



PRODUTO EDUCACIONAL

UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA PARA A APRENDIZAGEM DO EFEITO FOTOELÉTRICO

Rafhael Lucas Arruda Teles de Menezes

Orientador:
Prof. Dr. Francisco Nairon Monteiro Júnior

Recife
2021

Caro professor (a),

Esse manual foi produzido com a proposta de dar utensílios teóricos que podem ser aplicados em ambiente escolar, possibilitando a melhor introdução de conceitos científicos e aquisição de aprendizagem dos alunos.

A metodologia utilizada baseia-se na construção de Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) para ensinar um conteúdo de grande relevância para a física moderna e contemporânea, que é o efeito fotoelétrico.

Diante de alguns desafios existentes nas salas de aulas, propostas inovadoras que podem atrair a atenção dos alunos e despertar a veia científica, são muito bem vindas e por isso este manual pode oferecer recursos para um melhor resultado em sua jornada docente.

Os tópicos que se seguem explicam de maneira clara e objetiva o passo a passo que deve ser seguido em cada aula. A sequência didática foi elaborada em oito aulas seguidas, onde alguns materiais serviram de organizadores prévios para que novas informações fossem adicionadas na estrutura cognitiva dos alunos de maneira a construir um saber mais abrangente e profundo do assunto estudado, fugindo da forma tradicional que muitas vezes trás resultados superficiais e que após as avaliações somem das mentes dos discentes.

Cada turma possui sua peculiaridade e demanda, por isso é importante saber o perfil dos alunos que passarão por este tipo de desenvolvimento didático para que alcance o sucesso desejado, por isso pode-se ficar livre em modificar qualquer aspecto que julgar necessário e/ou material, desde que a sua condução leve os estudantes à aprendizagem correta e efetiva do efeito fotoelétrico.

Havendo dúvidas na aplicação e avaliação dos resultados obtidos na execução desse produto, é recomendada a leitura do texto da dissertação do autor, pois trará mais esclarecimentos.

Desejo uma boa experiência docente.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. Apresentação do Produto..... | 4 |
| 2. Fundamentação Teórica:..... | 7 |
| 2.1. Efeito fotoelétrico..... | 7 |
| 3. Exposição de cada aula: | 22 |
| 3.1. Aula 1: Verificação dos subunçores por meio de questionário. | 22 |
| 3.2. Aula 2: Experiência em vídeo:..... | 24 |
| 3.3. Aula 3: Experiência com simulador computacional: | 26 |
| 3.4. Aula 4: Aula Expositiva do Efeito Fotoelétrico..... | 30 |
| 3.5. Aula 5: Texto e vídeo sobre a quantização da energia e dualidade onda-partícula. | 31 |
| 3.6. Aula 6: Aula expositiva sobre a equação da energia cinética do elétron no efeito fotoelétrico..... | 35 |
| 3.7. Aula 7: Questionário de avaliação dos alunos | 36 |
| 3.8. Aula 8: Análise do êxito da UEPS | 36 |
| 3.9. Considerações finais:..... | 37 |
| 4. Apêndice do Produto | 38 |
| 4.1. Apêndice A: | 38 |
| 4.2. Apêndice B: | 40 |
| 4.3. Apêndice C: | 42 |
| 4.4. Apêndice D: | 43 |
| 4.5. Apêndice E:..... | 46 |
| Referências Bibliográficas | 48 |
| Anexo A:..... | 51 |

1. Apresentação do Produto

A proposta deste manual é de levar ao professor um conteúdo que possa satisfazer sua intenção positiva de conduzir o aluno a um conhecimento pautado em conteúdos da física moderna e contemporânea de maneira significativa.

Dentro dessa perspectiva, a utilização das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas tem como proposta a incorporação da teoria de aprendizagem de David Ausubel. As UEPS são sequências de ensino fundamentadas teoricamente voltadas para a aprendizagem significativa, não mecânica, que podem estimular a pesquisa aplicada em ensino, aquela voltada diretamente à sala de aula.

O tema escolhido para a aplicação desta sequência didática foi o estudo do efeito fotoelétrico. Desta forma, foi possível tratar de temas relacionados à natureza da luz e das radiações eletromagnéticas em geral e entender alguns conceitos importantes na construção da teoria quântica. A proposta da UEPS é a aquisição de aprendizagem não mecanizada, mas construída progressivamente trazendo significado aos alunos.

No presente trabalho, a sequência didática contará com oito aulas, cada uma com duração aproximada de quarenta e cinco minutos nas quais serão vivenciadas seguintes temáticas:

1ª aula: Verificação dos subsunçores por meio de questionário.

2ª aula: Experiência em vídeo

3ª aula: Experiência com simulador computacional:

4ª aula: Aula Expositiva do Efeito Fotoelétrico

5ª aula: Texto e vídeo sobre a quantização da energia e dualidade onda-partícula.

6ª aula: Aula expositiva sobre a equação da energia cinética do elétron no efeito fotoelétrico

7ª aula: Questionário de avaliação final dos alunos

8ª aula: Análise do êxito da UEPS

A UEPS condiciona o aluno a aprender de forma significativa seguindo alguns passos onde o conhecimento será formado através de oito passos sequenciais, tal como proposto por Moreira. Cada passo pode ser desenvolvido em uma aula, duas ou mais, a depender do desenvolvimento escolhido pelo professor, de tal forma que se adapte ao tempo das aulas e ao efetivo aprendizado dos alunos.

Como a avaliação pode ser feita pelo registro de qualquer aprendizagem significativa durante todo o processo (através de debates, questionários, comentários escritos ou orais, etc.) é fundamental que o professor esteja analisando minuciosamente cada passo realizado em cada aula. Ao final das sete aulas, o professor deverá analisar o êxito da UEPS baseado nos resultados adquiridos durante sua aplicação.

O primeiro passo da UEPS envolve a definição do tópico a ser abordado, identificando seus aspectos dentro de um contexto em que está inserido o tópico. Este primeiro estágio foi claramente atendido quando o tópico de efeito fotoelétrico foi escolhido mediante as condições propícias e relevantes à sua aceitação dentro do assunto de física moderna e contemporânea. Ademais, os próximos passos da UEPS, propostos por Moreira são apresentados na Tabela 2, bem como os recursos didáticos necessários e a respectiva carga horária mínima empregada pelo autor deste trabalho.

Tabela 1: Aspectos sequenciais das UEPS aplicadas ao Produto

| Aula | Aspectos sequenciais da UEPS | Recursos | Carga horária mínima |
|----------------------|--|---|-----------------------------|
| 1^a | 2º passo: Criação de situações que externalizam os conhecimentos prévios dos alunos, relevante à aprendizagem significativa. | Questionário de conhecimentos prévios e discussão | 45 minutos |
| 2^a | 3º passo: Proposta de situação- problema em nível introdutório. O aluno pode usar os conhecimentos prévios para modelá-la mentalmente. | Vídeo problemático da experiência do efeito fotoelétrico, projetor e aparelho de som. | 45 minutos |
| 3^a | | Computadores, projetor e | 45 minutos |

| | | | |
|----------------------|--|--------------------------------------|------------|
| | | software apropriado. | |
| 4^a | 4º passo: Exposição oral do conhecimento a ser aprendido levando em conta a diferenciação progressiva, seguida de atividades colaborativas. | Lousa e pincel | 45 minutos |
| 5^a | 5º passo: Retomada dos conteúdos em nova apresentação, em nível mais alto de complexidade, destacando semelhanças e diferenças relativas às situações já trabalhadas. Em seguida novas atividades são propostas. | Texto didático, vídeo e questionário | 45 minutos |
| 6^a | 6º passo: Aula expositiva integradora que retoma todas as atividades anteriores e propostas de novas atividades em níveis mais complexos. | Lousa e pincel | 45 minutos |
| 7^a | 7º passo: Resolução da avaliação somativa individual através de questionário pelos alunos. | Formulário de Avaliação final. | 45 minutos |
| 8^a | 8º passo: Avaliação de aprendizagem da UEPS, que está baseada nos trabalhos realizados e nas observações em sala de aula. | Questionário atribuído aos alunos. | 45 minutos |

Na seção 2 deste produto será exposta a fundamentação teórica do efeito fotoelétrico, de forma clara e detalhada.

Na seção 3 é apresentada a metodologia procedimental discriminado de cada aula até a conclusão da UEPS.

2. Fundamentação Teórica:

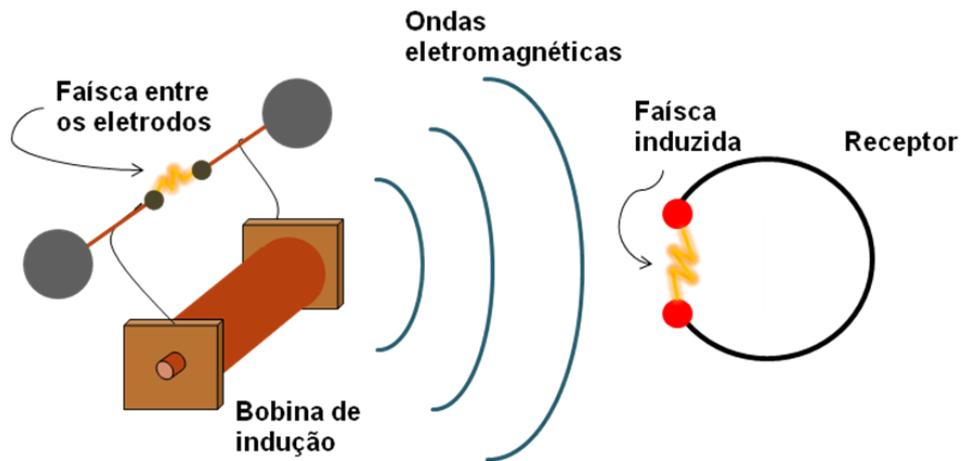
2.1. Efeito fotoelétrico

Uma das grandes descobertas da física moderna e contemporânea foi o efeito fotoelétrico, que além de trazer o esclarecimento da natureza da luz (e demais radiações eletromagnéticas), promoveu a criação de diversos dispositivos aplicados nas mais variadas situações do nosso cotidiano.

O efeito fotoelétrico foi descoberto por acaso por Heinrich Hertz em 1887, logo após ter conseguido demonstrar a natureza eletromagnética da luz (EISBERG, 1961). Sua experiência consistia em produzir uma descarga oscilante que poderia saltar faísca entre dois eletrodos, gerando as ondas eletromagnéticas que seriam detectadas por meio de uma antena ressonante, na qual também funcionava por meio de faísca entre eletrodos (ver Figura 3). Ele observou que ao colocar um anteparo entre as duas, a faísca saltava com mais dificuldade na antena receptora, principalmente quando privada da luz violeta e ultravioleta.

