ladrão, exibido na Figura 25. Um feixe de luz ao atingir uma superfície sensível faz com que ela emita elétrons que são atraídos pelo ânodo. Por consequência, o circuito do Relé se fecha e o interruptor do alarme permanece desligado. Quando o feixe de luz é interrompido (pelo ladrão), a corrente deixa de circular no Relé e o circuito da campainha é fechado pela ação da mola.

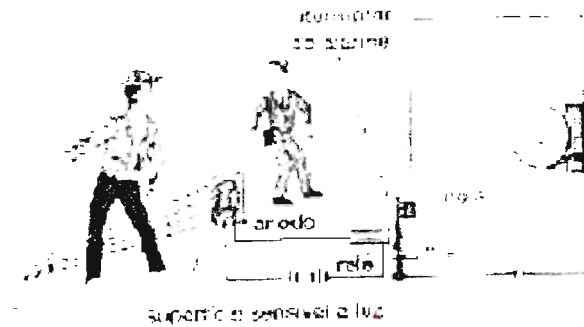


Figura 25: Alarme contra ladrão. [14]

O funcionamento de lâmpadas noturnas também é uma aplicação do Efeito Fotoelétrico. (Figura 26)

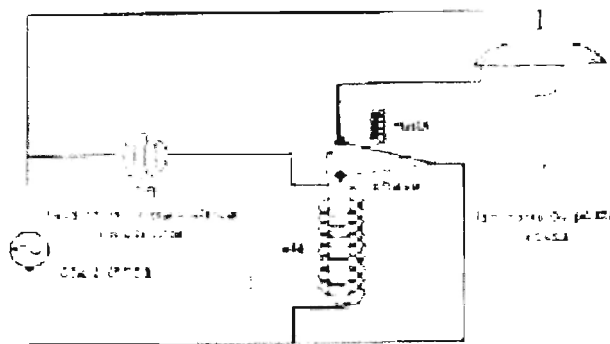


Figura 26: Funcionamento de lâmpadas noturnas. [14]

Quando escurece, a resistência do LDR aumenta, diminuindo a intensidade da corrente elétrica que passa pela bobina. A intensidade do campo magnético diminui, fazendo com que a mola puxe a alavanca que liga a chave. Durante o dia, a resistência de LDR é pequena, por isso a corrente na bobina é alta e o campo magnético é muito intenso. Por conseguinte, a chave fica na posição indicada. [4]
[9]

6- Experimento Envolvendo o Efeito Fotoelétrico

Este capítulo apresenta um experimento que envolve o Efeito Fotoelétrico e é aplicável ao Ensino Médio, sendo seguido de algumas questões pertinentes.

O Efeito Fotoelétrico é observado durante a incidência de luz, de frequência adequada, em um eletroscópio, em três circunstâncias distintas; em cada uma, o eletroscópio apresenta uma placa de material diferente; de latão, de cobre e de alumínio.

6.1 Objetivo

A finalidade desse experimento é mostrar alguns conceitos fundamentais associados ao Efeito Fotoelétrico, por meio de um experimento que está ao alcance do professor do ensino médio, o que contribui para a compreensão de tais conceitos por parte dos alunos.

O experimento é realizado para três placas de materiais diferentes, o que permite uma comparação dos comportamentos de tais materiais, diante do Efeito Fotoelétrico.

Além disso, o experimento, propriamente dito, é seguido de algumas questões dirigidas ao estudante, a fim de instigá-lo ao raciocínio e à pesquisa de conceitos concernentes ao Efeito Fotoelétrico.

6.2 Material Empregado

- ✓ Um eletroscópio.
- ✓ Uma lâmpada de luz violeta.
- ✓ Uma placa de latão.
- ✓ Uma placa de cobre.
- ✓ Uma placa de alumínio.
- ✓ Um bastão de PVC.
- ✓ Uma flanela de fibra sintética.

