



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA NATUREZA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

**SEQUÊNCIA DIDÁTICA SOBRE O EFEITO FOTOELÉTRICO
BASEADO NOS TRÊS MOMENTOS PEDAGÓGICOS**

Prof. Isaías Fernandes Gomes
Profa. Bianca Martins Santos

Outubro - 2021

Apresentação

Caro professor (a),

É com grande satisfação que apresentamos a “Sequência didática sobre o efeito fotoelétrico baseado nos três momentos pedagógicos” com o intuito de orientar todos os passos que compõem uma proposta de ensino fundamentada na teoria dos Três Momentos Pedagógicos. Esta publicação é fruto do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), vinculada a Sociedade Brasileira de Física (SBF), polo 59, da Universidade Federal do Acre (UFAC).

Este material foi planejado para introduzir as discussões de Física Moderna no terceiro ano do Ensino Médio, a partir do estudo do Efeito Fotoelétrico. Vale ressaltar que, na elaboração da proposta, escolhemos essa série escolar por ser este o momento em que, formalmente, os alunos conhecem os conceitos básicos de eletricidade bem como seu formalismo matemático.

Sabemos que nós professores somos mediadores do processo de ensino aprendizagem, por isso você poderá fazer as alterações nessa proposta de ensino que forem pertinentes ao seu ambiente e público, sem desfocar do objetivo principal que é ensinar o Efeito Fotoelétrico.

Esperamos que os colegas utilizem esse material com o mesmo entusiasmo e vibração com que o desenvolvemos. Nos colocamos à disposição para eventuais dúvidas que possam surgir na tentativa da aplicação.

Prof. Isaias Fernandes Gomes¹ e Profa. Bianca Martins Santos²

¹isaias.fisica14@gmail.com; ²bianca.santos@ufac.br

Sumário

Introdução	3
Abordagem Metodológica Dos Três Momentos Pedagógicos	3
1º Momento: Problematização Inicial	5
Aulas 1 e 2: Apresentação de situações problemas sobre o Tema.....	5
2º Momento: Organização do Conhecimento.....	12
Aulas 3, 4 e 5: Sistematização do conhecimento feita pelo professor	12
Conceitos físicos abordados	12
Aula 6: Demonstração experimental com Relé Fotoelétrico.....	22
Aulas 7 e 8: Simulação computacional do Efeito Fotoelétrico	24
Roteiro Experimental Virtual.....	25
3º Momento: Aplicação do Conhecimento	29
Aulas 9 e 10: Atividades de avaliação	29
Questionário Avaliativo.....	30
Referências	33
Apêndice – Slides	34

Introdução

O mundo em que vivemos está repleto de tecnologias, na forma de processos ou produtos tecnológicos. Os conceitos da Física Moderna estão presentes em praticamente todos esses processos e produtos, sendo assim, faz-se importante o ensino de Física Moderna nas escolas, uma vez que essa área nos ajuda a compreender fenômenos ligados a situações vividas pelos educandos, tanto de origem natural quanto tecnológica.

Valadares e Moreira (1998) afirmam que é de extrema importância que o aluno do ensino médio conheça os fundamentos da tecnologia atual, já que ela atua diretamente em sua vida e certamente definirá o seu futuro profissional. Daí a importância de se introduzir conceitos básicos de Física Moderna e, em especial, de se fazer uma ponte entre a física da sala de aula e a física do cotidiano.

Diante da importância do estudo da Física Moderna, foi escolhido o Efeito Fotoelétrico na perspectiva de facilitar o aprendizado do aluno. Uma vez, que esse produto pode ser utilizado de forma contextualizada, relacionando-se esse fenômeno com algumas aplicações tecnológicas vivenciadas pelos alunos no seu dia a dia.

A sequência didática é proposta baseada na aplicação dos Três Momentos Pedagógicos (3MPs) com o objetivo de colaborar com a inserção de alguns conceitos da Física Moderna através do Efeito Fotoelétrico, proporcionando um ambiente de atividades em que os alunos possam entrar em contato com contextos relacionados ao seu cotidiano

Os Três Momentos Pedagógicos (DELIZOICOV, ANGOTTI e PERNAMBUCO, 2002) são caracterizados através: Problematização Inicial, Organização do Conhecimento e Aplicação do Conhecimento.

Abordagem Metodológica Dos Três Momentos Pedagógicos

A sequência de atividades didáticas, apresentada de forma resumida no Quadro 1, está relacionada à aplicação dos Três Momentos Pedagógicos (3MPs), especificamente para o ensino do Efeito Fotoelétrico. Esta deve ser utilizada para desenvolver os objetivos esperados, através do planejamento articulado entre o professor e a coordenação pedagógica da escola, nela encontram-se os passos necessários para estabelecer os 3MPs.

Quadro 1 - Síntese das Etapas dos Três Momentos Pedagógicos no Ensino do Efeito Fotoelétrico

Etapa	Proposta de atividades	Tempo
Problematização	<p>1) Como funcionam, para acender e apagar, as lâmpadas dos postes de iluminação pública da sua cidade?</p> <p>- Leitura investigativa: reportagem sobre “Iluminação pública”; Debate sobre como o problema pode ser resolvido.</p> <p>2) Você já entrou em lugares onde as portas se abrem automaticamente mediante certos dispositivos? Qual a explicação do funcionamento desses dispositivos?</p> <p>- Leitura investigativa: reportagem sobre “Benefícios da utilização de Portas Automáticas”.</p>	2 aulas (100 min)
Organização do Conhecimento	<p>- Apresentar aos alunos a Biografia de Max Planck bem como a sua teoria de Radiação de corpo negro;</p> <p>- Aula expositiva sobre os conceitos de física moderna: determinação da constante de Planck e o efeito fotoelétrico;</p> <p>- Demonstração de um circuito com relé fotoelétrico;</p> <p>- Contextualização: aplicações do efeito fotoelétrico no cotidiano</p> <p>- Utilizar textos, vídeos, manuais, reportagens e etc;</p> <p>- Simulação computacional do Efeito Fotoelétrico;</p>	6 aulas (300 min)
Aplicação do Conhecimento	<p>- Construção de texto sobre o efeito fotoelétrico;</p> <p>- Elaboração do Relatório da atividade experimental.</p> <p>- Questionário avaliativo.</p>	2 aulas (100 min)

Fonte: Próprio autor

A seguir serão descritas como as atividades foram desenvolvidas durante as aulas para aplicação desse produto educacional.

1º Momento: Problematização Inicial

Aulas 1 e 2: Apresentação de situações problemas sobre o Tema

Objetivos

- Apresentar situações reais que estão presentes no dia a dia do aluno e que envolvam o fenômeno do Efeito Fotoelétrico;
- Estimular os alunos a debater o que sabem e o que entendem das situações apresentadas.

Procedimentos

Para iniciar a etapa da problematização o professor deverá dividir os alunos em pequenos grupos, de preferência de no máximo três integrantes, e lança a seguinte situação problema:

Problema 1: Todos os dias ao cair da tarde as lâmpadas dos postes de iluminação públicas da nossa cidade são acesas, e pela manhã elas são apagadas. Diante disso, vocês sabem como funciona o acender e apagar das lâmpadas dos postes de iluminação públicas?

Solicite que os pequenos grupos elaborem uma explicação para questão levantada. Depois de alguns minutos peça para que socializem suas respostas. Após a socialização das respostas do primeiro problema, apresente o segundo problema e repita o mesmo procedimento.

Problema 2: Você já entrou em lugares onde as portas se abrem automaticamente? Qual a explicação do funcionamento desses dispositivos

Após os debates e argumentações dos alunos para responderem as situações problemas propostas, apresente os textos 1 e 2 para a leitura e discussão na sala de aula, esses textos foram planejados com a finalidade de explorar ainda mais o assunto abordado inicialmente, sendo eles parte integrante para completar a etapa de problematização.

Texto 1: Reportagem sobre o uso de lâmpadas LEDs na iluminação pública da cidade de Belo Horizonte – MG.



cadastro | dúvidas | fale conosco | links | mapa do site

Busca: ok

Assunto: Panorama Nacional

08.05.19/ Belo Horizonte quer repassar economia com iluminação pública para população

Minas Gerais – Projeto de lei proposto prevê a redução de 10% na Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública paga pelos contribuintes

BrunoLavorato/BHIP

Debora Anibolet, para o Procel Info

Minas Gerais – Os moradores de Belo Horizonte poderão ter uma redução de 10% na taxa de Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública (CCIP). A cobrança, que é embutida na conta de energia, foi alvo de um projeto de lei ([PL 696/19](#)) proposto pelo Executivo do município. A redução do valor é referente ao resultado do início do projeto de [modernização da iluminação pública da capital mineira, que vem sendo realizado](#)



[desde 2017](#). Após verificar redução nos gastos, a prefeitura decidiu repassar a economia para os munícipes. Atualmente, o projeto está em tramitação na Câmara de Belo Horizonte, já tendo sido aprovada por comissões da casa e aguardando votação no plenário, ainda sem data definida. A expectativa da prefeitura é pela aprovação da proposta e, tão logo isso aconteça, a redução deverá ser repassada aos contribuintes.

Esta é a primeira iniciativa do tipo realizada até o momento no país. O recolhimento da CCIP pelos municípios é previsto por uma emenda constitucional de 2002, que permite que as prefeituras determinem também a base de cálculo da taxa, usada para o custeio dos gastos com iluminação pública. O valor é cobrado pela distribuidora de energia local e repassado para o município. No caso de Belo Horizonte, o governo optou por realizar

uma Parceria Público-Privada (PPP) para a manutenção do serviço, visando promover a ampliação e efficientização energética da rede, a diminuição da taxa de falha e do tempo de atendimentos aos chamados de emergência.

Dessa forma, foi programada a modernização do parque de iluminação pública da cidade – que corresponde a 180 mil pontos – com a realocação e a instalação de novos pontos de iluminação, e substituição de lâmpadas de vapor de sódio por luminárias com a tecnologia LED. Além disso, também está prevista a instalação de um sistema de telegestão para controle das luminárias, que permitirá o acionamento remoto, controle da iluminação, medição do consumo de energia e identificação de falhas, permitindo maior rapidez no reparo dos equipamentos.

Com a substituição das lâmpadas convencionais por lâmpadas de LED, prefeitura de Belo Horizonte prevê uma economia mínima de 45% no consumo de energia elétrica

“Pretende-se, com essa iniciativa, antecipar aos contribuintes as reduções do consumo e do custo de manutenção do sistema de iluminação pública verificadas até o momento, decorrentes das medidas de gestão implementadas pelo Poder Executivo a partir de 2017,

como a substituição das lâmpadas convencionais por lâmpadas de LED”, afirma o prefeito da cidade, Alexandre Kalil, na justificativa do projeto.

Segundo a BHIP, empresa responsável pela execução do projeto, atualmente o trabalho está chegando à marca de 50%, gerando uma economia de 54% do consumo de energia desses pontos. Com a conclusão do projeto, previsto para 2020, a prefeitura espera uma redução mínima de 45% do consumo de energia utilizada para iluminação da cidade. Em termos financeiros, a estimativa é de que sejam economizados R\$ 25 milhões na conta de iluminação pública do município.