Neste momento, Hertz estava validando a teoria de Maxwell a respeito da física clássica do eletromagnetismo, mas ao mesmo tempo, abrindo a porta para a nova teoria da quantização. Verificou-se que o motivo pelo qual a luz ultravioleta contribuía com a descarga era por ser capaz de arrancar elétrons da superfície metálica dos eletrodos, os elétrons ionizavam o ar, pois estavam acelerados pela diferença de potencial, facilitando assim a descarga (NUSSENZVEIG, 2002).

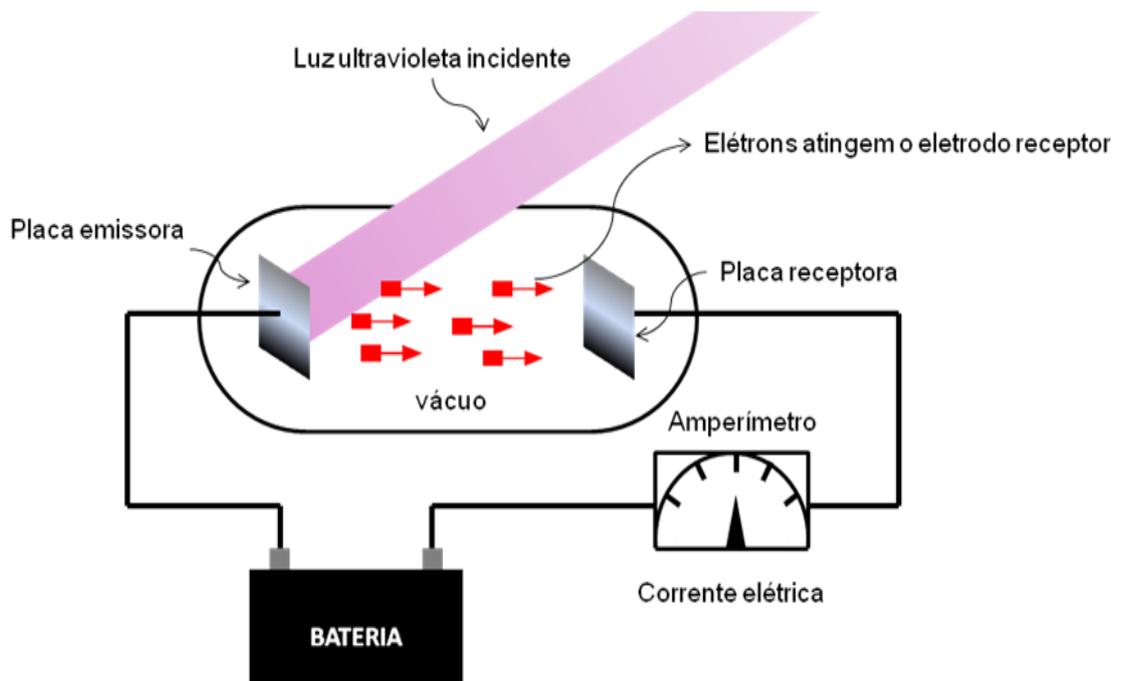
Figura 1: Experimento de Hertz



Fonte: produção do autor

Dois cientistas chamados Wilhelm Hallwachs e Phillip Lenard dedicaram-se ao estudo do efeito fotoelétrico durante os anos de 1886 e 1902 (LOGICAL CLASS, 2021), onde diversos experimentos foram realizados, notavelmente quando a luz ultravioleta incidia sobre superfícies metálicas. Lenard observou que radiações de ultravioleta incididas em uma das placas de metal que servia de eletrodo em um dispositivo envolvido por um tubo de vidro contendo vácuo, gerava uma corrente elétrica ao circuito externo como mostra a Figura 4 (NUSSENZVEIG, 2002).

Figura 2: Experiência de Lenard mostra o surgimento de corrente elétrica a partir da incidência de luz ultravioleta em um dos eletrodos.

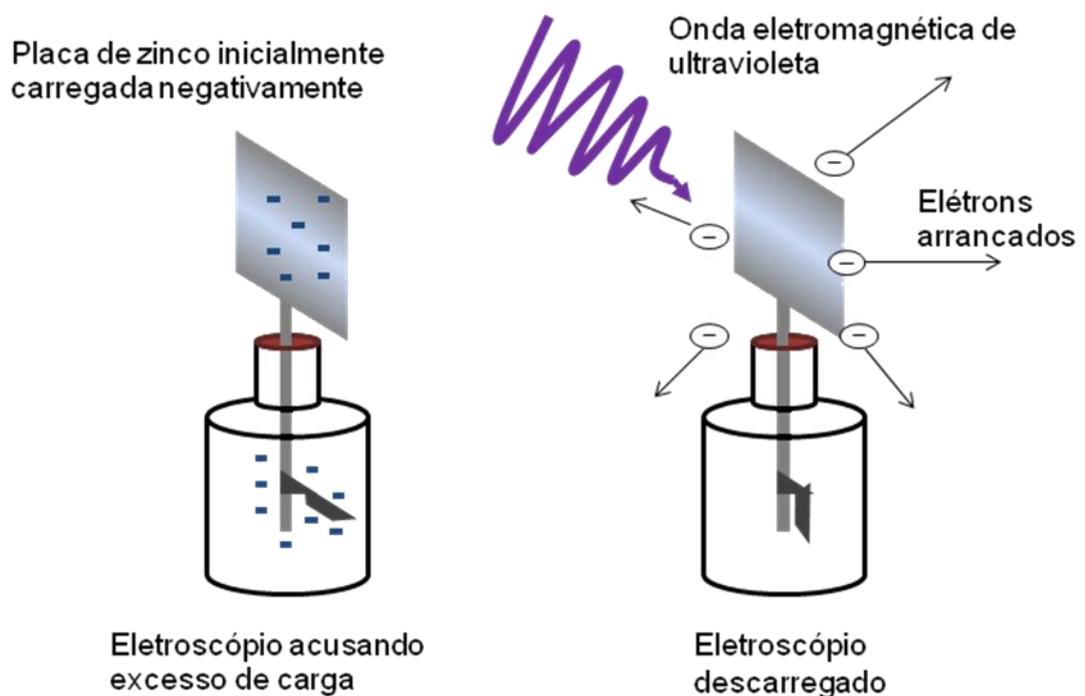


Fonte: produção do autor

Porém, quando a radiação ultravioleta era interrompida, o fluxo de corrente elétrica também cessava. Essa experiência mostrou que era a radiação incidida na placa emissora a responsável por ejetar algumas partículas carregadas, e elas por sua vez, eram atraídas a placa positiva.

Hallwachs conduziu novas investigações, posteriormente, pegando uma placa de zinco e um eletroscópio. A placa de zinco foi conectada ao eletroscópio em três situações: descarregada, carregada negativamente e carregada positivamente, em três experimentos distintos. Ele observou que: no primeiro experimento, a placa descarregada, quando irradiada por luz ultravioleta tornou-se carregada positivamente. No segundo experimento, a placa inicialmente carregada negativamente, ao ser iluminada por luz ultravioleta, a placa de zinco era totalmente descarregada (ver Figura 5). No terceiro experimento a placa positivamente carregada, ao receber luz ultravioleta se tornava mais positiva (HALLWACHS,1888)

Figura 1: Experiência de Hallwachs que mostra o descarregamento de uma placa de zinco inicialmente com carga negativa após ser iluminada por luz ultravioleta.



Fonte: produção do autor

Estudos seguintes de Hallwachs também mostraram que diferentes metais emitem elétrons quando irradiados por diferentes radiações eletromagnéticas. Por exemplo, metais alcalinos como sódio, cálcio e potássio, emitem elétrons com radiações de raio X, ultravioleta e luz visível (exceto luz vermelha e laranja).

É importante resaltar que os elétrons só foram descobertos em 1897 por J.J. Thomson (BREHM, 1989), por meio de experimentos envolvendo os raios catódicos, que consiste em uma ampola fechada de vidro ou quartzo, contendo um gás a baixa pressão. Dentro da ampola existem duas placas metálicas, o ânodo (eletrodo receptor) e o cátodo (eletrodo emissor) que quando ligadas a uma tensão muito alta, pode gerar um feixe direcionado do cátodo ao ânodo (ver Figura 6).

Thompson conseguiu descobrir que o feixe era formado por partículas que possuíam massa e carga elétrica negativa, devido a sua interação com o campo elétrico formado entre duas placas de sinais positivo e negativo, respectivamente, na qual sofria desvio, se aproximando da placa de sinal positivo (PIRES, 2011). Quando um campo magnético de valor específico é produzido por bobinas instaladas em certa direção, uma força magnética

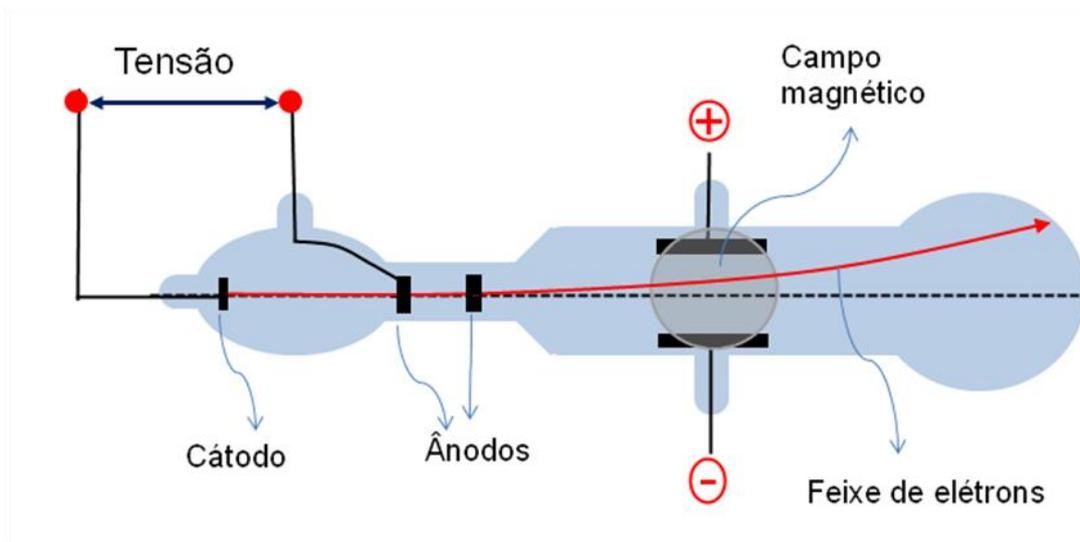
interage com o feixe, assim como a força elétrica devido ao campo elétrico entre as placas carregadas, cancelando o desvio do feixe, pois as forças elétrica e magnética, nesta circunstância se cancelam. Com isso, é possível obter a razão carga-massa das partículas contidas no feixe em função dos dados experimentais. Ele percebeu que estas partículas estariam presentes em toda a matéria, conforme menciona Tipler:

Ele mostrou também que partículas com esta razão carga-massa podem ser obtidas usando qualquer material para o cátodo, o que significa que estas partículas, agora chamadas de elétrons, são constituintes fundamentais de toda a matéria.