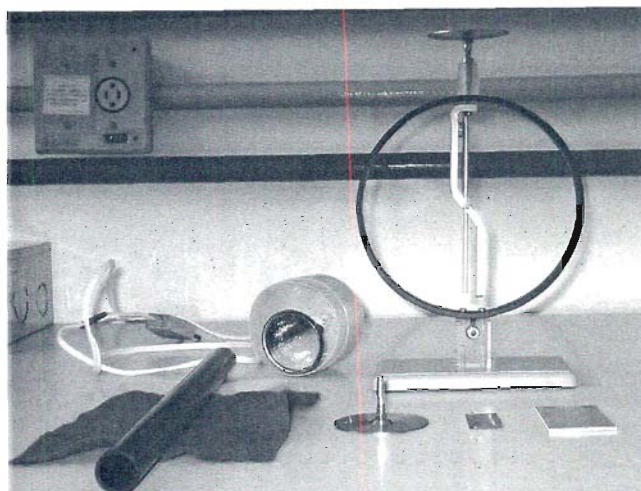


Figura 27: Materral utilizado.

6.3 Série Triboelétrica

Quando uma pessoa esfrega as mãos, nenhuma delas é eletrizada. Para que haja eletrização por atrito, é preciso que os corpos sejam de materiais diferentes, em outras palavras, eles não podem possuir a mesma tendência de ganhar ou perder elétrons. Em Química, essa tendência é explicada por uma grandeza denominada de eletroafinidade.

Os materiais podem ser classificados de acordo com essa tendência, elaborando-se a chamada série triboelétrica:

MAIS POSITIVO	Fibra sintética lã
NEUTRO	Cobre Vinil (PVC)
MAIS NEGATIVO	Teflon

Tabela 1: Série triboelétrica.

Materiais que estão mais próximos do extremo ‘mais negativo’ têm uma disposição por assumir uma carga elétrica negativa. Os materiais, entretanto, que

estão mais próximos do extremo ‘mais positivo’ tendem a assumir carga elétrica positiva.

6.4 Roteiro Experimental

- Primeiramente, atrita-se o bastão (PVC) com a flanela de fibra sintética.
- Encosta-se o bastão no eletroscópio com placa de latão.
- Analisa-se, então, a deflexão correspondente na haste móvel do eletroscópio.
- Em seguida, faz-se incidir a luz disponível na placa de latão.
- Observa-se a deflexão no eletroscópio, comparando-a com a anterior
- Repetem-se todos os procedimentos acima mencionados para a placa de cobre.
- Finalmente, o mesmo é feito para o placa de alumínio.

6.5 Descrição Experimental

O primeiro passo foi eletrizar o bastão de vinil (PVC), empregando-se uma flanela de fibra sintética. Para isso, atritou-se, “com força”, o bastão contra a flanela fibra. Conforme se pode verificar na tabela 1, o vinil ficou com carga elétrica negativa, após o atrito.

O próximo passo foi encostar o bastão no eletroscópio com placa de latão, a fim de eletrizá-lo.

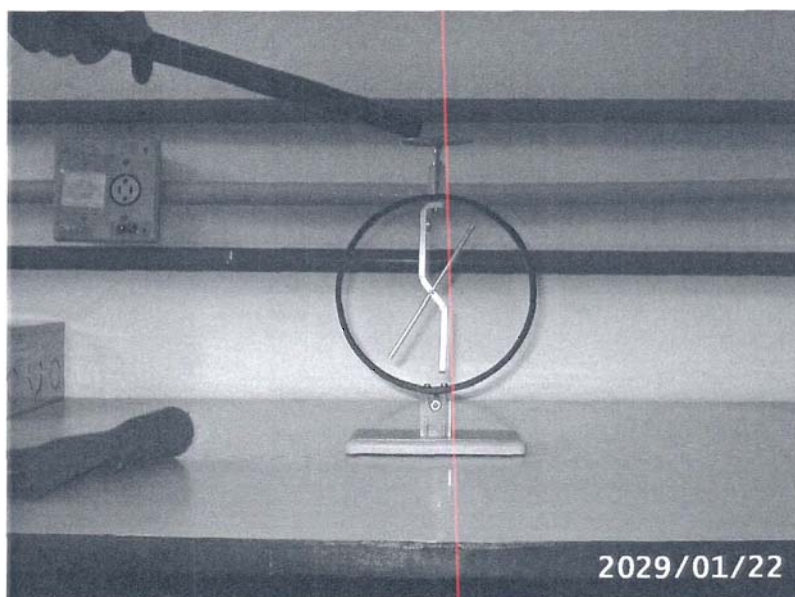


Figura 28: Eletroscópio sendo carregado pelo bastão.