Por determinação da prefeitura, o trabalho foi iniciado pelas áreas mais populosas da cidade, com menores níveis de renda ou que apresentassem maiores índices de ocorrência de crimes e acidentes automobilísticos. Dessa forma, além da economia, a prefeitura espera que a modernização do sistema auxilie na segurança das vias e espaços públicos e permita a prestação de um serviço mais eficiente à população.

Projeto-piloto

O projeto de modernização da iluminação pública de Belo Horizonte recebeu aporte de R\$ 400 milhões da BHIP. Além de implementar o sistema, a empresa também ficará responsável pelos serviços de manutenção. O retorno do investimento será o pagamento de R\$ 1 bilhão ao longo dos 20 anos de duração do contrato. De acordo com o diretor de Engenharia e Tecnologia da BHIP, Marcelo Menegatto, a escolha da iluminação de LED foi

determinada pelas opções de adaptação que a tecnologia oferece, e por ser considerada mais eficiente, com taxa de falha girando em torno de 1%, contra 6% das unidades que utilizam vapor de sódio. A tecnologia ainda oferece vantagens do ponto de vista ambiental, por utilizarem material não contaminante.

“Basicamente as luminárias LED iluminam melhor, são mais modernas, econômicas e têm durabilidade três vezes maior que as atuais lâmpadas de vapor de sódio. As atuais lâmpadas de vapor de sódio apresentam tonalidade alaranjada (temperatura de cor baixa),

gastam mais energia elétrica e iluminam menos por diversos fatores. Um deles é que, em um curto espaço de tempo, elas perdem quase 60% do seu fluxo luminoso original. As luminárias LED são, no mínimo, 45% mais econômicas e permitem a adoção de temperatura de cor adequada à cada ambiente urbano. A luz na cor ‘branco neutro’, semelhante à da Lua, foi a escolhida para modernização das vias de Belo Horizonte”, explica Menegatto.

O diretor de Engenharia e Tecnologia da concessionária destaca ainda que o projeto é pioneiro devido, principalmente, ao curto espaço de tempo em que está sendo realizado – cerca de 3 anos – e cita como exemplo, o caso da cidade de Los Angeles, nos Estados Unidos, onde um trabalho semelhante foi realizado, mais em um período relativamente maior, com a modernização de 210 pontos de luz em 7 anos. Marcelo Menegatto ressalta ainda que mensalmente o município tem recebido a visita de representantes de outras regiões do país, interessados em conhecer o modelo adotado em Belo Horizonte.

Capital mineira é a primeira cidade do país a repassar para os moradores a redução no valor das despesas com iluminação pública

Disponível em: <https://bit.ly/3qyfxLs>

Texto 2: Fala sobre alguns benefícios sobre a utilização de porta automática em diversos ambientes com grande circulação de pessoas.

PORTAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO: 7 IMPORTANTES BENEFÍCIOS

10 de novembro de 2016



As portas automáticas de vidro é um bom exemplo de sucesso na nossa sociedade. É utilizada em diversos lugares como shoppings, edificios corporativos, aeroportos, hospitais, hotéis, casas, etc.

Porém, qual é o segredo desse sucesso? Por que uma coisa que foi inventada no século I e permaneceu esquecida durante muito tempo tornou-se tão popular na sociedade contemporânea?

Para explicar melhor, separamos 7 benefícios que tornaram as portas automáticas de vidro com sensor em um elemento indispensável.

1 – Os clientes preferem portas automáticas de vidro

Todas as pesquisas que são feitas ao respeito obtêm o mesmo resultado: os clientes preferem e avaliam positivamente a porta automática de vidro com relação às portas convencionais. Na verdade, **a porcentagem a favor é de 98.9%** de acordo a uma pesquisa realizada nos Estados Unidos.

A maioria das pessoas entrevistadas afirmaram que as portas automáticas deslizantes são fundamentais em hospitais, hotéis, shoppings e aeroportos. Além disso, pediram uma maior

presença em edifícios públicos municipais e pequenos comércios.

2 – Comodidade

O uso das portas automáticas de vidro ao invés de portas pesadas e difíceis de abrir manualmente demonstram o interesse e preocupação pela comodidade dos usuários. São tão cômodas que não é preciso usar as mãos, o que também pode **beneficiar uma grande porcentagem de brasileiros com necessidades especiais**.

De fato, de todas as comodidades possíveis, as portas automáticas de vidro são as primeiras na lista para obter-se uma experiência agradável. Todos coincidem: mostram um bom serviço ao cliente e facilitam o acesso a pessoas da terceira idade, pessoas com necessidades especiais e até para os pais com carrinhos de bebês.

3 – Imagem

A primeira impressão é fundamental e definitiva. Quando entramos em um edifício ou shopping, sempre esperamos uma porta automática de vidro instalada. Por outro lado, se nos deparamos com portas manuais, ficamos com uma impressão negativa do lugar pela baixa acessibilidade. Pensamos que não consideraram as nossas necessidades e isso para um negócio pode ser considerado um erro muito grave.

4 – Fáceis de usar e de manter

As portas automáticas são fabricadas de acordo a exigentes standartes de qualidade e segurança, oferecem uma **manutenção simples** e são fáceis de instalar em qualquer lugar. São tão simples que para utilizá-las não é necessário utilizar as mãos. Depois de instaladas, a sua gestão diária não requer grandes conhecimentos e é raro o surgimento de problemas, claro que sempre quando são bem instaladas.

5 – Economia de energia

Ultimamente este vem sendo um dos melhores benefícios das **portas automáticas** de vidro, já que a conta de luz é cada vez mais alta no Brasil. Graças aos sofisticados sensores de movimento, as portas só abrem quando realmente é necessário. Isso é fundamental para manter a temperatura do ambiente e como consequência, economizar energia.

Além disso, a velocidade de abertura e fechamento tem um papel muito importante na hora de economizar energia. Se consideramos que uma porta automática deve abrir-se sempre que seja necessário para facilitar o acesso, quanto menos tempo esteja aberta, menos energia iremos perder.

Estabelecimentos que mantêm a porta meio aberta disparam seus custos com aquecimento

ou com o ar-condicionado. Por outro lado, os sistemas automáticos regulam a passagem de entrada e saída e também servem de barreira natural para manter a temperatura desejada.

Para conhecer mais desse benefício, você pode baixar agora o e-Book **Como as portas automáticas podem beneficiar a economia de energia e de água**. Neste e-Book, a Novva Aprimatic by PPA explica todas as vantagens que o seu negócio e o seu bolso podem ter com a instalação de portas automáticas.

6 – Higiene e saúde pública

Você lava as mãos depois de ir ao banheiro? Pois é, muita gente não tem esse costume e ao tocar a maçaneta de banheiros públicos ou de lojas você pode estar contraindo várias doenças.

As portas sociais automáticas são conhecidas por proporcionar conforto aos usuários, que não necessitam fazer nenhum esforço para entrar e sair de lugares públicos.

Por ser uma **questão de higiene e saúde pública**, o Laboratório Bioqualitas, fez uma pesquisa em maçanetas de banheiros e detectou bactérias que fazem mal à saúde e indicam falta de higiene.

Durante uma semana, profissionais do Laboratório Bioqualitas coletaram amostras em maçanetas de banheiros em 10 locais do Rio de Janeiro. Em sete deles, foram encontradas três bactérias patogênicas, que fazem mal à saúde. Foram encontrados nas portas de banheiros da Central do Brasil, Rodoviária, Barra Shopping, Aeroporto Santos Dumond e em dois restaurantes no centro da cidade.

7 – Acessibilidade

É muito importante dar as boas-vindas a todo mundo, sem importar as suas capacidades físicas, com um sistema de abertura eficiente. Em um mundo globalizado, as rampas, elevadores ou as portas automáticas, oferecem a possibilidade de qualquer pessoa entrar a qualquer lugar sem fazer grandes esforços.

Em muitos países, inclusive no Brasil, os acessos para idosos e pessoas com necessidades especiais são obrigatórios. Nós, da Novva Aprimatic by PPA acreditamos, que além da obrigação, é uma questão de ética e responsabilidade de toda a população.

Disponível em: <https://www.novvaaprimatic.com.br/blog/portas-automaticas-de-vidro/>

2º Momento: Organização do Conhecimento

Para essa etapa foram desenvolvidas diversas atividades que estão divididas por aulas e apresentadas a seguir:

Aulas 3, 4 e 5: Sistematização do conhecimento feita pelo professor

Objetivos

- Conhecer a teoria da Radiação do Corpo Negro;
- Descrever o contexto histórico que envolveu o início da Física Moderna;
- Fundamentar o conceito do efeito fotoelétrico.

Procedimentos

Nesta etapa será apresentado através de aulas expositivas sobre a teoria criada por Max Planck para a Solução do Problema da Radiação do Corpo Negro, e explicação do efeito fotoelétrico feito por Einstein. A seguir são apresentados os principais os conceitos físicos abordados e no Apêndice A, estão apresentados os slides que foram utilizados nas aulas.

Conceitos físicos abordados

Radiação do Corpo Negro

O surgimento da Física Moderna se dá com as ideias que já vinham sendo formuladas no final do século XIX, em particular, em relação ao fenômeno da distribuição espectral da radiação térmica.

O espectro da radiação emitida por um corpo aquecido depende da temperatura e das propriedades desse corpo. Por exemplo, a observação no interior de um forno a uma certa temperatura T , permite detectar a irradiação de calor correspondente a essa temperatura. Trata-se da radiação térmica, quer dizer, radiação eletromagnética de espectro contínuo, que pode ser determinado experimentalmente mediante um pirômetro (NUSSENZVEIG, 2014).

Sabe-se pela experiência que, à medida que a temperatura de um corpo se eleva, a intensidade da radiação aumenta e a frequência correspondente ao máximo da intensidade da radiação também aumenta. Todo corpo emite e absorve radiação térmica, de todas as frequências e, com o aumento da temperatura, mais radiação é emitida.

Para o estudo da radiação térmica foi idealizado o corpo negro: um modelo de corpo em equilíbrio térmico à temperatura T . Os pontos do corpo emitem toda a radiação que absorvem. A representação do corpo negro, está mostrada na figura 1: uma cavidade tridimensional coberta de negro-de-fumo, dotada de um minúsculo orifício de observação fechado por um sensor de radiação. As linhas incidentes e emergentes representam absorção e emissão da radiação em três dos infinitos pontos do corpo.