(TIPLER, 2006, p 8-9)

Lenard confirmou essa hipótese em um experimento semelhante, porém usando um cátodo estimulado por radiação (fotocátodo), que quando bombardeado por ultravioleta, liberava partículas que possuíam a relação carga-massa igual ao que Thompson conseguiu em seu experimento (EISBERG,1961).

Figura 2: Experiência dos raios catódicos de J.J. Thompson



Fonte: produção do autor

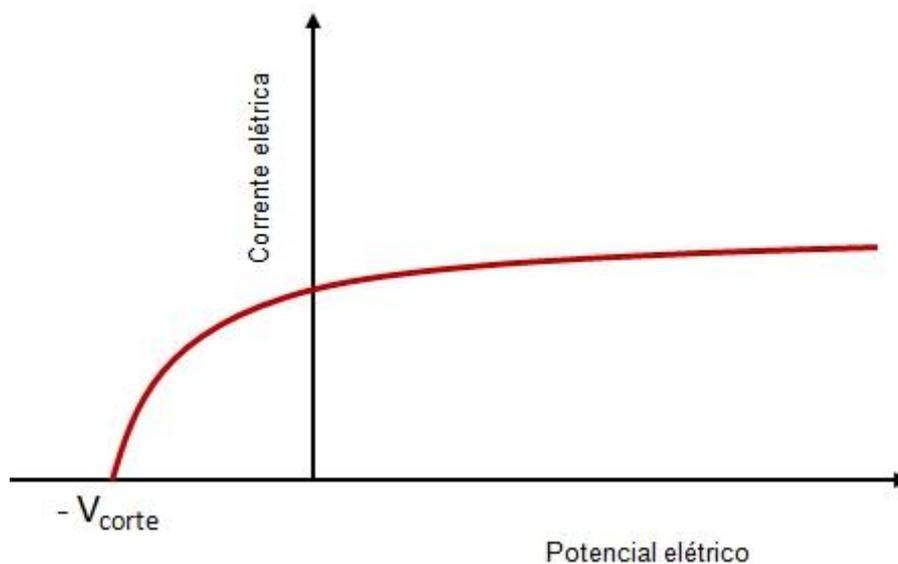
Outro experimento foi necessário para determinar as quantidades e e m separadamente. A intensidade da carga do elétron foi medida a

seguir por Millikan em uma série de estudos começando em 1906 (BRHEAM, 1989, p.128)

Os experimentos de Lenard esclareceram a identidade das partículas fotoelétricas, mas também demonstraram que algumas propriedades eram difíceis de entender, pois à medida que tal fenômeno era analisado, era possível constatar comportamentos contraditórios em relação à física clássica, conforme veremos a seguir (SOARES, 2016).

Retomando o experimento típico do efeito fotoelétrico, conforme representado na Figura 4, Lenard mediu a corrente elétrica variando apenas o potencial elétrico entre os eletrodos de metal, porém mantendo todos os outros parâmetros fixos e percebeu que à medida que o valor do potencial torna-se ligeiramente negativo, a corrente elétrica vai reduzindo sua intensidade verificada no amperímetro. Quando o valor aferido pelo amperímetro atingir zero, os elétrons de maior energia ejetados pelo fotocátodo (placa emissora) serão detidos pouco antes de chegar à placa receptora. O potencial envolvido nesta situação é chamado de potencial de corte (V_{corte}). O Gráfico 1 mostra o resultado do valor da corrente elétrica em relação ao potencial.

Gráfico 1: Dependência da corrente elétrica em função do potencial elétrico



Fonte: produção do autor

A energia cinética máxima (K_{max}) dos elétrons freados é dada por:

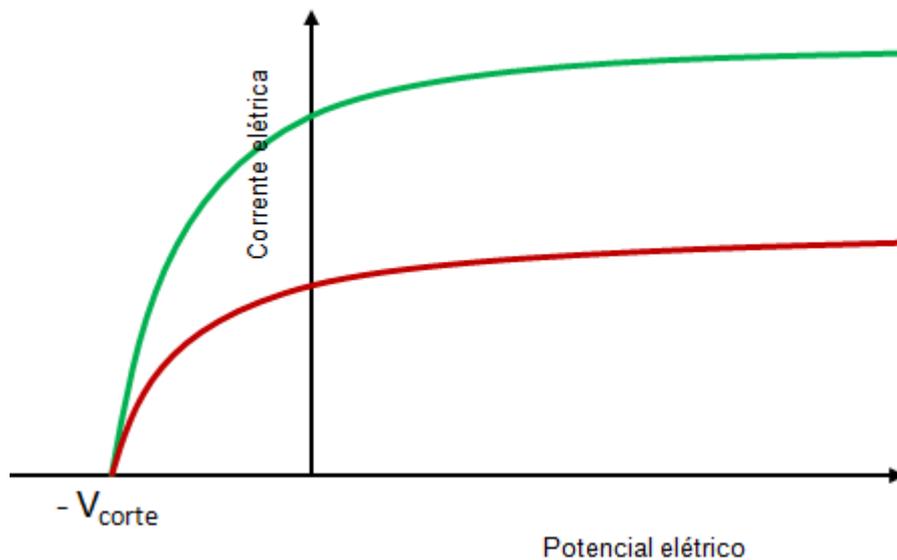
$$K_{max} = eV_{corte} \quad (1)$$

Onde e é a carga elementar (ou carga do elétron).

A Equação 1 nos mostra que a energia cinética máxima dos elétrons ejetados é proporcional ao valor do potencial de corte. Isso significa que podemos medir o valor da energia cinética máxima dos elétrons ejetados apenas analisando o valor de V_{corte} .

Os experimentos mostram que a intensidade da luz que incide no alvo com determinadas frequências não altera o valor do potencial de corte, quer o alvo iluminado por luz ofuscante, quer iluminado por uma luz mais intensa, a energia cinética máxima dos elétrons ejetados tem sempre o mesmo valor, contanto que a frequência da luz permaneça a mesma (HALLIDAY, 2009). O Gráfico 2 mostra o comportamento da corrente elétrica quando o alvo é iluminado por fontes de intensidades diferentes. A linha verde representa uma intensidade alta e a linha vermelha representa uma intensidade baixa da radiação incidente. Observe que o potencial de corte é o mesmo nas duas situações, por isso, verificando-se a Equação 1, conclui-se que o valor de K_{max} é igual nos dois casos. Então, podemos dizer que a energia com que o elétron é arrancado do metal não depende da intensidade da radiação incidente.

Gráfico 2: Dependência da corrente elétrica em relação ao potencial elétrico para duas intensidades distintas da mesma frequência.

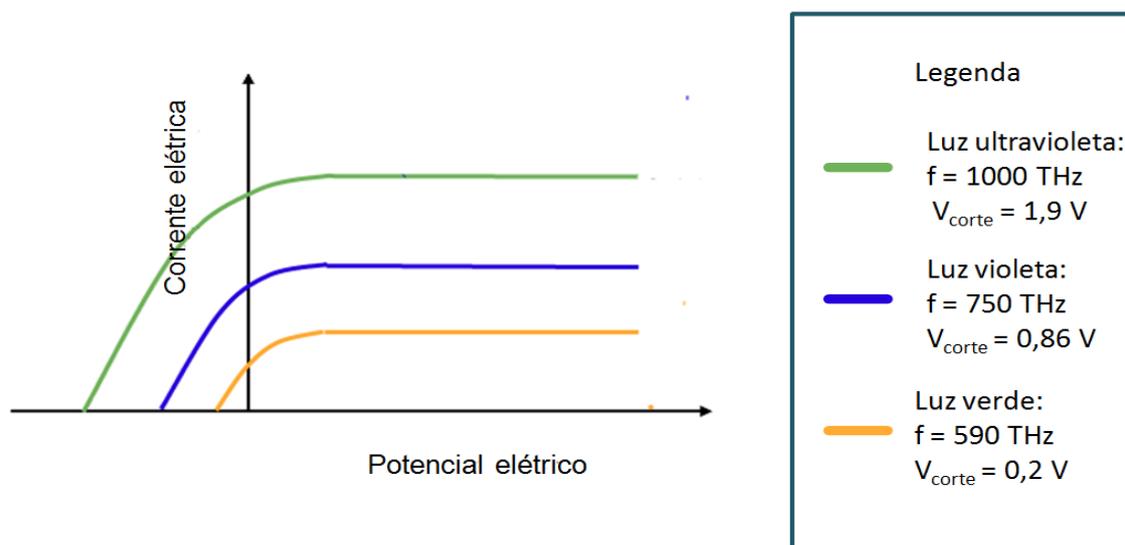


Fonte: produção do autor

Tal resultado experimental não pode ser explicado pela física clássica. De acordo com o eletromagnetismo clássico, a luz, assim como o ultravioleta são ondas eletromagnéticas e por isso o campo elétrico associado exerce uma força sobre os elétrons do alvo, o que causaria uma vibração nos mesmos na mesma frequência da onda. A amplitude de vibração dos elétrons deveria ultrapassar certos valores que os ejetam da superfície do metal alvo. Dessa forma ao aumentar a intensidade da onda, estamos também aumentando a amplitude, por isso os elétrons deveriam ser arrancados com maior energia, porém, isso não ocorre. Para uma dada frequência, a energia máxima dos elétrons emitidos pelo alvo é sempre a mesma independente da intensidade da luz incidente.