A carga adquirida pelo eletroscópio é de mesmo sinal da do bastão, ou seja, negativa.

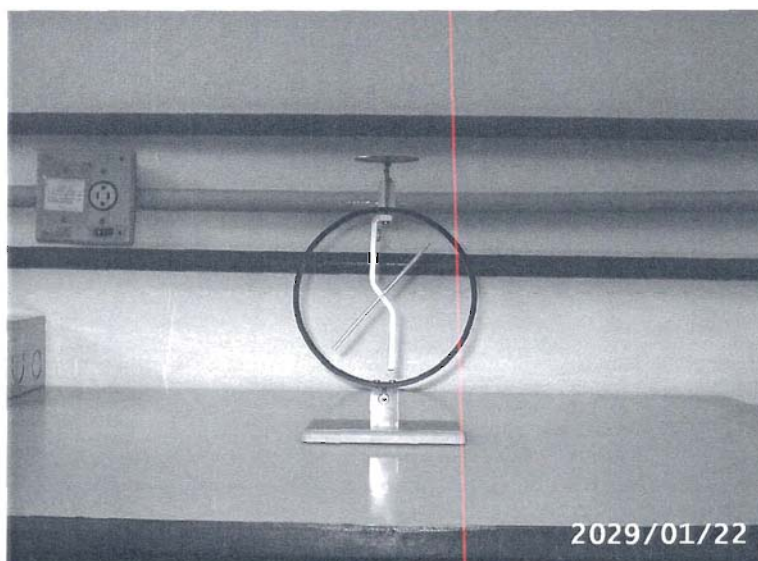


Figura 29: Eletroscópio com carga elétrica negativa.

Sabíamos, até esse instante, que o eletroscópio estava com excesso de elétrons e que cargas móveis em condutores elétricos eram impedidas de escapar do material do condutor pela barreira de energia-potencial na superfície e que por várias maneiras as partículas carregadas podiam receber energia suficiente, denotada por W , para ultrapassar esse obstáculo e escapar.

Fornecemos energia a esses elétrons, fazendo incidir luz no eletroscópio. Tínhamos conhecimento de que se a radiação incidente com uma dada frequência, ν , fosse mais intensa, maior número desses corpúsculos de energia seria transmitido, entretanto a quantidade de energia em cada pacote de onda permaneceria inalterada.

Por assim dizer, conforme se pode ver no capítulo 4, quando um elétron absorve um fóton de energia $E = h\nu$, onde h é a constante de Planck, sua energia cinética fora da superfície será:

$$K = h\nu - W. \quad (26)$$

O trabalho “ W ” é necessário para vencer os campos atrativos dos átomos na superfície e perdas de energia cinética ao longo das colisões internas do elétron. Alguns elétrons são ligados mais firmemente do que outros; alguns perdem energia em colisões durante a saída. No caso de ligações mais folgadas e sem perdas internas, o fotoelétron emergirá com energia cinética máxima, $K_{máx}$. Portanto,

$$K_{máx} = h\nu - w_0, \quad (27)$$

onde w_0 , uma energia peculiar do metal, chamada função trabalho, é a menor energia necessária para que um elétron passe através da superfície do metal e escape das forças atrativas que, normalmente, unem o elétron ao metal.

É possível verificar, na tabela 2, a função trabalho dos metais citados no experimento.