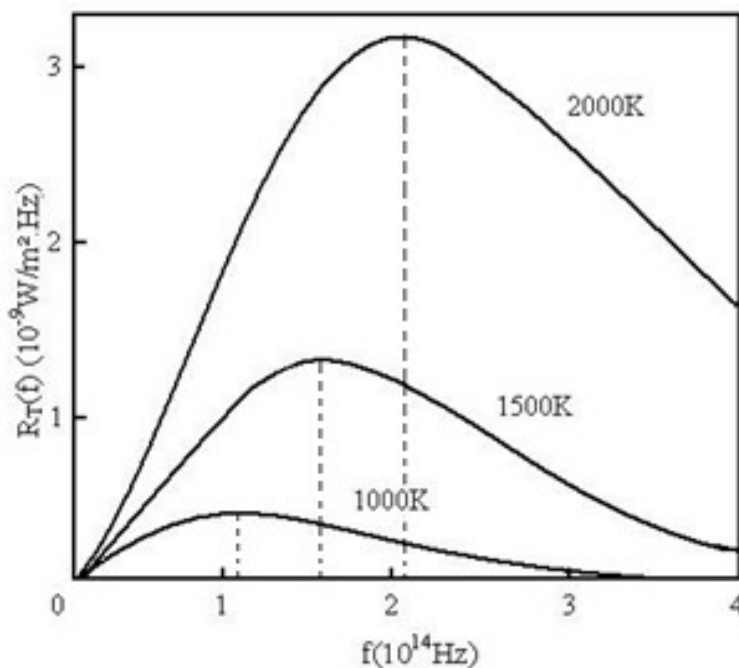
Figura 1 – Representação de um corpo negro. Emissão e absorção de radiação térmica por todos os pontos da cavidade. Em azul, um sensor de radiação.



Fonte: Elaborado pelos autores, adaptado de Eisberg; Resnick (1979)

A distribuição espectral da radiação do corpo negro obedece a relação entre a radiância e a frequência da radiação $R_{T,df}(f)$: intensidade de radiação emitida por intervalo de frequência df , a uma temperatura T , para diferentes valores de frequência. Como mostrado na figura 2.

Figura 2 - Radiância de um corpo negro em função da frequência



Fonte: Eisberg; Resnick (1979)

Como pode ser observado na figura 2, a frequência na qual a radiância é máxima (linha pontilhada), aumenta linearmente com a temperatura. A radiância integral R_T (área sob a curva) aumenta (muito rapidamente) com a quarta potência da temperatura, segundo a lei de Stefan-Boltzman

$$R_T = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

Onde:

R_T = Radiância integral da radiação do corpo negro (W/m^2);

T = Temperatura do corpo negro (K);

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$, constante de Stefan-Boltzman.

A figura 2 também mostra que o espectro desloca-se para maiores frequências à medida que a temperatura T aumenta. Este resultado é chamado de Lei do Deslocamento de Wien.

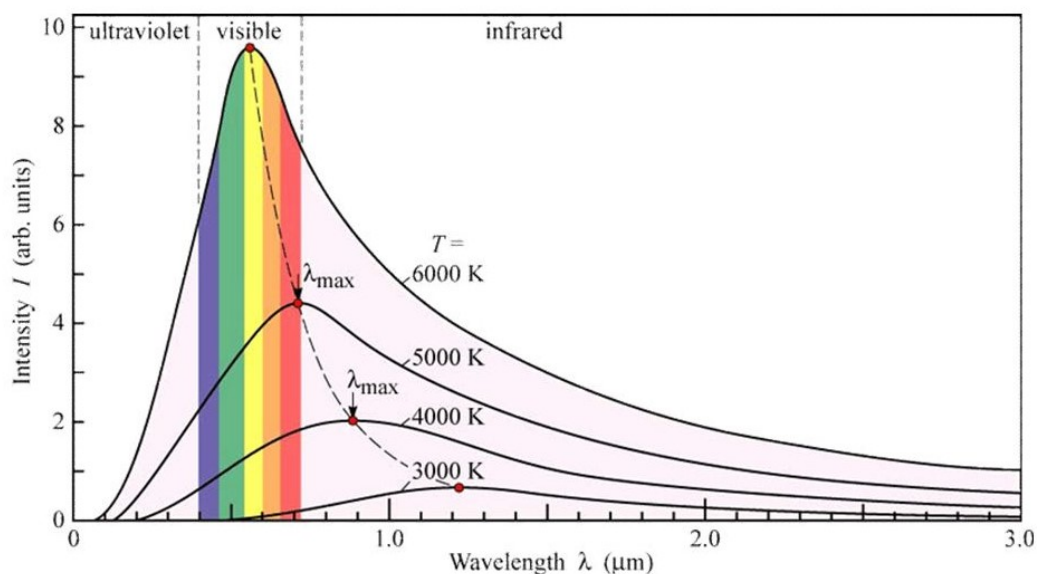
$$\frac{f_{Máx}}{T} = constante \quad (2)$$

Wien propôs um modelo que descrevia bem a relação experimental entre o comprimento de onda correspondente ao máximo da curva ($\lambda_{Máx}$) e a temperatura do corpo negro (figura 3), e tem a forma: $\lambda_{Máx} \cdot T = constante$, onde: o valor determinado experimentalmente para a constante de Wien é de $2,898 \cdot 10^{-3} m \cdot K$.

A Lei do deslocamento de Wien pode ser expressada através da equação 3:

$$\lambda_{Máx} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} m \cdot K \quad (3)$$

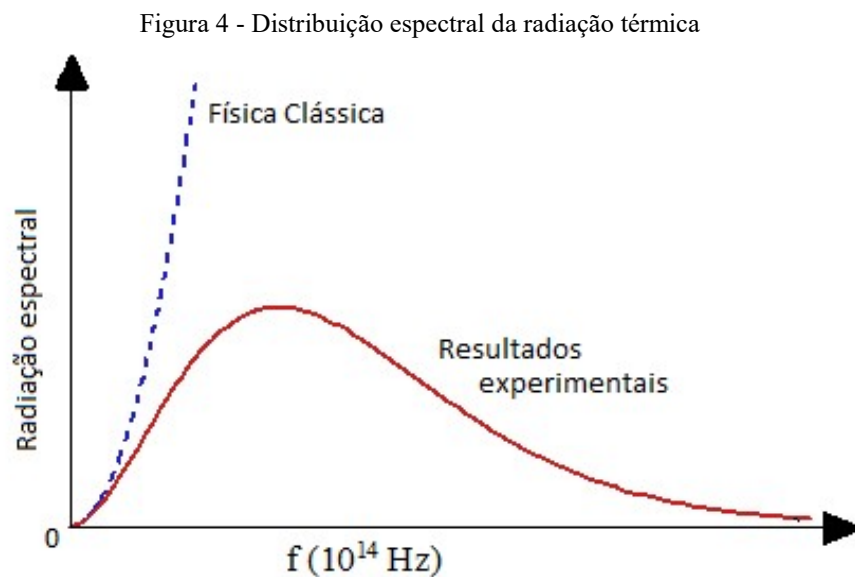
Figura 3 - Lei do deslocamento de Wien



Fonte: <http://zeus.qui.ufmg.br/~qgeral/?author=1&paged=2>

Ao explicar por meio da teoria clássica os resultados experimentais obtidos, observou-se que, para grandes comprimentos de onda (menores frequências), havia certa concordância com os resultados experimentais. Entretanto, para comprimentos de onda menores (grandes frequências) havia grande discordância entre a teoria e a experiência, como demonstrado na figura 4. O comportamento discrepante da teoria clássica para altas frequências é conhecido como a “catástrofe do ultravioleta”.

O termo sugere e enfatiza a não validade da Física Clássica para a explicação do espectro de radiação do corpo negro. Esse problema foi resolvido por Planck e outros pesquisadores.



Em 1879, Max Planck apresentou em Munique, na Alemanha, sua tese de doutorado sobre Termodinâmica. Dez anos mais tarde, ele assumiu uma cátedra na Universidade de Berlim, Alemanha, e passou a se dedicar ao estudo da radiação do corpo negro. Em 19 de outubro de 1900, Planck estabeleceu um marco na Física ao apresentar seu trabalho na Sociedade de Física de Berlim, e a publicação foi efetuada em 14 de dezembro de 1900, dando início ao que se popularizou como Física Quântica e Física Moderna. Pelo seu trabalho, Planck recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1918.

Para explicar a distribuição espectral da radiação térmica, Planck introduziu a revolucionária ideia, que conduziu a uma equação que concordava com os dados experimentais da radiação do corpo negro em todos os comprimentos de onda (ou frequências). Como na agitação molecular ocorrem oscilações dos portadores de carga elétrica e emissão de ondas eletromagnéticas, Planck associou osciladores harmônicos na superfície do corpo às cargas elétricas dentro das moléculas e

obteve resultados de acordo com a experiência¹, Planck postulou que um oscilador de frequência f só poderia emitir ou absorver energia em múltiplos inteiros de um “quantum de energia”.

A quantidade mínima de energia emitida, ou seja, o quantum, seria um pacote hf , de energia, em que h é uma constante que posteriormente foi denominada constante de Planck, ou seja, a energia do quanto seria:

$$E = hf \quad (4)$$

Em que:

- f é a frequência da radiação
- h constante de Planck, cujo valor no SI é $6,6261 \times 10^{-34}$ J.s

Planck, apesar de ter encontrado a solução do problema, relutou em publicá-la, pois seu resultado divergia dos seus princípios fundamentados na Física Clássica. Contudo, seu resultado foi publicado em 1900 e marcou o nascimento da Física Quântica. A ideia de quantização da energia viria ser utilizada para resolver outros problemas da época, e a constante de Planck passaria a ser a marca da Física Moderna.

O Efeito Fotoelétrico

Um outro problema que as leis da Física Clássica não conseguiam explicar era o efeito fotoelétrico, que foi descrito em 1887 pelo físico Heinrich Hertz (1857-1894), que percebeu que quando uma superfície metálica era iluminada por uma determinada frequência de radiação eletromagnética, elétrons eram ejetados desse metal. O problema consistia em explicar o porquê a energia cinética dos elétrons ejetados da superfície metálica não dependia da intensidade da luz incidente.