O segundo experimento consiste em medir o potencial de corte para várias frequências (f) da luz incidente mantendo as intensidades iguais. O Gráfico 3, mostra a disposição da corrente elétrica em relação ao potencial, quando o alvo (ou fotocátodo) é um metal alcalino, como por exemplo o potássio (onde o efeito fotoelétrico ocorreria com a luz visível, porém não ocorreria com a luz infravermelha). Observe que o potencial de corte muda de valor à medida que se aumenta a frequência da onda eletromagnética incidente.

Gráfico 3: Experiência da corrente x potencial para diferentes tipos de ondas eletromagnéticas incidentes em um alvo de potássio.



Fonte: produção do autor (dados baseados a partir da simulação)

Outra informação extraída destes dois experimentos é que cada substância utilizada para ser o alvo terá um potencial de corte diferente, sendo esta grandeza uma característica do material utilizado (INSTITUTO DE FÍSICA DA UFBA, 2020).

Conforme a Equação 1 e pela conservação da energia, a energia cinética máxima dos elétrons deve corresponder a energia fornecida pela onda eletromagnética (E) menos o trabalho (ϕ) necessário para extrair um elétron da superfície contra a força atrativa da carga positiva remanescente no material do alvo. O ϕ é chamado de função trabalho e depende do tipo de material. Logo a Equação 2, nos diz que:

$$K_{max} = E - \phi \quad (2)$$

De acordo com a teoria eletromagnética clássica, uma onda eletromagnética transporta energia, que é proporcional à intensidade da onda, independente de sua frequência. Assim, esperaríamos que à medida que a intensidade aumentasse, aumentaria também o valor de E na equação 2,

porém o aumento da intensidade apenas aumenta o valor da corrente elétrica (ver Gráfico 2).

Ainda analisando o resultado contido no Gráfico 1, percebe-se que a variação da Intensidade não altera o valor do V_{corte} , e como consequência não deve alterar a energia cinética dos elétrons (ver equação 1) e consequentemente suas velocidades. Se a velocidade dos elétrons arrancados não aumenta com o aumento da intensidade, então o aumento da corrente elétrica registrada no amperímetro é decorrente do acréscimo de elétrons arrancados. Logo, os experimentos mostram que o aumento a intensidade provoca um aumento de elétrons ejetados. Contudo, a dependência da energia cinética máxima dos elétrons arrancados e do potencial de corte com a frequência da radiação incidente, não possuem explicação pela física clássica.

Outra propriedade que está em desacordo com a teoria clássica é a ausência de um atraso mensurável entre os instantes em que a fonte luminosa é ligada e a emissão dos elétrons. Na teoria, pode-se ajustar a intensidade da fonte, de maneira que os elétrons gastem um tempo da ordem de minutos ou até de horas, já que a radiação se distribui continuamente e incide na placa homogeneamente. O átomo (por ser pequeno) demoraria certo tempo para absorver energia suficiente para a ejeção dos elétrons. Mas, a observação experimental mostra que em todos os casos, os elétrons são arrancados assim que a fonte é ligada.

Em 1902, Lenard obteve os seguintes resultados após medições cuidadosas:

- A energia cinética $(m/2)v^2$ dos fotoelétrons depende exclusivamente do comprimento de onda da luz incidente, não de sua intensidade!
- O número de fotoelétrons ejetados é proporcional à intensidade da luz.
- Não há atraso mensurável entre a irradiação e a ejeção do elétron.

(DEMTRÖDER, 2010, p 89)

Num trabalho em 1905, Albert Einstein propôs uma teoria do efeito fotoelétrico baseada numa extensão das ideias de Planck sobre quantização dos osciladores harmônicos presentes na emissão da radiação do corpo negro. O corpo negro ideal pode ser entendido como uma cavidade com um pequeno

furo, pois a probabilidade de um raio que entra nela torne a sair, antes de ser absorvido pelas paredes é muito pequena (TIPLER, 2001).

O equilíbrio térmico da radiação no interior da cavidade ocorre através de trocas de energia entre a radiação e os átomos das paredes, à temperatura T , os átomos absorvem e reemitem a radiação. O modelo clássico para absorção e emissão de radiação eletromagnética de frequência f por um sistema de cargas (átomo) é que as cargas oscilem com essa frequência.

(NUSENZVEIG, 2002, p 247)

A emissão da energia do corpo negro podia ser expressa pela teoria clássica em concordância com os resultados experimentais, porém não possuía serventia para pequenos comprimentos de onda, pois nesse caso a densidade de energia tende ao infinito. No entanto, seu valor tende a zero para pequenos comprimentos de onda, de acordo com os resultados experimentais. Tal discrepância foi chamada de catástrofes do ultravioleta (TIPLER, 2001).

Para resolver esse problema, Planck realizou algumas hipóteses. Sugeriu que a energia das cargas oscilantes não era uma variável contínua, que na verdade deveria ser considerada como uma variável discreta, ou seja, capaz de assumir valores $0, E, 2E, \dots, nE$, onde n é um valor inteiro. Além disso, teve que assumir que a energia dependia da frequência dos osciladores e conseqüentemente à frequência da radiação. Logo, a energia ser dada por:

$$E_n = nE = nhf \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

Onde h é conhecida hoje como a constante de Planck ($6,67 \cdot 10^{-34}$ J.s) e f a frequência da radiação.

A teoria proposta por Einstein para o efeito fotoelétrico admite que a quantização da energia proposta por Planck é uma característica universal da luz, ou seja, a luz é constituída por quanta isolados de energia hf . Hoje chamamos estes quanta de fótons. Assim, a menor energia que uma onda luminosa de frequência f pode possuir é hf , a energia de um único fóton, Se a onda possui uma energia maior, esta deve ser um múltiplo inteiro de hf (HALLIDAY, 2009).

Einstein propôs ainda que sempre que a luz é absorvida ou emitida por um corpo essa absorção ou emissão ocorre nos átomos do corpo. Quando um fóton de frequência f é absorvido por um átomo, a energia hf do fóton é transferida da luz para o átomo. Esse evento de absorção envolve a aniquilação de um fóton. Quando um fóton de frequência f é emitido por um átomo, uma energia hf é transferida do átomo para a luz. Esse evento de emissão envolve a criação de um fóton. Assim, os átomos de um corpo podem emitir ou absorver fótons (HALLIDAY, 2009, p.187)

No processo fotoelétrico um quanta é completamente absorvido por um elétron contido inicialmente no fotocátodo, assumiu Einstein. Dessa forma, se a energia absorvida por um quanta for grande o suficiente, o elétron poderá vencer a força atrativa da carga remanescente. O mecanismo envolvido no processo será: $e_{\text{ligado}} + \gamma \rightarrow e_{\text{livre}}$, que significa que um elétron ligado ao núcleo atômico (e_{ligado}) ao absorver um fóton (γ) de energia bem específica se tornará um elétron livre (e_{livre}). Assim, podemos reescrever a Equação 2, como:

$$K_{\text{max}} = hf - \phi \quad (4)$$

A Equação 4 é chamada de equação de Einstein para o efeito fotoelétrico.

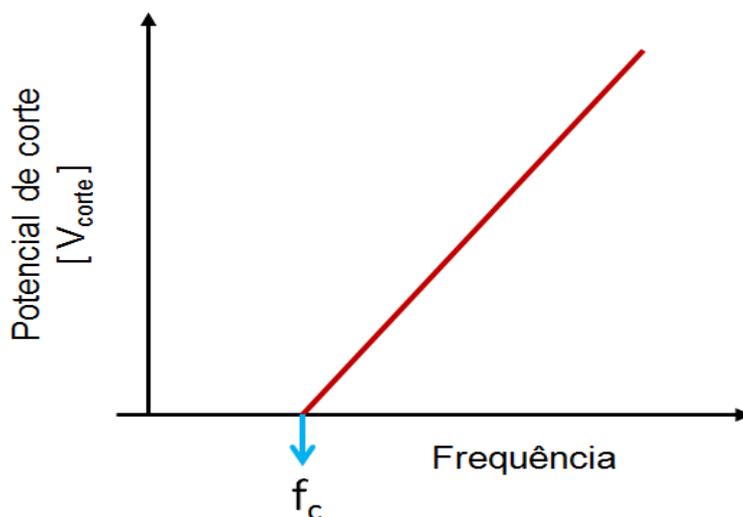
Recombinando a Equação 4 com a Equação 1, Temos:

$$eV_{\text{corte}} = hf - \phi \quad \Rightarrow$$

$$V_{\text{corte}} = \frac{hf - \phi}{e} \quad (5)$$

Este resultado nos diz que o valor do V_{corte} aumenta linearmente com o aumento da frequência da luz incidente no material. O Gráfico 4 mostra a representação da dependência linear do V_{corte} e da frequência (f).

Gráfico 4: Potencial de corte em relação à frequência



O Gráfico 4 é típico daqueles encontrados para qualquer metal e é a representação dos resultados obtidos por Millikan na confirmação da hipótese de Einstein (BREHM, 1989). Podemos observar que a inclinação da linha reta é prevista como h/e na Equação 5. Portanto, o experimento fotoelétrico pode fornecer outra determinação da constante de Planck, por um método diferente daquele abordado no problema do corpo negro. Algo muito importante a ser notado também é que, o Gráfico 4 indica uma frequência mínima abaixo da qual o efeito fotoelétrico não pode ocorrer, essa frequência limite é obtida tomando $V_{\text{corte}} = 0$ na Equação 5, onde teremos:

$$f_c = \frac{\phi}{h} \quad (6)$$

A radiação com essa frequência contém fótons com energia suficiente para liberar elétrons do metal com velocidade zero de ejeção. Radiações de menor frequência não podem produzir fotoelétrons, mesmo que sua iluminação seja de alta intensidade. Chamamos esta frequência mínima para obtenção do efeito fotoelétrico de frequência de corte (f_c). Logo, a frequência de corte é

dada pela Equação 6. A luz vermelha (assim como a infravermelha) não provoca fotoelétrons nos materiais observados, porque sua frequência é menor que a frequência de corte dos materiais.

A hipótese do fóton também consegue explicar facilmente a inexistência do tempo de retardo entre a incidência da radiação pela fonte e a emissão de elétrons do material, pois embora o número de fótons que incidem no metal por unidade de tempo seja pequeno, quando se usa uma baixa intensidade, a energia de cada fóton já será suficiente para arrancar um elétron, assim existe grande chance de que alguns fótons sejam absorvidos imediatamente, por isso logo que a fonte é ligada é possível observar elétrons emitidos.