METAL	FUNÇÃO TRABALHO (eV)
Alumínio	4,08
Zinco	4,31
Cobre	4,70

Tabela 2: Função trabalho de alguns metais. [2]

Para apresentar o Efeito Fotoelétrico, fizemos, então, incidir luz com frequência ν elevada o suficiente (violeta), superior à correspondente a w_0 , para que os elétrons livres tivessem energia o bastante a ponto de “saltar” do eletroscópio.

Com o Efeito Fotoelétrico, há, como resposta, uma redução na deflexão da haste móvel do eletroscópio.

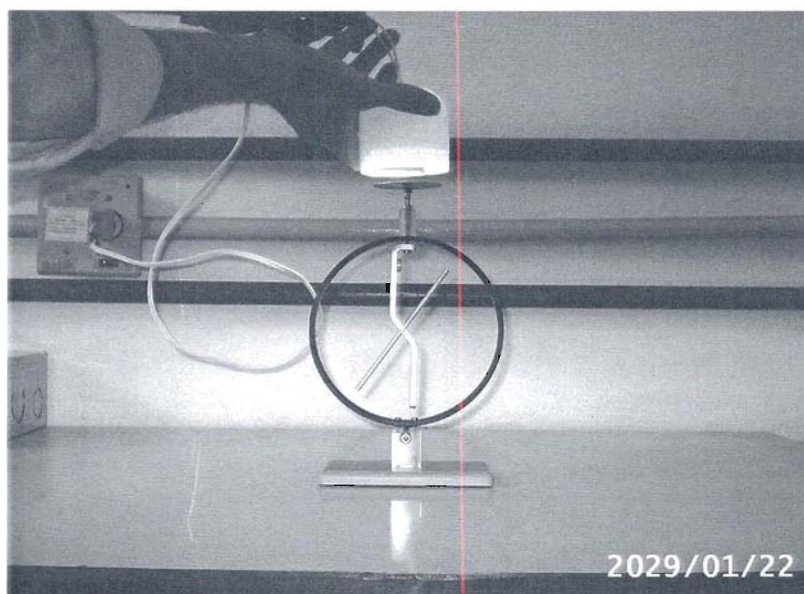


Figura 30: Efeito Fotoelétrico ocasionando uma diminuição na deflexão da haste móvel do eletroscópio.

O próximo passo foi repetir todos os passos acima citados para as placas de cobre e de alumínio, para efeito de comparação dos três materiais em presença do Efeito Fotoelétrico.

Começamos carregando a placa de cobre.

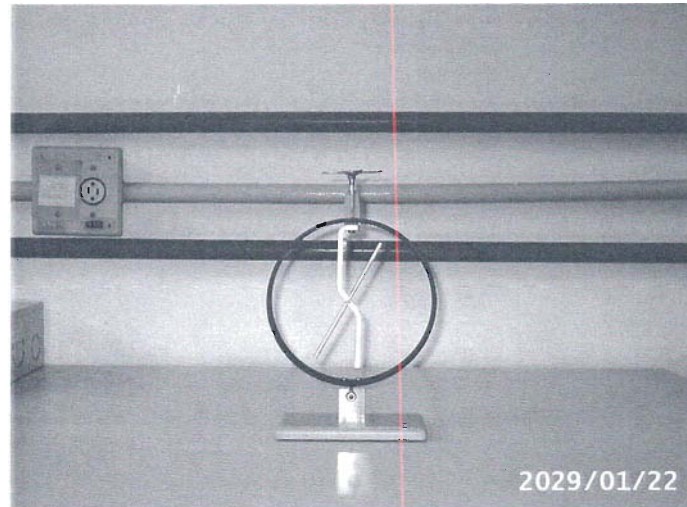


Figura 31: Eletroscópio com placa de cobre.

Fizemos incidir, então, a luz sobre a placa de cobre.