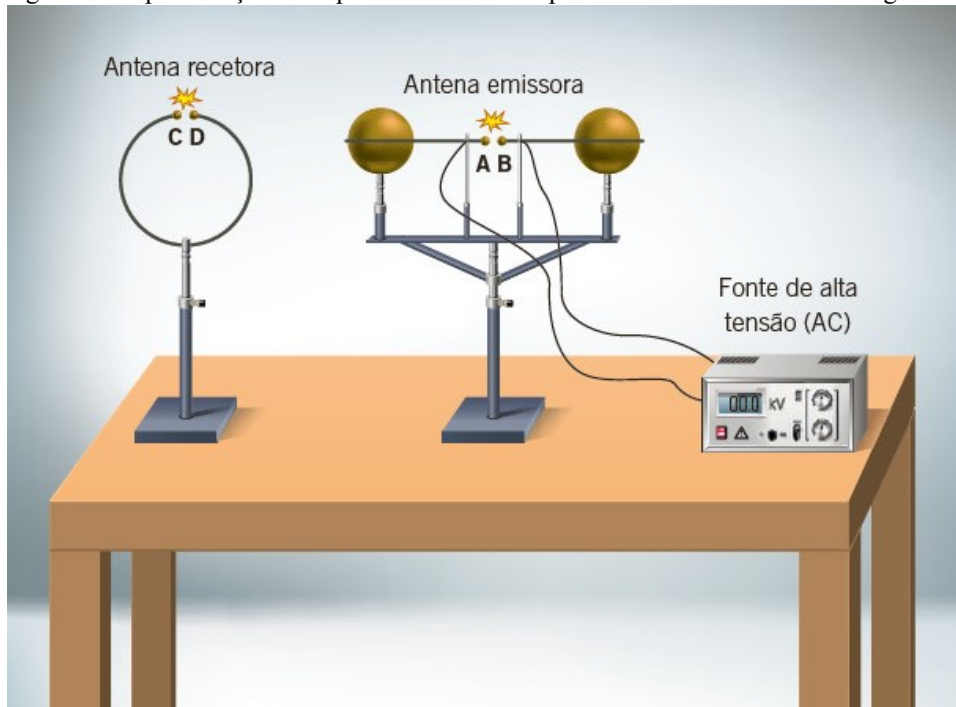
Com suas experiências, Hertz confirmou a existências das ondas eletromagnéticas e a teoria de Maxwell sobre a propagação da luz. Paradoxalmente, ao comprovar a teoria de Maxwell, coroamento da Física Clássica, Hertz estava assim observando o efeito fotoelétrico, uma das primeiras evidências experimentais da quantização (EISBERG; RESNICK, 1979).

Em seus experimentos, ilustrados na figura 5, Hertz produzia uma descarga oscilante, fazendo saltar centelhas (faíscas) entre os eletrodos, para gerar ondas, e detectava-as usando uma antena ressonante, onde a detecção também era acompanhada de centelhas entre os eletrodos. Ele observou

¹ Planck confessou, mais tarde que só foi levado a formular esse postulado por “um ato de desespero”, dizendo: “era uma hipótese puramente formal, e não lhe dei muita atenção, adotando-a porque era preciso, a qualquer preço, encontrar a explicação teórica. (NUSSENZVEIG, p. 205, 2014)

que o comprimento da centelha causada pela descarga elétrica entre duas esferas metálicas diminuía quando se escurecia a sala do laboratório e tornava-se maior quando a sala era iluminada. Estudos mais detalhados do fenômeno de Hertz revelaram que, quando havia uma incidência de radiação ultravioleta na superfície de bronze da esfera polida ligada ao terminal negativo da fonte, a centelha realmente se tornava maior.

Figura 5 - Representação do experimento de Hertz para detectar as ondas eletromagnéticas



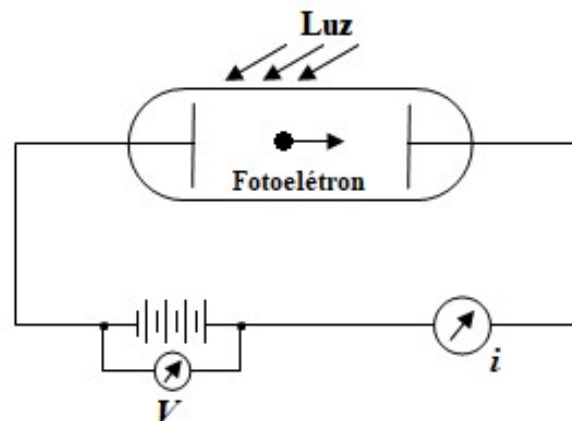
Fonte: https://www.santillana.pt/files/DNLCNT/Priv//_11809_c.book/282/index.html#/pag/215

Logo verificou-se que o aumento da descarga era uma indicação de emissão de partículas eletrizadas, provenientes da esfera, estimuladas pela incidência de radiação. Esse fenômeno foi denominado fotoeletricidade (posteriormente, efeito fotoelétrico). Nessa época, o elétron ainda era desconhecido, pois essa partícula só foi descoberta em 1897 pelo físico Joseph John Tomson (1856-1940). Foi nesse ano que as cargas elétricas emitidas pela superfície metálica no efeito fotoelétrico passaram a ser identificadas como elétrons.

As investigações posteriormente feitas sobre o efeito fotoelétrico, realizadas principalmente pelo físico alemão Philipp Eduard Anton von Lenard (1862-1947), revelaram uma série de características intrigantes e contraditórias segundo o esperado com base na Física Clássica.

Num experimento típico, como ilustrado na figura 6, os eletrodos estão dentro de uma ampola de quartzo a vácuo (transparente à luz ultravioleta), e se estabelece entre eles uma diferença de potencial V , iluminando depois o catodo com luz de frequência f e intensidade I_0 . Com o auxílio de um amperímetro, mede-se a intensidade i da corrente elétrica gerada.

Figura 6 - Representação do arranjo experimental utilizado por Lenard.



Fonte: (NUSSENZVEIG, 2014).

Em seus experimentos sobre efeito fotoelétrico, Lenard verificou que:

- A emissão de elétrons ocorre somente a partir de uma determinada frequência, que depende da substância sobre a qual incide a radiação. Essa frequência é denominada frequência de corte.
- Para a maioria dos metais, a frequência de corte pertence à região da radiação ultravioleta; entretanto, para óxido de céσιο e potássio, essa frequência pertence ao espectro visível.
- Para frequências inferiores à de corte, o efeito não ocorre, mesmo que a intensidade da radiação incidente seja aumentada.
- Quando a emissão ocorre, o número de elétrons emitidos é diretamente proporcional à intensidade da luz monocromática incidente.

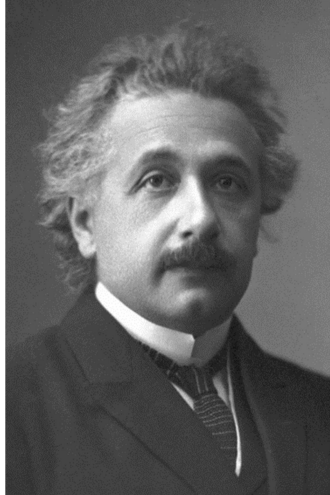
A Física Clássica não conseguia explicar o fato de que a emissão dos elétrons dependia da frequência da radiação e não de sua intensidade. Isso era estranho pois, segundo a teoria ondulatória da luz, quanto maior a intensidade, maior é a amplitude da onda e, portanto, maior é a quantidade de energia que ela transporta. Em outras palavras, segundo a teoria ondulatória da luz, para uma intensidade “suficientemente” grande, qualquer que fosse a frequência da onda incidente na superfície do metal deveria se “arrancar” elétrons, mas não era o que as experiências demonstravam.

Teoria de Einstein do Efeito Fotoelétrico

Como foi visto na seção anterior, a Física Clássica esbarrava em alguns pontos na tentativa de explicar o efeito fotoelétrico utilizando o caráter ondulatório da luz. A explicação compatível com os fatos experimentais foi dada por Albert Einstein (1879-1955) num trabalho publicado em 1905, intitulado “Um ponto de vista heurístico sobre a produção e transformação da luz”, Einstein propôs uma audaciosa teoria do efeito fotoelétrico baseada numa extensão das ideias de Planck sobre a

quantização da energia. (NUSSENZVEIG, 2014). O Prêmio Nobel de Física de 1921 foi concedido a Albert Einstein, (figura 7), pela sua teoria sobre o efeito fotoelétrico.

Figura 7 - Albert Einstein



Fonte: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/>.

De acordo com Eisberg e Resnick (1979) Einstein citou o efeito fotoelétrico como aplicação que poderia testar qual teoria estava correta, a sua ou a teoria clássica da luz. Isso aconteceu vários anos antes do trabalho de Millikan, mas Einstein foi influenciado pela experiência de Leonard. Como mencionado na seção 1.1, Planck originalmente restringiu seu conceito de quantização de energia aos elétrons nas paredes de um corpo negro. Planck acreditava que a energia eletromagnética, quando irradiada, se espalhava pelo espaço. Por outro lado, Einstein propôs que a energia radiante está quantizada em pacotes concentrados, que vieram a ser chamados de fótons.

No seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico, Einstein não concentrou sua atenção na teoria ondulatória da luz, mas na sua teoria corpuscular (fotônica). Ele relacionou a energia E do fóton com sua frequência f conforme a equação (1), onde h é a constante de Planck.

$$E = hf \quad (1)$$

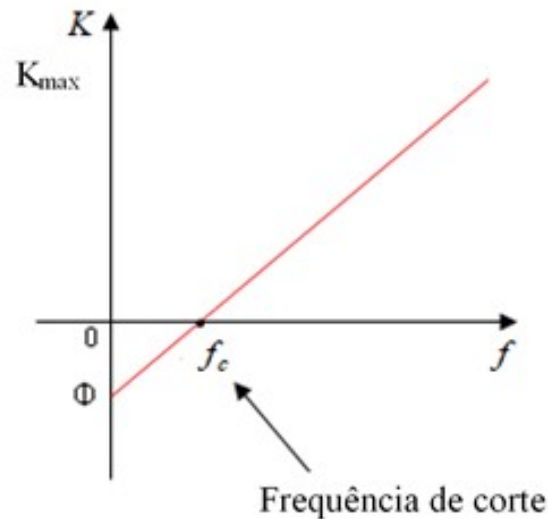
Einstein supôs que no processo fotoelétrico um fóton, $n = 1$, é completamente absorvido por um único elétron. Para uma maior quantidade de fótons incidentes, $n > 1$, a corrente fotoelétrica aumenta, correspondentemente. A expressão (2) é a equação de Einstein do efeito fotoelétrico, significa que a energia cinética máxima $K_{\text{máx}}$ do fotoelétron

$$K_{\text{máx}} = hf - \Phi \quad (2)$$

corresponde à diferença entre a energia do fóton hf e a energia Φ necessária para o elétron seja ejetado da superfície do metal (estado de máxima energia). Essa energia é conhecida como função trabalho ou trabalho de extração, igual a hf_c , onde f_c recebe o nome de frequência de corte.

A figura 8 mostra a representação gráfica da energia cinética máxima do fotoelétron em função da frequência do fóton incidente no metal.

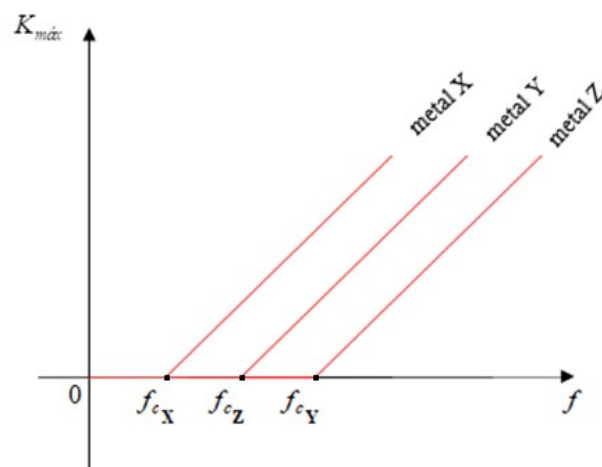
Figura 8 - Energia cinética máxima dos fotoelétrons em função da frequência do fóton.