A Tabela 1, a seguir, mostra as contradições da física clássica e a explicação coerente da física quântica a respeito do fenômeno:

Tabela 2: Comparações entre resultados experimentais e teorias clássica e quântica

| Previsões da física clássica | Resultados experimentais | Explicações com base na teoria quântica |
|---|---|--|
| A energia cinética dos elétrons aumenta com a intensidade da onda eletromagnética | A energia cinética não varia com a intensidade | A energia cinética dos elétrons depende da energia contida no fóton (ou sua frequência). A intensidade da onda está relacionada com a quantidade de fótons que viajam em direção aos elétrons. |
| A energia cinética não deverá depender de forma descontínua da frequência da onda eletromagnética | Frequências baixas não provocam o efeito fotoelétrico | A quantidade de energia do fóton deve ser maior que a função trabalho, senão o fenômeno não ocorre. A energia do fóton depende da frequência da onda eletromagnética que ele compõe. |
| Há um atraso para haver | Não há atraso | O fóton viaja na velocidade da |

| | | |
|---|-------------------------------------|---|
| emissão de elétrons, dependendo da intensidade. | perceptível na emissão de elétrons. | luz e atinge o elétron, transferindo energia necessária para ser ejetado, de forma quase instantânea. |
|---|-------------------------------------|---|

Graças à mente brilhante de Albert Einstein o efeito fotoelétrico foi explicado e sua contribuição lhe rendeu o prêmio Nobel em 1921. A descoberta e explicação de tal fenômeno nos deu capacidade de aplicá-lo em diversas situações nos dias atuais. Podemos construir dispositivos diversos com larga aplicação, por exemplo, as fotocélulas, que tem inúmeras aplicações práticas (fotômetros, controle de portas de elevadores, etc), que empregam o efeito fotoelétrico para converter o sinal luminoso em corrente elétrica (NUSSENZVEIG, 2002). Sem dúvidas, a descoberta trouxe novos olhares para a visão de uma nova ciência, mas também alcançou desenvolvimentos tecnológicos que ajudaram muitas pessoas.

3. Exposição de cada aula:

Nesta Seção, será descrito a sequência de atividades, bem como o tempo estimado para a realização de cada uma delas e dos materiais utilizados durante todo o seu procedimento.

3.1. Aula 1: Verificação dos subsunçores por meio de questionário.

A primeira aula terá como objetivo reconhecer o conhecimento prévio dos alunos. Sendo assim, teremos como:

Objetivo Geral: Reconhecer o conhecimento do discente sobre ondas eletromagnéticas e o efeito fotoelétrico. Tais conhecimentos servirão como subsunçores principais para o início do desenvolvimento da UEPS.

Objetivo Específico:

- Atribuir um questionário (Apêndice A do Produto Educacional) para que os alunos possam expor tudo que sabem a respeito de ondas eletromagnéticas e efeitos quânticos.
- Reunir os alunos para realização de debates relacionados com as respostas de cada pergunta. O professor deve mediar a discussão.
- Revisar o conteúdo teórico, caso os alunos demonstrem deficiência ou falta de consistência em suas respostas.
- Relatar todo o procedimento e analisar em que nível de aprofundamento os alunos se encontram.
- Julgar se os conhecimentos prévios estão bem estabelecidos para o desenvolvimento subsequente.

Tempo de execução de cada etapa:

- Questionário: 20 minutos.
- Discussão: 25 minutos.

O questionário serve como meio investigativo para que o professor identifique onde está o conhecimento do aluno. Nele foi possível expor conteúdos relacionados às ondas eletromagnéticas e suas características principais, conceitos que serão bem trabalhados na investigação do funcionamento do efeito fotoelétrico (como intensidade, frequência, comprimento de onda, etc). As perguntas também direcionam o professor à inspeção de algum subsunçor de física quântica, pois muitos de nós já acessamos livros, filmes, jornais, etc. que comentam o assunto de forma específica e/ou aplicada no dia-a-dia.

Como esta UEPS destina-se a estudantes do terceiro ano do ensino médio e seguindo os conteúdos vivenciados em cada ano com base na grade curricular da disciplina (BRASIL, 2002), espera-se que os alunos já tenham uma boa experiência no contexto de ondas e assim demonstrarão o que se encontra em sua estrutura cognitiva a seu respeito, a saber:

Classificação das ondas com respeito a sua natureza;

Características das ondas (comprimento de onda, frequência, velocidade de propagação, etc.);

Tipos de onda eletromagnética e sua diferença quanto a suas frequências;

Ondas eletromagnéticas emitidas pelo Sol;

Conceitos básicos de física quântica adquirida pela vivência dos alunos;

Conceitos relacionados à eletrização dos corpos.

O questionário contém sete perguntas discursivas (ver Apêndice B do Produto Educacional) utilizadas como base para o debate subsequente.

O debate (ou discussão) deverá ser realizado retomando as perguntas do questionário. Dessa forma os alunos podem discorrer em suas falas sobre cada ponto abordado anteriormente, inclusive acrescentar coisas relevantes que surjam em suas estruturas cognitivas. O professor fará o papel de

mediador neste momento, enquanto observa cada resposta e instiga ainda mais a participação de todos os participantes. Neste momento é importante deixar todos bem à vontade para responder, sem que haja a preocupação com respostas certas ou erradas, pois o mais importante é identificar os subsunçores existentes, para dar início aos passos posteriores da UEPS.

Os temas relacionados ao processo de eletrização não foram abordados no questionário, pois o assunto já é trabalhado anteriormente na sequência de conteúdos abordados no terceiro ano, tendo como base a grade curricular da disciplina, porém o mesmo pode ser questionado durante o momento da discussão, abordando o processo de eletrização por atrito e processos de carregamento e descarregamento de forma geral.

3.2. Aula 2: Experiência em vídeo:

Objetivo geral: Assistir um vídeo que demonstra o efeito fotoelétrico, que terá a finalidade de funcionar como um organizador prévio.

Objetivos específicos:

- Apresentar o fenômeno por meio de uma experiência simples;
- Estimular a discussão sobre seu funcionamento;
- Relatar todo o procedimento e analisar em que nível de aprofundamento os alunos se encontram.
- Julgar se os conhecimentos prévios estão bem estabelecidos para o desenvolvimento subsequente

Tempo de execução de cada etapa:

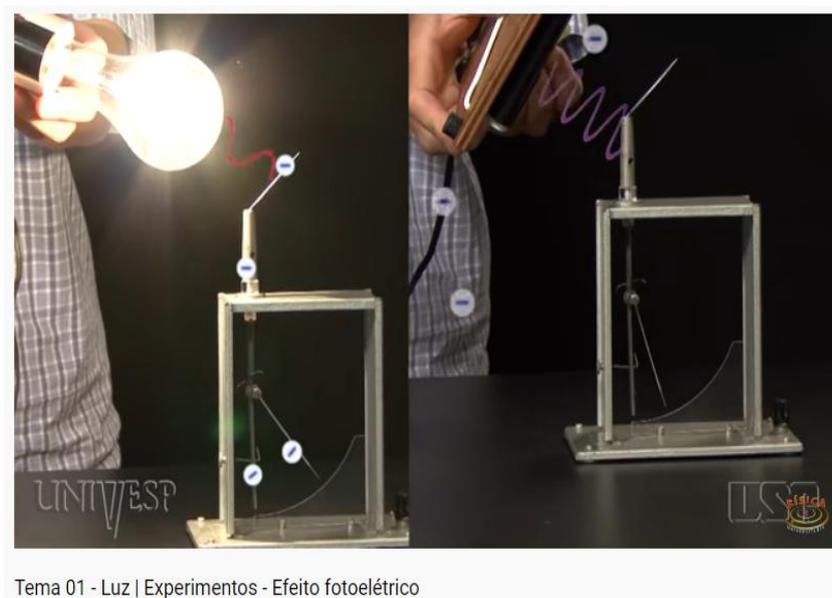
- Duração total do vídeo: aproximadamente 3 minutos
- Discussão: 25 minutos.
- Resolução de situação problema em grupo: 20 minutos

O aluno poderá registrar tudo que achar de mais interessante durante a exibição do vídeo, inclusive o mesmo pode ser exibido mais de uma vez para trazer mais compreensão.

Deve-se destacar que o vídeo será dividido em duas partes: A primeira parte será a única exibida, pois o aluno deve neste momento entender de forma geral o fenômeno, sendo assim a explicação completa do fenômeno não será compartilhada neste momento.

O vídeo aborda um experimento simples realizado com um eletroscópio e outros materiais: um canudinho de refresco, papel toalha, lâmpada incandescente de alta potência e lâmpada de vapor de mercúrio (emite radiação UV). A Figura 5P mostra a imagem de uma cena do vídeo:

Figura 3: imagem capturada da experiência do efeito fotoelétrico



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=VVka6Mp5vyA>. Acesso em 19 de jun. de 2021

O canudinho é eletrizado por atrito com o papel toalha e logo em seguida posto em contato com o eletroscópio, que também fica eletrizado com carga negativa. Quando as lâmpadas emitem sua radiação específica no eletroscópio observa-se que a emissão da lâmpada incandescente não descarrega o eletroscópio, porém aquela que funciona por meio do vapor de

mercúrio emite luz ultravioleta (UV) para que o eletroscópio se descarregue completamente.

O vídeo deve ser interrompido neste momento, para que vários questionamentos sejam feitos pelo professor aos alunos, que em grupo poderão interagir entre si para que uma discussão seja aberta. Algumas perguntas podem ser feitas:

Por que uma lâmpada de alta potência (lâmpada incandescente) não descarregou o eletroscópio?

Qual a radiação emitida pela lâmpada incandescente?

O que faz os elétrons serem arrancados do eletroscópio?

Qual a diferença entre as radiações das duas lâmpadas?

Nesta discussão os alunos irão inserir os conceitos de ondas eletromagnéticas já existentes em suas estruturas cognitivas e lembrados na aula anterior para tomar como base os questionamentos feitos na experiência.

Neste momento espera-se que os alunos analisem o descarregamento do eletroscópio como consequência da perda de elétrons do material devido à incidência de certos tipos de ondas eletromagnéticas.

Assim uma nova atividade pode ser proposta pelo professor: identificar o funcionamento das células fotoelétricas para iluminação pública. As respostas podem ser socializadas de modo que os alunos poderão perceber de maneira mais específica a aplicação do fenômeno.

3.3. Aula 3: Experiência com simulador computacional:

Objetivo geral: Utilizar um software disponível online para a realização do experimento, analisando outros parâmetros.