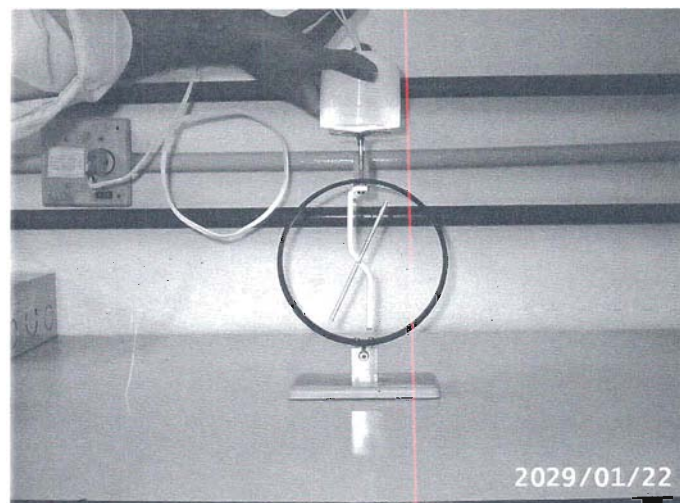


Figura 32: Efeito Fotoelétrico na placa de cobre.

E, finalmente, carregamos o eletroscópio com placa de alumínio.

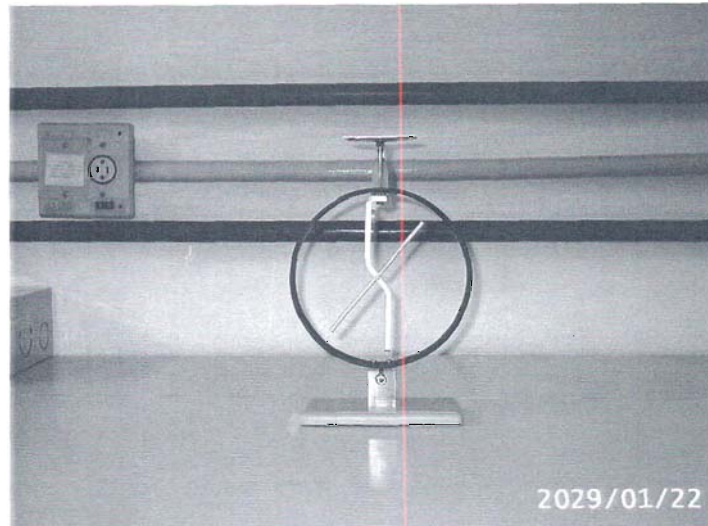


Figura 33: Eletroscópio com placa de alumínio.

Observamos, por consequência, o Efeito Fotoelétrico no eletroscópio com placa de alumínio.

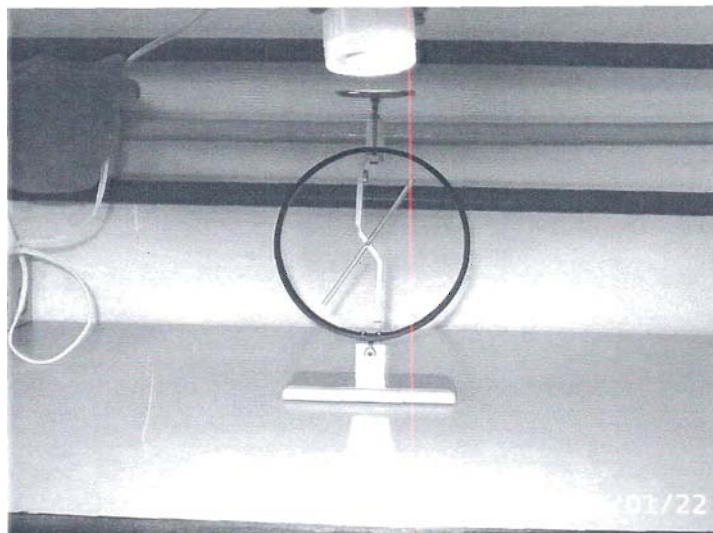


Figura 34: Efeito Fotoelétrico na placa de alumínio.

O Efeito Fotoelétrico ocasionou uma maior deflexão para a placa de alumínio, seguida do cobre e, finalmente, o latão, que é uma mistura de cobre com zinco, cujo Efeito Fotoelétrico produziu menor deflexão.