Fonte: Adaptado de Nussenzveig (2014).

Da figura 9 conclui-se que $K_{\max} = hf - \Phi$, sendo $f \geq f_c$. O coeficiente angular da reta é a constante de Planck h . Na figura 9 estão representados três metais diferentes X, Y, Z.

Figura 9 - Gráfico da frequência de corte de três metais



Fonte: Adaptado de Nussenzveig (2014).

Esse gráfico foi confirmado experimentalmente pelo físico Robert Andrews Millikan (1868-1953), em 1916. O valor do coeficiente angular corresponde de fato à constante de Planck.

O Quadro 2 mostra a ocorrência da descoberta do efeito fotoelétrico até a teoria do fóton.

Quadro 1 - Da descoberta do efeito fotoelétrico até a teoria fotônica

Ano	Cientista	Cronologia
1887	Hertz	Observação do efeito fotoelétrico
1897	J. J. Tomson	Descoberta do elétron
1899	P. Lenard	Contradições experimentais com base na Física Clássica
1900	Planck	Lei da radiação de Planck e quantização de energia
1905	Einstein	Equação de Einstein do efeito fotoelétrico, teoria fotônica

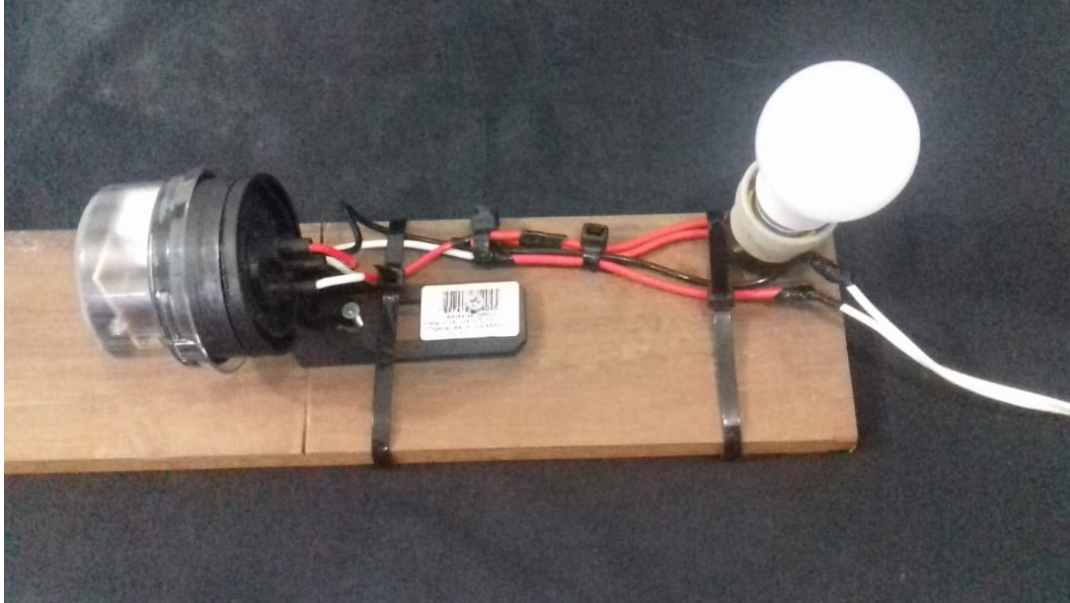
Fonte: Elaborada pelos autores

Diante das inúmeras aplicações do efeito fotoelétrico, por exemplo, na contagem do número de pessoas que passam em um determinado local, na abertura e no fechamento automático de portas, nos dispositivos que ligam e desligam automaticamente sistemas de iluminação e em sistemas de alarmes. Fica, portanto, que na aplicação da sequência didática será tratado, inicialmente, o estudo da radiação térmica e o corpo negro abordando a Lei de Stefan-Boltzmann e a Lei do deslocamento de Wien. Em seguida, será abordado o trabalho de Planck sobre a quantização da energia, e por fim destacamos o efeito fotoelétrico e suas aplicações.

Aula 6: Demonstração experimental com Relé Fotoelétrico

Nessa aula o problema apresentado no início da sequência didática será trabalhado através de uma demonstração experimental de um circuito elétrico que contém uma lâmpada ligada a um relé fotoelétrico, conforme pode ser visto na figura 10.

Figura 10 - Montagem experimental para acendimento de lâmpada com o uso de relé fotoelétrico



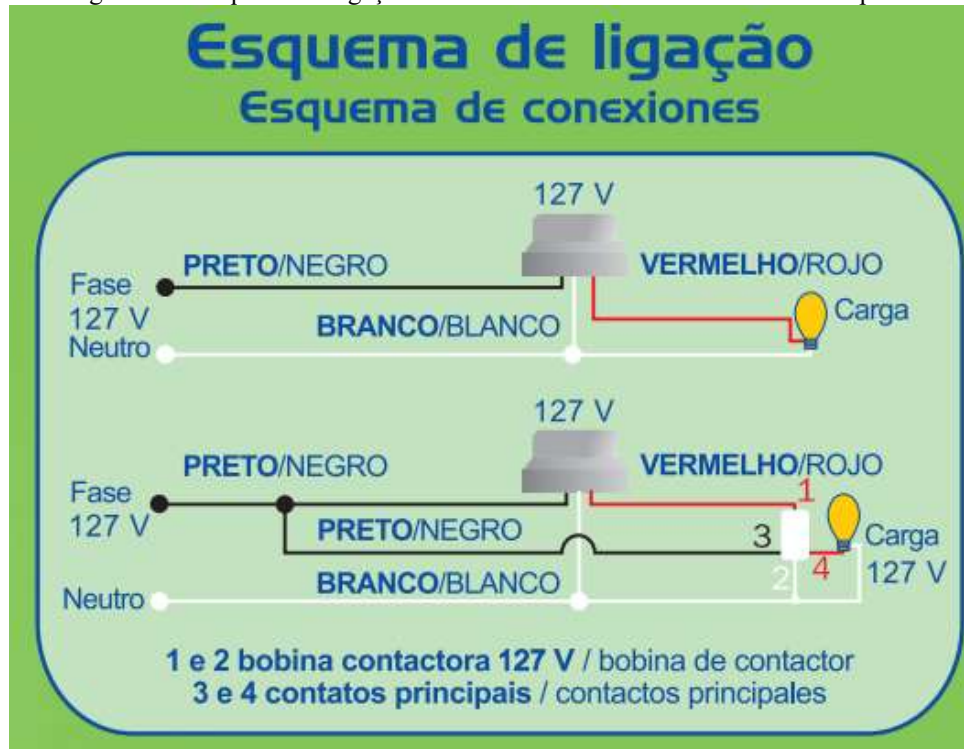
Fonte: Próprio autor

Os materiais utilizados para construção do experimento são:

- 1 relé fotoelétrico ;
- 1m fio encapado vermelho 2,5 mm
- 1m de fio encapado preto 2,5 mm
- 1m de fio encapado branco 2,5 mm
- 1 bocal de lâmpada
- 1 lâmpada
- 1 plug tomada macho
- 1 base de madeira para fixar o relé fotoelétrico

Para a montagem do experimento, faz-se necessário o uso de alicate para realizar os cortes nos fios, além de fita isolante para evitar qualquer tipo de acidente com a energia elétrica. A figura 11 traz o modelo esquemático completo do experimento:



Figura 11 – Esquema de ligação do circuito elétrico relé fotoelétrico e lâmpada.



Fonte: Adaptado de <https://www.exatron.com.br/storage/products-files/WNurKitQy1ZJz2LK4psNzAVGZJBR42bbMk8q4byW.pdf>

O circuito foi montado com fios flexíveis e afixado sobre uma base de madeira, placa de madeira. Um passo importante nesta construção é certificar-se que os fios do relé fotoelétrico sejam conectados corretamente. Este é um dispositivo com três fios em sua saída, devendo ser conectado em uma base própria, onde estão os três fios de saída, geralmente nas cores preto, vermelho e branco (vide figura 11).

Ainda havendo dúvidas sobre como deverá ser feita as ligações e conexões na montagem do aparato experimental sugere-se os seguintes vídeos:

- **Vídeo 1:**  **Ligando um relé fotoelétrico no refletor de LED**
(Link: <https://youtu.be/gmigUQGNcBk>);
- **Vídeo 2:**  **Como instalar uma fotocélula**
(Link: <https://www.youtube.com/watch?v=ZdLu5rPzP4c&t=67s>).

Através desse experimento o problema será novamente apresentado, porém dessa vez os alunos poderão visualizar o fenômeno físico, ou seja, nessa etapa o aluno vai se deparar com uma situação experimental investigativa em que ele é responsável pela resolução.

Portanto esse experimento tem como objetivo demonstrar qualitativamente o efeito fotoelétrico relacionado à busca da compreensão do que leva ao acender e apagar das luzes dos postes de iluminação pública. Essa prática também possibilita aos alunos o aprimoramento do conhecimento sobre as diferentes formas de análise das contribuições do efeito fotoelétrico no cotidiano, usando a estratégia da abordagem experimental (relé fotoelétrico). Além de oportunizar aos alunos observar, na prática experimental, os processos do efeito fotoelétrico, bem como a metodologia física e, em geral, científica subjacente à prática, a fim de que possam compreender a aplicação da análise do fenômeno.

Aulas 7 e 8: Simulação computacional do Efeito Fotoelétrico

Dando continuidade nas atividades do 2º Momento, no qual trata a parte da organização do conhecimento, será utilizado como recurso didático um simulador online que reproduz virtualmente o experimento do efeito fotoelétrico. Essa atividade pode ser desenvolvida em pequenos grupos, como sugestão é indicado que os grupos tenham no máximo três alunos.

De preferência que essa atividade seja realizada no laboratório de informática, para que cada grupo possa realizar as atividades, podendo ainda o professor projetar o simulador para toda a turma. Esse simulador pode ser aberto também através de um celular com acesso à internet.

Para a realização dessa atividade foi elaborado um roteiro experimental virtual, apresentado a seguir, que será entregue aos alunos, onde constam os procedimentos que os eles deverão seguir durante todo o processo, sendo importante a mediação do professor neste momento.

Aproveitando a utilização do computador ou celular é sugerido que antes da realização do experimento virtual seja feita a apresentação de dois pequenos vídeos sobre o efeito fotoelétrico: o primeiro vídeo intitulado “A natureza das coisas - Einstein no dia a dia - Parte I”² com aproximadamente 9 minutos de duração e faz parte de uma série de documentários que conta um pouco sobre a vida do físico Albert Einstein, destacando nessa parte a conquista do Prêmio Nobel de Física através da explicação do Efeito Fotoelétrico. O segundo vídeo descreve algumas aplicações do efeito fotoelétrico encontradas no dia a dia, que foi apresentado por uma reportagem no G1 Pernambuco, intitulado “Efeito fotoelétrico leva em consideração, as descobertas de Einstein”³.

²Disponível em: <https://youtu.be/Oqz6WqeM0uk> (Acessado no dia 13/08/2019).