Objetivos específicos:

- Apresentar o software computacional
- Apontar os principais fatores no fenômeno;
- Aferir mudanças nas características do fenômeno com o auxílio do simulador;

- Observar como a frequência de uma onda eletromagnética e o tipo de material alvo, influencia no efeito fotoelétrico.
- Relatar todo o procedimento e analisar em que nível de aprofundamento os alunos se encontram.
- Julgar se os conhecimentos prévios estão bem estabelecidos para o desenvolvimento subsequente

Tempo de execução de cada etapa:

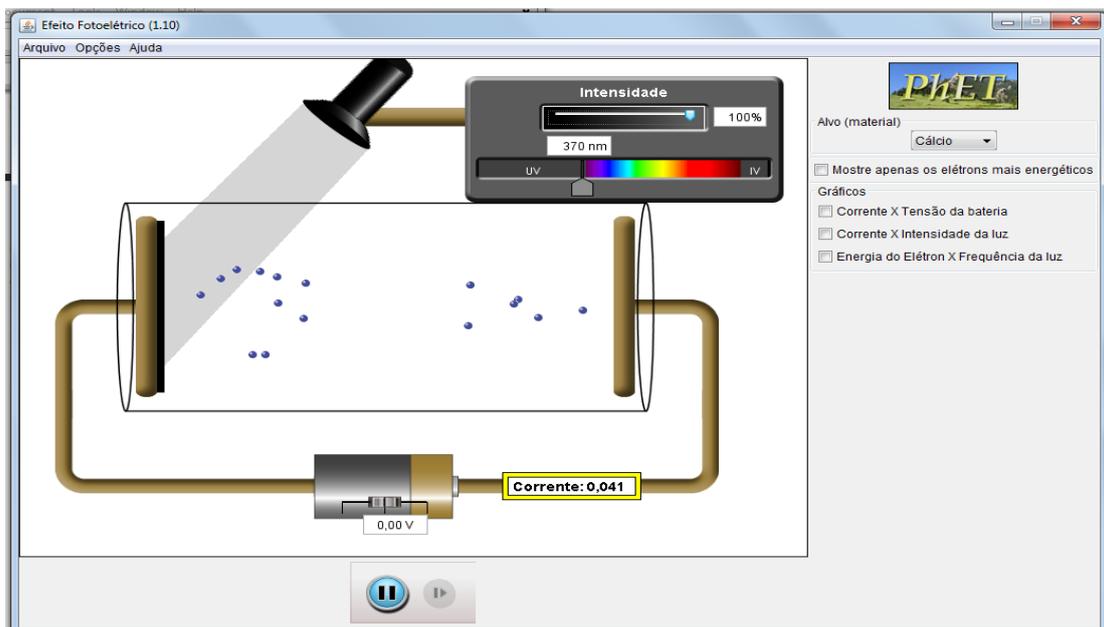
- Instruções e apresentação do simulador: 10 minutos.
- Manipulação e obtenção de resultados: 25 minutos.
- Anotação dos dados colhidos: 5 minutos.
- Discussão sobre resultados: 10 minutos.

A aplicação desta aula deve acontecer em local propício, onde haja disponibilidade do uso de computadores (de preferência com acesso a internet) e projetores. Poderá dividir os alunos em duplas ou grupos que terão acesso a um computador. O software utilizado é encontrado na plataforma do PhET, que pode ser baixado em versão Java no computador ou no próprio navegador, conforme a Figura 6P.

O simulador encontra-se disponível em:

https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric

Figura 4: imagem capturada do simulador PHET/efeito fotoelétrico



Alguns parâmetros são importantes para a manipulação dos resultados, como o valor do comprimento de onda, o tipo de alvo (material), a Intensidade da fonte de ondas e a corrente elétrica. Esses serão os parâmetros utilizados para a análise do fenômeno, porém a voltagem ficará em todos os casos fixada no valor zero. O professor deve orientar os alunos de como realizar a alteração de cada valor. O aluno irá variar o comprimento de onda (ou frequência) e analisará para um material específico qual será o resultado. O efeito fotoelétrico ocorre ou não? Para responder essa pergunta poderá aferir a corrente elétrica, inclusive seu valor irá variar com o aumento da intensidade. Neste momento o estudante poderá perceber que a retirada de elétrons é mais fácil em certos materiais e mais difícil em outros.

O estudante deve anotar tudo que for relevante nas suas observações no seu caderno. Neste momento ele irá descobrir como os fatores influenciam no efeito fotoelétrico. Na sequência o professor pedirá para os alunos usarem valores específicos em suas simulações e anotarem. Os valores sugeridos encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3: medidas dos parâmetros no efeito fotoelétrico do simulador

| Comprimento de onda | Frequência | Material | Intensidade | Corrente Elétrica |
|---------------------|-------------------------|----------|-------------|-------------------|
| 695 nm | $4,32 \cdot 10^{14}$ Hz | Sódio | 48% | 0 |
| 695 nm | $4,32 \cdot 10^{14}$ Hz | Platina | 100% | 0 |
| 483 nm | $6,21 \cdot 10^{14}$ Hz | Platina | 100% | 0 |
| 287 nm | $1,05 \cdot 10^{15}$ Hz | Sódio | 100% | 0,646 u.a. |
| 287 nm | $1,05 \cdot 10^{15}$ Hz | Sódio | 51% | 0,328 u.a. |
| 287 nm | $1,05 \cdot 10^{15}$ Hz | Cálcio | 51% | 0,162 u.a. |

O professor pode sugerir outros valores, desde que fique claro a influencia de cada parâmetro quando comparado um resultado em relação ao outro. O valor do comprimento de onda (em nanômetro = nm) foi ajustado para

o indicado na Tabela 3P, bem como o material e a intensidade, já a corrente elétrica foi registrada a partir da indicação calculada pelo próprio simulador onde a unidade associada foi arbitrária (u.a.). A segunda coluna o aluno ficará responsável em preenchê-la, tendo em vista que o simulador utiliza apenas um indicador: comprimento de onda (e não a frequência) que especifica a onda do espectro eletromagnético.

Assim, o professor irá instruí-lo a realização do cálculo da frequência em função do comprimento de onda e da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (igual a velocidade da luz). Porém, se o aluno não lembrar dessas informações, faça uma breve explicação. É interessante que o estudante note a variação do fenômeno em função da frequência, pois o mesmo fará mais sentido mais adiante da UEPS quando for introduzido o conceito do fóton.

Os alunos serão instigados a variar a frequência da radiação incidente até achar a frequência de corte, pois assim poderão analisar a ausência do fenômeno com frequências abaixo da frequência de corte e sua presença acima da frequência de corte. Por isso, o professor deve enfatizar esta análise e provocar a indagação dos alunos sobre sua importância. Além disso, deve ser discutida a possibilidade da existência de diferentes frequências de corte para materiais distintos.

A intensidade tem papel importante na experiência, mas não influencia no surgimento do efeito fotoelétrico. O professor deve mostrar isso bem nitidamente quando varia os valores de intensidade e da frequência, deixando o aluno perceber que a abaixo da frequência de corte 100% de intensidade não provoca o fenômeno, mas acima da frequência de corte, mesmo a 51% de intensidade o fenômeno ocorre.

Ao final destas análises, dedique o tempo para que os alunos interajam entre si, discutindo seus resultados e buscando possíveis respostas para questionamentos que possam surgir. Em seguida, entregue aos alunos uma lista com alguns problemas (Apêndice B do Produto Educacional), que vai estimulá-los a refletir com mais profundidade a respeito dos resultados. Analise as respostas.

3.4. Aula 4: Aula Expositiva do Efeito Fotoelétrico

Objetivo geral: Explicar o efeito foto elétrico em um nível mais alto de complexidade.

Objetivos específicos:

- Detalhar um pouco mais sobre o funcionamento do fenômeno;
- Explicar sobre a função trabalho;
- Montar a equação do efeito fotoelétrico por meio da conservação da energia do elétron.
- Discutir a ineficiência da teoria clássica em explicar os resultados experimentais.
- Relatar todo o procedimento e analisar em que nível de aprofundamento os alunos se encontram.
- Julgar se os conhecimentos prévios estão bem estabelecidos para o desenvolvimento subsequente

Tempo de execução de cada etapa:

- Tempo de duração: 45 minutos.

O professor deve montar sua aula com base nas literaturas especializadas, porém é importante lembrar que alguns tópicos ainda não serão abordados, como por exemplo a quantização da energia.

Entretanto neste momento deverá ser exposto tópicos como:

- Descrição do efeito fotoelétrico e sua aplicação;
- Mudança da frequência de corte, quando se muda o material;
- Energia cinética do elétron e a equação relacionada;
- A Teoria clássica do eletromagnetismo incapaz de responder aos resultados.

A presente aula terá finalidade de agregar tudo que o aluno vivenciou nas aulas anteriores de forma lógica e sequencial, bem mais organizada para que ele possa acessá-las em sua estrutura cognitiva. Estruture a aula de modo que se possa trabalhar bem os tópicos citados acima, tendo em vista que o aluno deve compreender o funcionamento dos equipamentos usando os conceitos trabalhados em sala de aula.

Um ponto importante na aula é o seu fechamento, pois dará abertura para a formulação da próxima aula. Questionar a causa da intensidade elevada não provocar a ejeção de elétrons e mostrar que isso está em desacordo com a teoria clássica, abre as portas para que se possa introduzir o conceito de física quântica.

Peça para que todos os alunos escrevam um pequeno texto sobre todos os principais aspectos aprendidos nessa aula e após crie um canal de discussão sobre a mesma. Analise com atenção os comentários e observe se houve algum desenvolvimento na aprendizagem significativa cumulativa destas últimas aulas, por meio de debates, comentários e respostas dos questionários.

3.5. Aula 5: Texto e vídeo sobre a quantização da energia e dualidade onda-partícula.

Objetivo geral: Compreender a dualidade onda-partícula e o significado de quantização de energia e a dualidade onda-partícula.

Objetivos específicos:

- Apresentar o vídeo do Dr. Quântico.
- Entender a ideia da dualidade onda-partícula.
- Ler o texto extraído do livro: *Alice no país do Quantum* (Anexo único).
- Entender a característica básica de um fóton e da energia que ele carrega.

- Compreender que a energia transmitida por uma onda eletromagnética é discreta e não contínua.
- Relatar todo o procedimento e analisar em que nível de aprofundamento os alunos se encontram.
- Julgar se os conhecimentos prévios estão bem estabelecidos para o desenvolvimento subsequente.