6.6 Questões

- Se, ao invés de violeta, tivéssemos empregado luz vermelha, teríamos o mesmo efeito? Por que?
- E, se utilizássemos a luz vermelha e aumentássemos a intensidade da radiação, qual seria a resposta do sistema?
- Aumentando a frequência da radiação incidente em nosso experimento, elevaria a quantidade de elétrons ejetados? E, a energia cinética dos elétrons, em média, seria maior? Justifique suas respostas.
- Sabemos que w_0 é uma energia peculiar do metal, chamada função trabalho. Se tivéssemos utilizado um metal, cuja função trabalho tivesse maior valor, o que ocorreria? Qual seria a solução para o problema?
- O número de elétrons emitidos pela placa de alumínio foi o maior, enquanto o da placa de latão foi o menor, para a mesma frequência. Explique o porquê, tendo em vista a diferença dos valores das funções trabalho de cada uma das placas.
- Faça uma comparação entre as energias cinéticas de escape dos elétrons nos três casos.

7- Conclusão

O Efeito Fotoelétrico, descoberto por Heinrich Rudolf Hertz e explicado de forma completa por Albert Einstein, é um fenômeno que causou uma revolução na física. É de extrema importância, em vista disso, tentar apresentar tal fenômeno ao aluno de Ensino Médio, através de experimentos simples e de baixo custo.

Outro aspecto é a conveniência do Efeito Fotoelétrico para o ano de 2005, devido ao centenário da publicação do Efeito Fotoelétrico, que, embora a Teoria da Relatividade tenha sido sua contribuição mais notável, rendeu-lhe o Prêmio Nobel de Física em 1921. [2] [16] [17] [18] [19]

8 – BIBLIOGRAFIA

- [1] PCN's (MEC / SEMTEC, 2002).
- [2] GASPAR, Alberto. *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna*. São Paulo, Editora Ática, 2000.
- [3] PARANÁ, Djalma Nunes da Silva. *Física*. 6ª edição (reformulada). São Paulo, Editora Ática, 2003.
- [4] Encarta'95 (CD ROM). Microsoft Corporation, 1995.
- [5] OREAR, Jay. *Física*. Trad. Ivan Cunha Nascimento e José Roberto Moreira. Rio de Janeiro, LTC, 1971.
- [6] TIPLER, Paul A. *Física*. Trad. Ronaldo Sérgio de Biasi. 4. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2000.
- [7] EISBERG, Robert & RESNICK, Robert. *QUANTUM PHYSICS, of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*. JOHN WILEY & SONS, New York, 1974.
- [8] GILMORE, Robert. *Alice no País do Quantum*. Trad. André Penido. Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor, 1998.
- [9] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert and KRANE, Kenneth S. *Física 4*. 4ª Edição, 1992.
- [10] FERRARO, Nicolau Gilberto; PENTEADO, Paulo César; SOARES, Paulo Toledo; TORRES, Carlos Magno. *Física Ciência e Tecnologia*. Volume Único, Editora Moderna, 2001.
- [11] YOUNG, Hugh D. *Fundamentals of Optics and Modern Physics*. McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [12] FERRARO, Nicolau Gilberto & SOARES, Paulo Toledo. *Física Básica*. Volume Único, 4ª reimpressão, São Paulo, Editora Atual, 1998.
- [13] ROZENBERG, Izrael Martka. *Elementos de Química Geral e Inorgânica*. São Paulo, Editora Nacional, 1973.

Internet:

[14] www.fisica.net (09/2004)

[15] www.ricarte.cjb.net (06/2005)

[16] SCIENTIFIC AMERICAN Brasil – GÊNIOS DA CIÊNCIA – Revista nº 6.

[17] SCIENTIFIC AMERICAN Brasil, EDIÇÃO ESPECIAL CENTENÁRIO DOS ARTIGOS QUE REVOLUCIONARAM A FÍSICA, Revista nº 29.

[18] NOVA ESCOLA – A REVISTA DO PROFESSOR – Edição 181, abril, 2005.

[19] FOLHA DE SÃO PAULO, Especial **1**, de 5 de junho de 2005.