³Disponível em: <http://g1.globo.com/pernambuco/videos/v/efeito-fotoeletrico-leva-em-consideracao-descobertas-de-einstein/2962910/> (Acessado no dia 13/08/2019).

Roteiro Experimental Virtual

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



Aluno (a): _____ Turma: _____ Data: ____ / ____ / ____

TÍTULO: Roteiro para a utilização do simulador

OBJETIVOS

- Compreender a interação da luz com a matéria.
- Analisar qualitativamente a relação da frequência e da intensidade com o efeito fotoelétrico.
- Aplicar o modelo matemático descrito por Einstein em problemas envolvendo o efeito fotoelétrico.

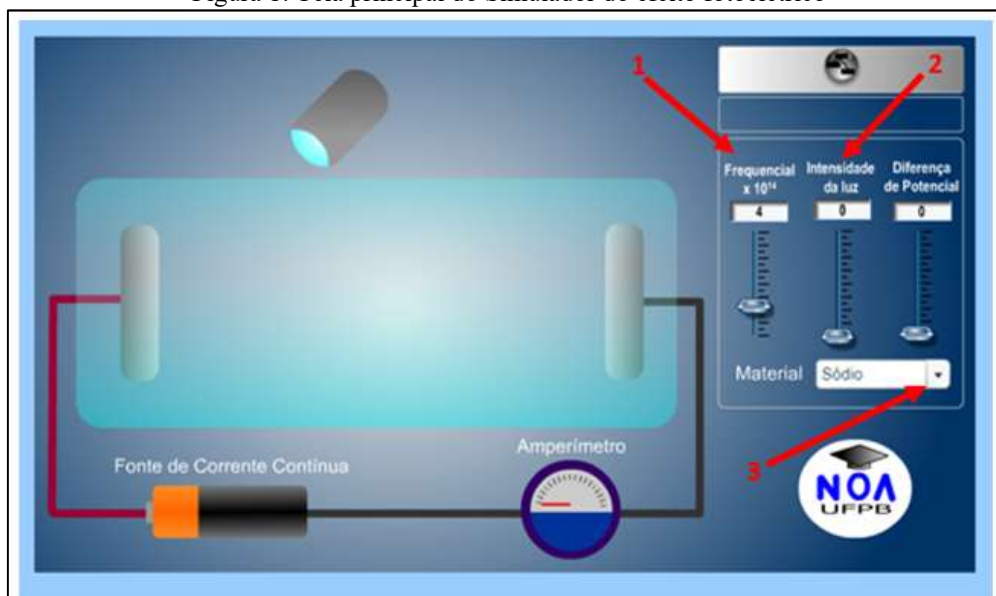
MATERIAIS

- Computador ou celular com acesso à internet.
- Link para acessar o simulador:
<http://www.fisica.ufpb.br/~romero/objetosaprendizagem/Rived/20EfeitoFotoeletrico/Site/Animacao.htm>

PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

- Acesse o simulador do efeito fotoelétrico, conforme exibido na figura 1.

Figura 1: Tela principal do Simulador do efeito fotoelétrico



¹Cursor para regular a frequência da radiação eletromagnética (Luz);

²Cursor para regular a intensidade da luz;

³Seletor para escolher os metais que poderão ser utilizados na simulação.

Fonte: <<http://www.fisica.ufpb.br/~romero/objetosaprendizagem/Rived/20EfeitoFotoeletrico/Site/Animacao.htm>>.

Etapa 1

Inicialmente devemos estabelecer as condições iniciais do experimento:

1. Selecione um dos **metais**³ como material a ser utilizado na placa metálica no interior do experimento, como mostrado na figura 1.
2. Coloque o cursor da **frequência**¹ no seu ponto médio, como indicado na figura 1.
3. Retire toda a luz que incide no experimento, ou seja, coloque o cursor da **intensidade**² da luz na posição zero e anote o que acontece com a corrente elétrica no amperímetro.

4. Agora regule o cursor da intensidade para o ponto médio e anote o que acontece com a corrente elétrica no amperímetro.

5. Regule o cursor da intensidade para a posição máxima e anote o que acontece com a corrente elétrica no amperímetro.

6. Discuta com seus colegas e chegue a uma conclusão sobre a relação existente entre o efeito fotoelétrico e a intensidade luminosa.

7. Agora coloque o cursor da intensidade da luz na posição máxima. Com o curso da frequência também na posição máxima, lentamente diminua a posição do cursor da frequência até chegar na posição zero. Registre suas observações.

Etapa 2

8. Selecione agora outro metal a ser utilizado na placa metálica no interior do experimento, como mostrado na figura 1.

9. Fixe o cursor da frequência no ponto médio e varie o cursor da intensidade da luz de zero até seu valor máximo. Registre o resultado experimental encontrado.

10. Fixe o cursor da intensidade da luz no ponto médio e varie o cursor da intensidade da frequência de zero até seu valor máximo. Registre o resultado experimental encontrado.

11. O que aconteceu com o valor da frequência de corte quando o material da placa metálica foi alterado?

12. E se alterarmos novamente o material da placa metálica o que acontecerá com a frequência de corte? Escolha um terceiro metal para material da placa refaça os passos 09 e 10, em seguida tire suas conclusões.

RESULTADOS ESPERADOS E/OU VALORES DE REFERÊNCIA

De acordo com os seus resultados experimentais explique como funciona o efeito fotoelétrico. E por que ele não pode ser explicado de acordo com a física clássica.

3º Momento: Aplicação do Conhecimento

Na a etapa da aplicação do conhecimento, Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), destacam que o professor tem o papel de desenvolver diversas atividades em que os estudantes aproveitem dos seus conhecimentos científicos explorados na Organização do Conhecimento de forma a articulá-los com situações de seu cotidiano. Para os autores o que deve ser explorado nesta última etapa é o potencial explicativo e conscientizador das teorias científicas.

Aulas 9 e 10: Atividades de avaliação

O processo de avaliação das atividades realizadas deve ser contínuo, pois os debates gerados em sala de aula, a participação durante as aulas expositivas e a realização das atividades experimentais são de extrema importância para o processo de ensino-aprendizagem.

As duas últimas aulas serão destinadas para que os alunos elaborem um texto sobre o que entenderam sobre o Efeito Fotoelétrico, e o relatório da atividade experimental desenvolvida anteriormente; além de resolverem um questionário avaliativo (apresentado logo abaixo) contendo 10 questões sobre o que foi trabalhado durante as aulas.

Questionário Avaliativo

		
---	---	---

Aluno (a): _____ Turma: _____ Data: ___/___/___

Questionário Avaliativo

Dados:

$c = 3 \cdot 10^8$ m/s (velocidade da luz no vácuo);

$h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s (constante de Planck);

$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ J

1. Qual das afirmações abaixo explica corretamente o efeito fotoelétrico?

- a) Choque elétrico entre as partículas leves e núcleos.
- b) Produção de raios X, quando há choque de elétrons em uma placa de metal.
- c) Produção de luz por modificação energética de um sistema atômico.
- d) Ejeção de elétrons de uma superfície metálica por incidência de radiação eletromagnética.
- e) Nenhum dos fenômenos acima.

2. Determine a energia cinética máxima dos fotoelétrons se a função trabalho do material é de 2,3 eV e a frequência da radiação é de $3,0 \cdot 10^{15}$ Hz.

3. Analise as afirmativas abaixo, relativas à explicação do efeito fotoelétrico, tendo como base o modelo corpuscular da luz.

- I. A energia dos fótons da luz incidente é transferida para os elétrons no metal de forma quantizada.
- II. A energia cinética máxima dos elétrons emitidos de uma superfície metálica depende apenas da frequência da luz incidente e da função trabalho do metal.
- III. Em uma superfície metálica, elétrons devem ser ejetados independentemente da frequência da luz incidente, desde que a intensidade seja alta o suficiente, pois está sendo transferida energia ao metal.

Assinale a alternativa correta.

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

4. A emissão de fotoelétrons por um determinado metal exige que:

- a) A luz incidente tenha uma frequência maior que um determinado valor.

- b) A luz incidente tenha um comprimento de onda superior a um determinado valor.
 c) A temperatura do metal esteja próximo à de sua temperatura de fusão.
 d) A luz incidente tenha uma intensidade superior a um determinado valor.
 e) O metal não esteja ligado à Terra.

5. Quais das seguintes substâncias, Ta (4,2), W (4,5), Ba (2,5), Li (2,3) (função trabalho, em eV, entre parênteses), podem ser usadas para confeccionar uma fotocélula para ser usada com luz visível? Os valores aproximados dos comprimentos de onda (em nm) no visível são apresentados na tabela abaixo:

Violeta	Azul	Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho
425	475	525	575	625	675

6. O efeito fotoelétrico é usado em dispositivos para controlar o funcionamento das lâmpadas nos postes de iluminação pública.

Tal efeito evidencia a natureza

- a) transversal de onda eletromagnética.
 b) longitudinal de onda eletromagnética.
 c) ondulatória da luz.
 d) corpuscular da luz.
 e) vibracional da luz.

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

a) Verifique se ocorre emissão fotoelétrica quando sobre esse metal incide luz de comprimento de onda $\lambda = 6,0 \cdot 10^{-7}$ m. A constante de Planck é $h \approx 4,2 \cdot 10^{-15}$ eV.s e a velocidade da luz no vácuo é $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s.

b) Qual é a frequência mais baixa da luz incidente capaz de arrancar elétrons do metal?

8. A luz, segundo a física moderna, apresenta caráter dual, ou seja, em certos fenômenos, manifesta comportamento de partícula e, em outros, de onda. Complete a coluna 2 de acordo com a coluna 1, segundo o comportamento da luz.

Coluna 1	Coluna 2
Onda	() efeito fotoelétrico
partícula	() polarização
	() refração
	() interferência

A sequência CORRETA é

- a) 1 - 2 - 2 - 2.
 b) 1 - 1 - 2 - 2.
 c) 1 - 1 - 1 - 2.
 d) 2 - 2 - 1 - 1.
 e) 2 - 1 - 1 - 1.

9. Quando se faz incidir luz de uma certa frequência sobre uma placa metálica, qual é o fator que determina se haverá ou não emissão de fotoelétrons?

- a) A área da placa.
- b) O tempo de exposição da placa à luz.
- c) O material da placa.
- d) O ângulo de incidência da luz.
- e) A intensidade da luz

10. Num experimento sobre efeito fotoelétrico, considere a função de trabalho na lâmina de metal igual 6,63 eV. Nesta hipótese, a frequência de corte da radiação incidente, em Hz, é igual a

- a) $1,6 \times 10^{14}$
- b) $1,6 \times 10^{15}$
- c) $2,4 \times 10^{15}$
- d) $2,75 \times 10^{15}$
- e) $4,39 \times 10^{15}$

Gabarito

- 1. R) Letra D
- 2. R) 10,12 eV
- 3. R) Letra C
- 4. R) Letra A
- 5. R) Apenas o Ba e Li
- 6. R) Letra D
- 7. R) a) não ocorrerá emissão; b) $6 \cdot 10^{14}$ Hz
- 8. R) Letra D
- 9. R) Letra C
- 10. R) Letra B

Referências

DELIZOICOV; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M.M. Ensino de Ciências: fundamentos e métodos. São Paulo: Cortez, 2002.