Tempo de execução de cada etapa:

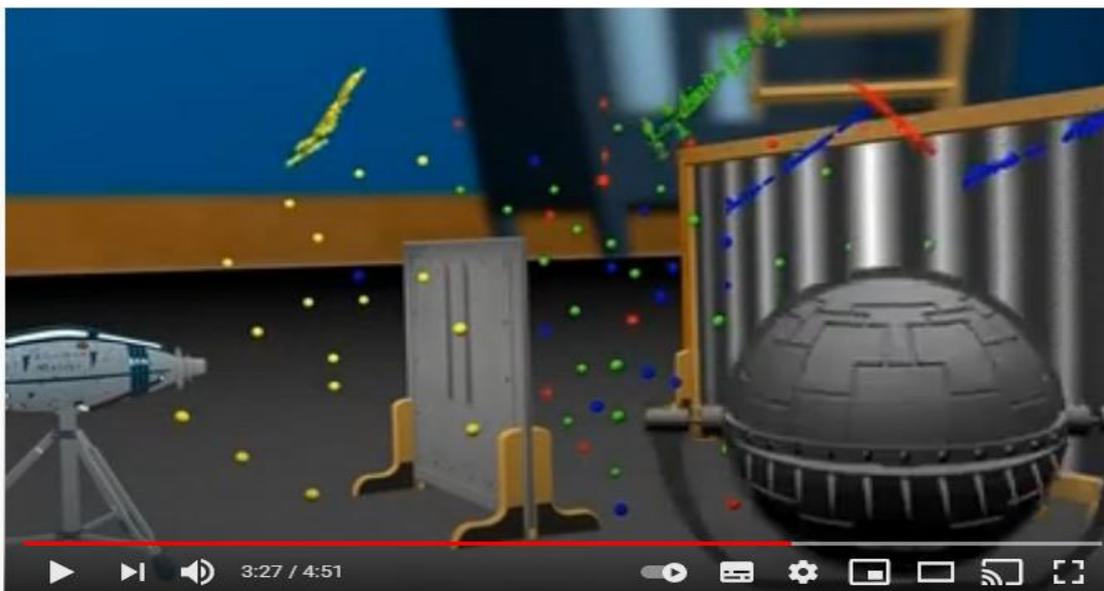
- Duração do vídeo: 5 minutos.
- Duração da leitura do texto: 20 minutos.
- Discussões e socialização: 20 minutos.

Na presente aula, os materiais vão guiar os alunos a um novo conhecimento, relacionado à física quântica. O conceito de física quântica deve-se ao comportamento de partículas de escalas bem pequenas, inconsistentes com o comportamento das partículas macroscópicas. Este conhecimento será totalmente útil para explicar a interação entre as ondas eletromagnéticas e os materiais na produção do efeito fotoelétrico.

O ponto de partida é retomar as perguntas que foram feitas no primeiro questionário sobre o que é física quântica e sua possível relação com as ondas eletromagnéticas. O professor deve retomar estes questionamentos de forma breve e observar se existem novas respostas sobre o exposto, caso exista algo que sirva de subsunção para o vídeo, deve ser destacado e em seguida liberar o vídeo: “Física Quântica (Dr. Quantum) Fenda Dupla”, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=UtPf0XYQzfl>.

O vídeo trata-se de uma animação com um personagem chamado Doutor Quântico, um cientista que propõe o experimento da dupla fenda para explicar a dualidade onda-partícula de estruturas bem pequenas da natureza, como o elétron. A Figura 7 mostra a uma cena do vídeo.

Figura 5: Captura do vídeo usado para elucidar a dualidade onda-partícula



Física Quântica (Dr. Quantum) Fenda Dupla - Dublado PT

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=UtPf0XYQzfl>. Acesso em jun. de 2021

A ideia do vídeo nesta aula é construir um organizador prévio que possa servir de base para a compreensão básica do fóton, pois embora se comporte como partícula, ele é quem forma as ondas eletromagnéticas.

Deixe os alunos refletirem sobre este assunto e em seguida sem fazer comentários, libere o texto para que seja lido por todos. O texto é um fragmento do livro *Alice no País do Quantum* (GILMORE,1998). Este livro é uma obra adaptada por Robert Gilmore, que faz uma analogia de um clássico infantil, usando um mundo muito diferente, onde os personagens são seres muito pequenos encontrados dentro de uma TV. Alice entra neste mundo quando passa magicamente pela tela de sua TV.

O fragmento do livro extraído (Anexo único) trata-se do momento quando Alice entra em um Banco e lá conversa com a gerente que lhe explica que o dinheiro com que se trabalhava naquele mundo era a energia.

Durante o diálogo fica exposto que o fóton possui energia, mas não possui massa de repouso e que forma as ondas eletromagnéticas tanto de frequências menores quanto as de frequências maiores.

Outra informação valiosa no diálogo é sobre o fato da luz ser feita de quanta, pequenos pacotes de energia, que faz o fluxo ser granulado e não constante e suave.

Em posse de tais informações, o aluno passa a entender melhor os fótons e tentará introduzir estes novos conceitos como subsunção para resolver o problema da disparidade da teoria clássica com os resultados do experimento do efeito fotoelétrico.

No final da leitura convide os alunos para discutirem suas ideias sobre o fóton. O professor deve levantar alguns questionamentos para mediar a discussão:

- O que você entendeu sobre o fóton?
- Uma onda eletromagnética é composta por fótons?
- O fóton é uma estrutura quântica?
- O fóton pode ter um comportamento dual (onda – partícula)?
- A energia de uma radiação eletromagnética é contínua ou discreta?
- O que podemos dizer sobre a energia que cada fóton carrega em relação à frequência de cada onda eletromagnética?

Os alunos irão se apropriar do conceito por trás da palavra quanta e perceber que o mundo onde coisas bem pequenas são observadas pode ser bem diferente do mundo macro que observamos e vivemos.

O professor pode conduzir os alunos a pensar sobre o efeito fotoelétrico imaginando o que pode ocorrer quando uma radiação eletromagnética, ou seja, um fóton atinge um elétron, como na estrutura cognitiva dos estudantes encontra-se a absorção de energia para que este adquira energia cinética capaz de ser arrancado do átomo, então pode-se induzir a equação da energia do elétron de forma completa.

No final, os alunos devem escrever tudo que foi adquirido de conhecimento e preencher o questionário sobre as características do fóton (Apêndice C do Produto Educacional) e o professor analisa se houve aprendizagem significativa.

3.6. Aula 6: Aula expositiva sobre a equação da energia cinética do elétron no efeito fotoelétrico

Objetivo geral: Escrever a equação em função da frequência e da constante de Planck e analisar resultados de experiências usando a teoria atual.

Objetivos específicos:

- Apresentar a Constante de Planck.
- Escrever a equação da energia de um fotoelétron em função da frequência.
- Analisar a frequência de corte a partir da equação.
- Comparar a intensidade das radiações com as fotocorrentes geradas.
- Relatar todo o procedimento e analisar em que nível de aprofundamento os alunos se encontram.

Tempo de execução de cada etapa:

- Conceitos iniciais: 10 minutos.
- Resolução de questões e Discussões: 35 minutos.

A primeira coisa a ser introduzida nesta aula é a constante de Planck e seu valor, que se relaciona com a energia de um fóton. Dentro desta perspectiva entende-se que a intensidade das radiações é o efeito da quantidade de fótons por ela inseridos. O mediador assume o compromisso de esclarecer estes tópicos e escrever a equação da energia de um elétron emitido do material no processo, em função da frequência da radiação, da constante de Planck e da função trabalho.

Em seguida o professor deve pedir para os alunos identificar a frequência de corte analisando a equação. Deve perguntar para que frequências o efeito não ocorre. Mediante as respostas dos alunos pode

direcionar a conclusão que a mesma depende da função trabalho e consequentemente do material.

Outra pergunta que pode ser feita pelo professor é sobre a influência da intensidade no efeito fotoelétrico. Observando as respostas dos alunos, pode-se iniciar uma discussão sobre as novas informações e como elas se encaixam e justificam os resultados nas experiências.

3.7. Aula 7: Questionário de avaliação dos alunos

Objetivo geral: Avaliar através de questionário o conhecimento adquirido pelos alunos.

Objetivos específicos:

- Aplicar o questionário.
- Avaliar as repostas de cada aluno.
- Verificar se houve aprendizagem significativa.

Tempo de execução de cada etapa:

- Duração da aplicação do questionário: 40 minutos.

As questões envolvidas (Apêndice D) abordarão de forma geral o fenômeno, conceitos e aplicações. Os discentes terão a oportunidade de relatar o que realmente conseguiram aprender e se houve alguma dificuldade para resolução das questões.

No final da atividade, uma revisão de todo o conteúdo pode ser ministrado pelo professor enquanto resolve todas as questões do questionário.

3.8. Aula 8: Análise do êxito da UEPS

Objetivo geral: Avaliar de forma geral a aplicação da UEPS

Alguns pontos devem ser destacados neste momento, pois é importante a relevância desta sequência. Pode-se utilizar um debate para que cada aluno expresse aquilo que ficou claro no seu aprendizado, se foi possível aplicar o que foi aprendido em problemas situações pelos discentes, inclusive deixe que eles falem se o método de ensino foi interessante ou se eles sugerem algo a melhorar (segue um modelo no Apêndice D do Produto Educacional).

Mesmo que o resultado final não seja tão satisfatório é sempre importante valorizar sinais, ainda que pequeno, de desenvolvimento de aprendizagem significativa em cada etapa da aplicação da UEPS. Não podemos desprezar a aprendizagem gradativa e sequencial.

3.9. Considerações finais:

A aplicação da UEPS é sem dúvidas um método de muito valor para a educação básica, pois ainda que inseridos em um cenário de muita dificuldade na docência, o professor pode estimular os alunos de modo que sejam mais participativos e protagonistas do seu próprio aprendizado, o que facilita a sua dinâmica e torna o conteúdo mais próximo do discente. Estimular a estrutura cognitiva dos estudantes abre a porta para que novos conhecimentos possam ter acesso e se conectem com aquilo que eles vivenciam, modificando-os mutuamente e gerando novos significados que trazem assimilação do conteúdo estudado.

4. Apêndice do Produto

4.1. Apêndice A:

Aula 1 – Questionário de conhecimento prévio (subsunções)



Nome do aluno: _____

Série/ Turma: _____ Professor (a): _____

Questão 01: O que é uma onda?

Questão 02: Onde encontramos ondas em nosso dia a dia?

Questão 03: Você já ouviu falar de ondas eletromagnéticas?

Questão 04: O que é a frequência de uma onda?

Questão 05: O que é o comprimento de onda?

Questão 06: O que é física quântica para você?

Questão 07: Você acredita que exista alguma relação entre física quântica e ondas?

4.2. Apêndice B:

Aula 3 – Problemas envolvendo a prática do simulador



Nome do aluno: _____

Série/ Turma: _____ Professor (a): _____

As perguntas a seguir são feitas tomando por base o experimento feito no simulador da plataforma PhET, cujo link encontra-se abaixo. Os parâmetros utilizados em sala de aula e a sua respectiva análise, nos dá possibilidade de responder cada questionamento.

link da simulação - Efeito fotoelétrico: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/photoelectric

Questão 01: Qual o principal fator que determinou a aparição do efeito fotoelétrico?

Questão 02: O efeito foto elétrico demonstrou diferença no comportamento quando os materiais iluminados por ondas eletromagnética eram trocados?

Sim () não ()

Questão 03: Fixando o tipo de onda eletromagnética e o material, percebe-se que a variação da intensidade causa uma alteração na corrente elétrica emitida. Explique que alteração é essa.

Questão 04: O aumento da intensidade ocasiona o aumento da energia incidente no material, Dessa forma imaginamos que mais elétrons deveriam ser arrancados do material, porém na experiência uma onda de comprimento de onda 695 nm (frequência = $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz) não consegue arrancar elétrons da platina, mesmo com intensidade 100%. Como você explicaria isso?

Tabela auxiliar para anotação de dados do experimento realizado no simulador:

| Comprimento de onda | Frequência | Material | Intensidade | Corrente elétrica |
|---------------------|------------|----------|-------------|-------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Anotações:

4.3. Apêndice C:

Aula 5 – Questionário sobre as características do fóton



Nome do aluno: _____

Série/ Turma: _____ Professor (a): _____

Questão 01: O que você entendeu sobre o fóton?

Questão 02: Uma onda eletromagnética é composta por fótons?

Questão 03: Fótons também possuem um comportamento dual (onda-partícula)?

Questão 04: A energia transmitida por uma onda eletromagnética é:

() contínua

() discreta (granulada)

Questão 05: Qual a relação que existe entre a energia que o fóton carrega e o tipo de onda eletromagnética?

4.4. Apêndice D:

Aula 7 – Questionário de avaliação final



Nome do aluno: _____

Série/ Turma: _____ Professor (a): _____

Questão 01: Por que a teoria clássica não explicava a experiência do efeito fotoelétrico?

Questão 02: Uma radiação com alta intensidade possui:

- a) muitos fótons.
- b) poucos fótons.
- c) frequência alta.
- d) frequência baixa.

Questão 03: As ondas de infravermelho podem realizar efeito fotoelétrico?

() sim () não

Questão 04: Justifique a respostas da questão 03.

Questão 05: Quais os fótons que possuem mais energia: Luz visível ou Ultravioleta?

Questão 06: Fótons com maior energia serão aqueles cujas ondas terão maior:

- a) intensidade.
- b) comprimento de onda.
- c) frequência.
- d) velocidade.

Questão 07: Sobre o efeito fotoelétrico, marque a alternativa correta:

- a) O efeito fotoelétrico depende apenas da intensidade da radiação incidente sobre a placa metálica.
- b) Não há frequência mínima necessária para a ocorrência desse fenômeno.
- c) A frequência de corte é fruto da razão entre a função trabalho e a constante de Planck.
- d) A energia cinética dos fotoelétrons é diretamente proporcional ao comprimento de onda da radiação incidente.

Questão 08: Qual a frequência de corte do Cálcio, sabendo que sua função trabalho é 2,9 eV? (dado: carga do elétron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

Questão 09: Qual a energia de um elétron liberado por uma placa de Cálcio quando recebe uma radiação de ultravioleta (UV) de frequência $1,2 \cdot 10^5$ Hz?

Questão 10: Cite aplicações do efeito fotoelétrico que você já vivenciou.

4.5. Apêndice E:

Aula 8 – Relatório final da UEPS



Nome do aluno: _____

Série/ Turma: _____ Professor (a): _____

01. Faça um relato do que você compreendeu nessas aulas.

02. Você teve dificuldades em fazer as questões da avaliação final?

03. Você consegue compreender o funcionamento de alguns fenômenos envolvendo o efeito fotoelétrico após estas aulas?

04. O que você achou de proveitoso nessas aulas sobre radiações e efeito fotoelétrico?

05. Quais os pontos a melhorar nessa sequência didática?

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

BREHM, J. J. e MULLIN,W.J. **Introduction to the structure of matter**, University of Massachusetts, Wiley, 1989.

DEMTRÖDER, D. **Atoms, Molecules and Photons**. Springer-VerlagBerlin Heidelberg, 2010

EISBERG, R. M. **Fundamentals modern physics, University of California**, Wiley, 1961

FÍSICA UNIVERSITÁRIA, 2021. "*Tema 01 - Luz | Experimentos - Efeito fotoelétrico*". Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=VVka6Mp5vyA>>. Acesso em junho de 2021.

GILMORE, R. Alice no País do Quantum. Rio de Janeiro, Zahar,1998.

GRUPO MODULAÇÃO Ω , 2021. "*Física Quântica (Dr. Quantum) Fenda Dupla - Dublado PT*". Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=UtPf0XYQzfl>>. Acesso em junho de 2021.

HALLIDAY, D. ;RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, vol 4. 8. ed. Rio de Janeiro, LTC,2009.

HALLWACHS, W. Ueber den Einfluss des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper. Annalen der Physik. **269**, 2, 1888.

INSTITUTO DE FÍSICA DA UFBA. Departamento de Física do Estado Sólido. Disponível em: <<http://www2.fis.ufba.br/dfes/estrutura1/roteiros/Fotoeletrico.pdf>>. Acesso em junho de 2020.

LOGICAL CLASS, 2021. The modern system that utilizes artificial intelligence to transform your educational processes. Disponível em: <<https://www.logicalclass.com/contant/view/1872>>. Acesso em: janeiro de 2021.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física básica**, vol 4 ,4ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2002

PhET. **Physics Education Technology**. Disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/photoelectric>. Acesso em junho de 2021.

PIRES A. , DALT S. D. , **Raios Catódicos**, Porto Alegre, ed Evangraf, 2011, Disponível em: <http://www.ufrgs.br/sead/servicos-ead/publicacoes-1/pdf/Raios_Catodicos.pdf>. Acesso janeiro de 2021.

SOARES, Joana Menara Souza. Análise da História do Efeito Fotoelétrico em Livros Didáticos de Física para Graduação. Campina Grande, PB: Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual da Paraíba, 2016.

TIPLER, P.A., LLEWELLYN, R.A. Física Moderna. 3. Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2001.

TIPLER, P. A., MOSCA, G. Física para cientistas e engenheiros, v.3. Rio de Janeiro, LTC, 2006.

Anexo A:

Aula 5 - Texto didático

O texto a seguir foi extraído do livro: Alice no País do Quantum de Robert Gilmore, 1ª Ed, 1998, página 20.

"Nós trabalhamos com energia aqui no Banco", continuou a Gerente, "porque aqui no País do Quantum, energia funciona como se fosse dinheiro. Assim como você dá nomes como reais ou dólares ao seu dinheiro, nós chamamos a unidade de energia mais usada aqui de eV . A quantidade de energia de uma partícula é o que determina aquilo que ela é capaz de fazer. A velocidade em que pode ir, o estado que pode ocupar, o quanto ela afetará outros sistemas, tudo isso depende da energia que a partícula possui.

"Nem todas as partículas são completamente destituídas de energia, como estas que estão na fila. Muitas delas têm suficiente energia própria e, nesse caso, conseguem mantê-la pelo tempo que quiserem. São elas que você deve ter visto andando lá fora. Toda partícula que necessita de uma massa, precisa ter energia suficiente para sustentar sua existência."

Ela apontou para outro aviso emoldurado na parede, que dizia:

Massa é Energia. Energia é Massa

"Se uma partícula quiser possuir massa, ela deve achar energia para sustentar essa massa. Se sobrar alguma energia, ela poderá ser usada para outras coisas. Nem todas as partículas se importam com massa. Há algumas "free-and easy", partículas boêmias que não têm qualquer massa de repouso. Elas não são limitadas como a maioria, que precisa se virar para conseguir sua massa e por isso podem fazer uso até mesmo de pequenas quantidades de energia. Fótons são um bom exemplo. Um fóton não tem massa de repouso. Por isso, um fóton em repouso não pesa absolutamente nada. Mas veja bem, fótons não são encontrados em repouso, normalmente; eles estão sempre

correndo por aí, à velocidade da luz, pois é deles que a luz é feita, entendeu? A luz não é um fluxo constante e suave. Ela é feita de um monte de quanta, pequenos pacotes de energia, o que faz com que o fluxo seja granuloso. Esses quanta, ou partículas de luz, são chamados fótons. Quase tudo é feito de quanta de algum tamanho. É daí que vem o nome da física quântica. Veja todos esses fótons saindo do Banco agora. Os fótons são todos basicamente o mesmo, exatamente um como o outro, assim como os elétrons também são o mesmo, mas você pode notar que muitos deles são bem diferentes. Isso é porque eles possuem diferentes quantidades de energia. Alguns têm muito pouca energia, como aqueles fótons de radiofrequência que estão saindo agora."

Alice olhou para uma multidão de fótons que passava por ela, fluindo em volta de seus pés e saindo pela porta. Enquanto saíam, ela ouviu fragmentos de música, vozes empostadas e alguma coisa sobre "almoçar numa quinta-feira". "Eu não sabia que ondas de rádio eram feitas de fótons", confessou Alice. "Oh, sim. Elas são. Elas são fótons com um comprimento de onda bem grande, de baixa frequência e bem pouca energia. Elas andam em grupos, pois para terem efeitos perceptíveis é preciso um monte de uma vez. São figurinhas muito simpáticas, não são?", sorriu a companheira de Alice. "Já os fótons visíveis, aqueles que fazem a luz que as pessoas usam para enxergar, têm uma frequência maior e mais energia. O efeito de um deles pode ser bem perceptível. Os mais abastados, os grandes gastadores, são as ondas de raios X e os fótons gama. Cada um deles, transporta muita energia e consegue fazer com que sua presença seja notada no ambiente, se decidirem interagir."