EISBERG, R., RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Partículas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979 – 29ª reimpressão.

FERREIRA, Marcello et al. Uma proposta de ensino investigativo sobre a física moderna e contemporânea. Revista Pesquisa e Debate em Educação, v. 8, n. 2, p. 312-357, 2018.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de física básica, 4: ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blucher. 2014.

VALADARES, E. C.; MOREIRA, A. M. **Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro**. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 15, n. 2: p. 121-135, ago. 1998.

Apêndice – Slides

São apresentados a seguir os slides sobre:

- 1) Radiação do Corpo Negro; e
- 2) Efeito Fotoelétrico.



Radiação do Corpo Negro

Prof. Isaías Fernandes Gomes
2019.2

Radiação de Corpo Negro: histórico

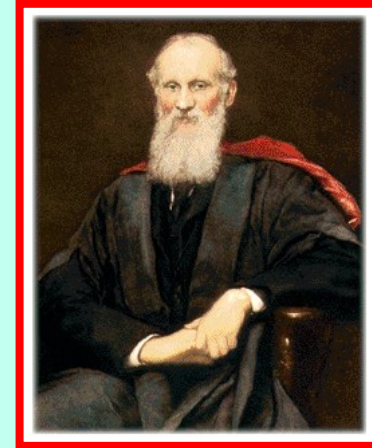
Conferência na Royal Society (março de 1900)

A completude da Física:

A Mecânica de Newton;

O Eletromagnetismo de Maxwell;

A Termodinâmica de Boltzmann.



“Não há nada mais a descobrir em Física”

“Há duas pequenas nuvens no horizonte da Física”.

THOMSON, Willian (1824-1907), físico, matemático e engenheiro inglês. Considerado um líder nas ciências físicas do séc. XIX. Fez importantes contribuições na análise matemática da eletricidade e termodinâmica. Desenvolveu a escala de temperatura absoluta.

Radiação de Corpo Negro: histórico

AS DUAS “NUVENZINHAS”

O fracasso das experiências de Michelson e Morley, ao medir “c” através do éter.

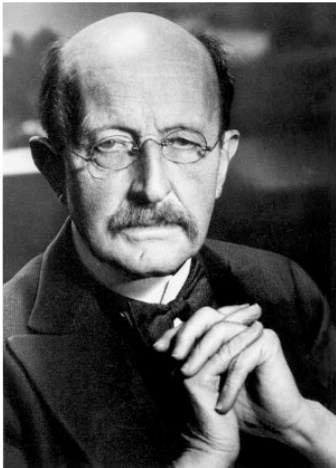
A dificuldade em explicar a distribuição de energia na radiação de um corpo aquecido.

Os limites da Física Clássica

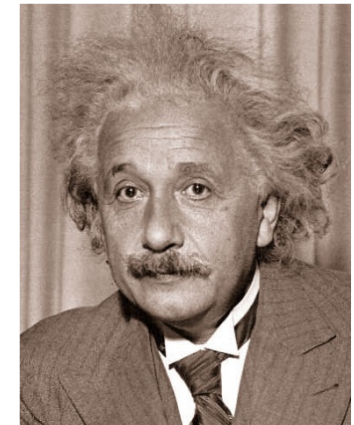
Esperava-se que, em breve, o avanço da Ciência e Tecnologia acomodaria os resultados inesperados nas teorias vigentes!

Radiação de Corpo Negro: histórico

As “Tempestades” das duas nuvenzinhas!



Max Planck



Albert Einstein

O Nascimento da Física Moderna

- A Teoria da Relatividade
- A Física Quântica

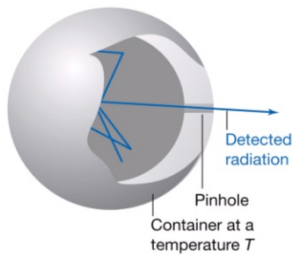
Radiação de Corpo Negro: histórico

Mecânica Quântica nasceu com o papel de descrever os processos de interação entre radiação e a matéria. Essa descrição ajudou na compreensão da estrutura da matéria (partículas atômicas) e tornou-se o novo paradigma físico do mundo microscópico.



Corpo Negro

Conceito: modelo de um corpo no estudo das radiações emitidas.



- absorve toda radiação incidente (absorvidade, $a = 1$);
- sua refletividade é nula ($r = 0$), daí seu nome;
- emissor ideal (emissividade, $e = 1$).

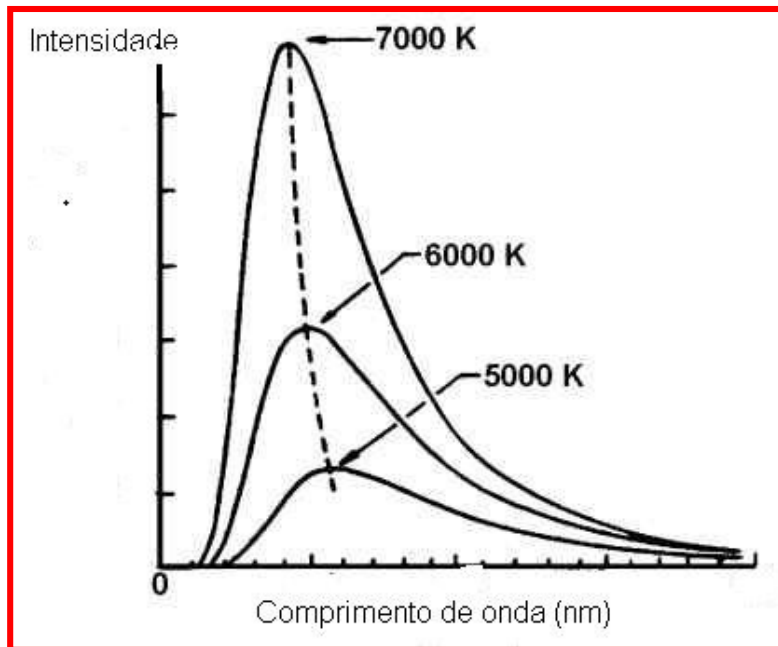
“Todo bom absorvedor é bom emissor”



Modelo: um **C.N** é obtido com um objeto oco provido de um pequeno orifício: qualquer radiação que penetra nesse orifício não sai mais, sendo absorvida pelas paredes internas do objeto oco “**o orifício constitui o C.N.**”

Se o objeto oco for aquecido por uma fonte de calor no seu interior, há emissão de radiação pelo orifício.

Lei de Stefan-Boltzmann



“Aumentando-se a temperatura, para dado comprimento de onda, a intensidade da radiação aumenta”.

Lei de Stefan-Boltzmann

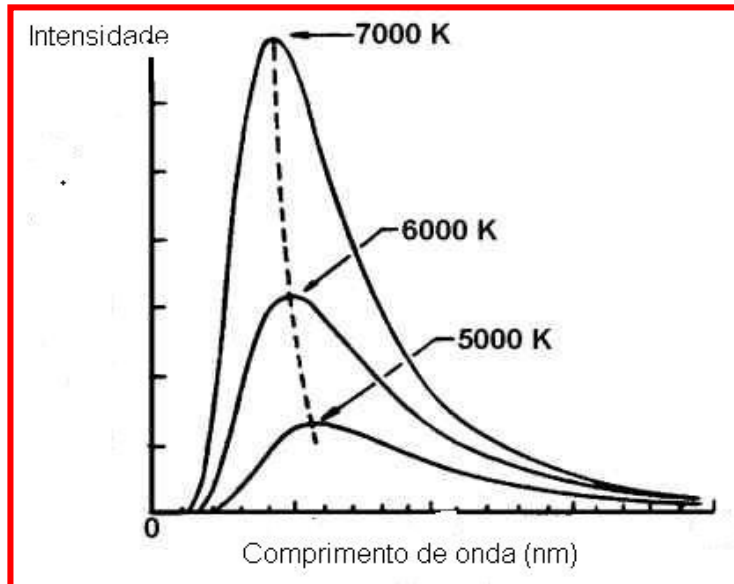
“A potência total da radiação emitida aumenta com a temperatura (T^4)”

$$P = \sigma \cdot A \cdot e \cdot T^4$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$ (Constante de Stefan-Boltzmann)

e = emissividade (no corpo negro $e=1$); **A = área emissão**

Lei de Wien (do deslocamento)



Outra conclusão

aumentando-se a temperatura, o pico da distribuição se desloca para comprimentos de onda menores.

Lei de Wien (do deslocamento)

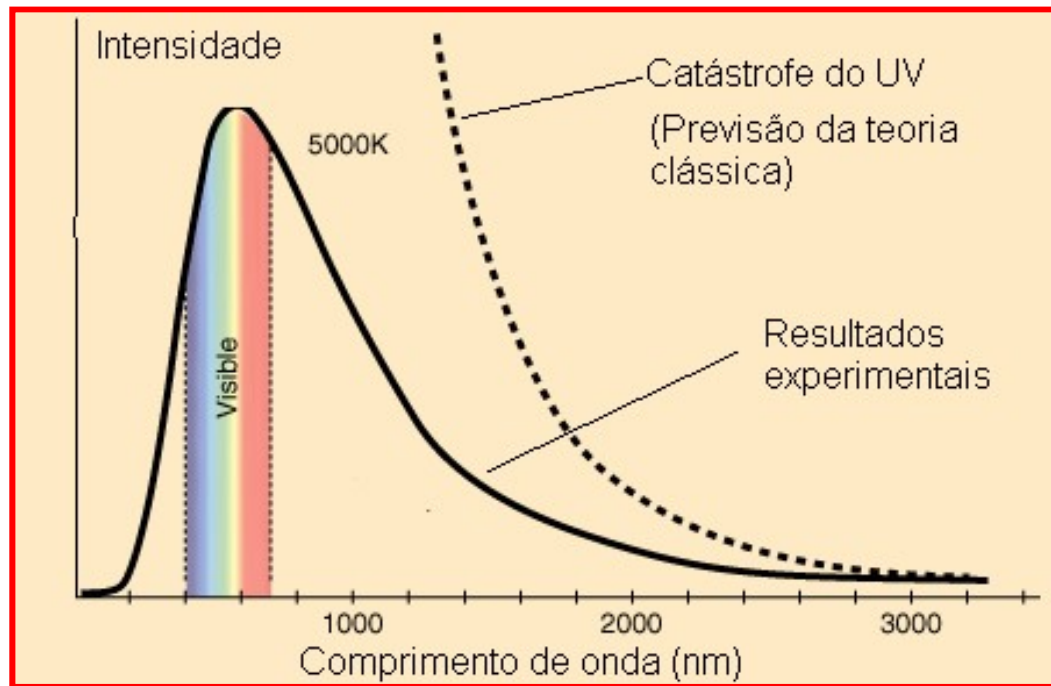
“O pico de distribuição dos comprimentos de onda se desloca para os comprimentos de onda menores a medida que a temperatura aumenta.”

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$$

$\lambda_{\text{máx}}$ = comprimento de onda em que a curva tem um pico

T = temperatura absoluta do corpo emitindo a radiação

Corpo Negro: catástrofe do U.V



Ao explicar, por meio da teoria clássica, os resultados obtidos observou-se que para:

λ elevados, havia razoável concordância com os resultados experimentais.

λ pequenos, a discordância entre a teoria e a experiência era grande. Essa discordância ficou conhecida como a “**catástrofe do ultravioleta**”.

Radiação de Corpo Negro e Planck

Até então a luz foi encarada como OEM, contudo o modelo proposto pela teoria eletromagnética de Maxwell não era satisfatório para corpo negro, **C.N.**

1900, Planck apresentou à Sociedade Alemã de Física um estudo teórico sobre a emissão de radiação de um **C.N.**, no qual deduz uma equação plenamente em acordo com os resultados experimentais, em relação a distribuição de λ apresentados!

A solução de Planck para o CN, considerando que a energia é quantizada, permitiu explicar outros conceitos físicos a nível microscópico. Embora o desenvolvimento efetivo da nova teoria só tenha ocorrido a partir de 1920, 1900 é considerado o marco divisório entre a Física Clássica e a Física Quântica.

PLANCK, Max Karl Ernst Ludwig (1858-1947), físico alemão. Dedicou-se ao estudo de Irradiação Térmica, Óptica e Termodinâmica. Formulou a Teoria dos *Quanta* (Prêmio Nobel - 1918).

Radiação de Corpo Negro

Lei da Radiação, Planck imaginou que existem osciladores na superfície do C.N, relacionados as cargas dentro das moléculas e fez duas suposições audaciosas sobre a natureza desses osciladores.

1º A energia do oscilador é quantizada: somente certos valores de energia são admitidos e dados pela expressão.

$$E_n = n \cdot h \cdot f \quad \text{onde } n = 0, 1, 2, \dots$$

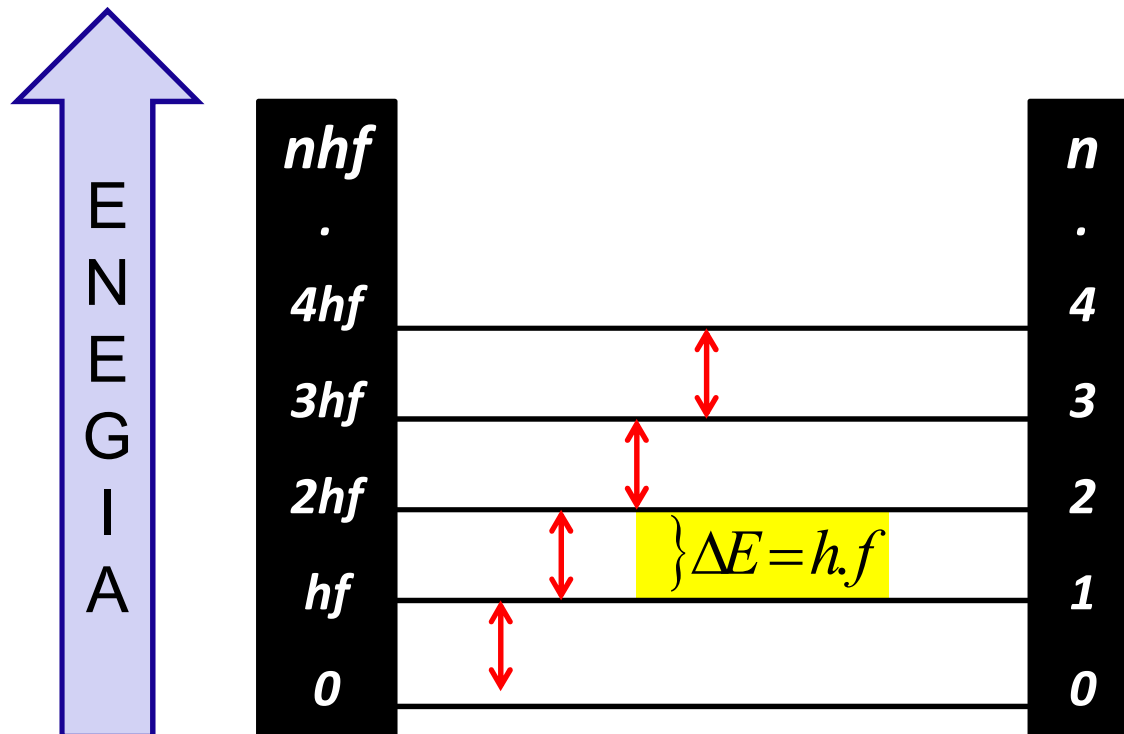
2º Os osciladores emitem ou absorvem energia em unidades discretas (quantum).

Osciladores emitem ou absorvem essas unidades de energia realizando uma transição de um estado quântico para outro. Essa ΔE entre os estados inicial e final é emitida como um único quantum de radiação (pacote de energia ou fóton!)

Radiação de Corpo Negro

Um oscilador emite ou absorve energia apenas quando muda de estados quânticos. Se permanecer em um estado quântico, nenhuma energia é absorvida ou emitida.

$$E_n = n \cdot h \cdot f \quad n = 0, 1, 2, \dots$$



A ideia chave na teoria de Planck:
quantização da energia!

Estava iniciando uma revolução na compreensão do átomo e o caminho para o modelo atômico de Bohr (1913), estava aberto!

Exemplo

- 1) Calcule a menor quantidade de energia radiante que um corpo pode emitir:
 - a) de luz azul cujo comprimento de onda é 470 nm;
 - b) de luz vermelha cujo comprimento de onda é 700 nm.

2) Uma fonte de radiação é constituída por elétrons em estado excitado que, ao retornarem, ao estado fundamental emitem ondas eletromagnéticas de frequência igual a $2,0 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$.

Calcule, em joules, a energia transportada por um quantum dessas radiação. Considere $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}$.

3) O comprimento de onda de um fóton com energia de 6600 eV é de:

a) $4,80 \cdot 10^{-48} m$

b) $3,00 \cdot 10^{-32} m$

c) $3,00 \cdot 10^{-29} m$

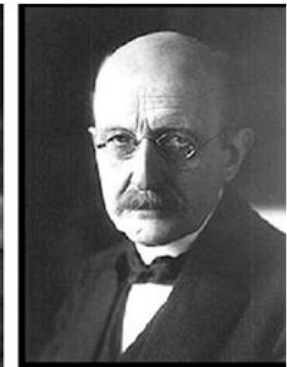
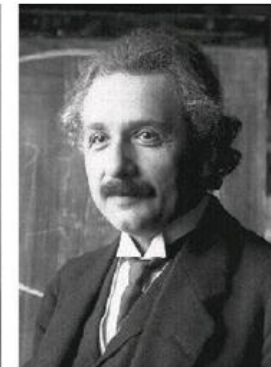
d) $1,87 \cdot 10^{-13} m$

e) $1,87 \cdot 10^{-48} m$

Corpo Negro e a Física Quântica

Planck acreditava que a sua hipótese era apenas um **artifício matemático**, e que o fenômeno de radiação do CN ainda viria a ser explicado de uma outra forma. Ele mesmo tentou obter uma outra explicação, por muitos anos, sem saber que havia dado início a uma profunda e inovadora compreensão da natureza da matéria e energia.

- O Corpo Negro
- A Teoria dos Quanta
- O Efeito Fotoelétrico
- O Átomo de Bohr
- A Natureza da luz
- A Dualidade onda-partícula
- O Princípio da incerteza.



Radiação Cósmica de Fundo



O que é? A Radiação Cósmica de Fundo é uma forma de radiação de OEM que apresenta a distribuição espectral de um corpo negro a uma temperatura de 3 K.

O que representa? Constitui uma evidência muito grande da teoria do Big Bang, uma prova de que o universo no passado era muito mais denso e quente do que é hoje.

Previsão Teórica (1948): George Gamov, Ralph Alpher e Robert Herman.

Confirmação Experimental (1965): Arno Penzias e Robert Wilson.

Para a máx. intensidade da radiação, qual é o seu comprimento de onda? qual faixa do espectro OEM se encontra?

Max Karl Ernst Ludwig PLANCK



“A ciência é a aproximação progressiva do Homem com o mundo real.”

1) Complete a tabela abaixo, para corpos que podem ser modelados pela Radiação de Corpo Negro e que apresentam espectros irradiado listados na tabela.

	Espectro OEM	λ	f (Hz)	T (K)
a)	Ondas de Rádio	3 m	$1,0 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
b)	Microondas	3 cm	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$
c)	Infravermelho	1 μm	$3,0 \cdot 10^{14}$	$3,0 \cdot 10^3$
d)	Vermelho	700 nm	$4,2 \cdot 10^{14}$	$4,2 \cdot 10^3$
e)	Violeta	400 nm	$7,5 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^3$
f)	Ultravioleta	300 nm	$1,0 \cdot 10^{15}$	$1,0 \cdot 10^4$
g)	Raios X	0,3 nm	$1,0 \cdot 10^{18}$	$1,0 \cdot 10^7$

Cálculo da f (Hz)

$$c = \lambda \cdot f$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Cálculo da T (K)

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$$

$$T = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ (m.K)}}{\lambda \text{ (m)}}$$

2) A cor de uma estrela é uma função da sua temperatura superficial o que caracteriza seu tipo espectral. Considerando o modelo de Radiação de Corpo Negro, complete a tabela abaixo.

Classificação Espectral							
Tipo Espectral	T (K) Superfície	Estrela	Constelação	A-L	λ_{\max} (m)	f (Hz)	Cor Superficial
O9	50.000	Mintaka- δ	Órion	916,1	$5,79 \cdot 10^{-8}$	$5,17 \cdot 10^{-15}$	Azul
B8	28.000	Rigel- β	Orion	772,2	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$2,89 \cdot 10^{-15}$	Branco-Azulada
A0	10.000	Sírius- α	Cão Maior	8,6	$2,89 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-15}$	Branca
F5	8.000	Procyon- α	Cão Menor	11,4	$3,62 \cdot 10^{-7}$	$8,28 \cdot 10^{-14}$	Branco-Amarelo
G0	6.000	Sham- α	Sagitário	473,3	$4,83 \cdot 10^{-7}$	$6,21 \cdot 10^{-14}$	Amarelo
K5	5.000	Aldebaran- α	Touro	65,1	$5,79 \cdot 10^{-7}$	$5,17 \cdot 10^{-14}$	Laranja
M1	3.000	Antares- α	Escorpião	603,9	$9,66 \cdot 10^{-7}$	$3,10 \cdot 10^{-14}$	Vermelho

Cálculo da f (Hz)

$$c = \lambda \cdot f$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Cálculo do T (K)

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$$

$$\lambda = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ (m.K)}}{T \text{ (K)}}$$

3) A temperatura de sua pele é de aproximadamente 35°C. Qual é o pico do comprimento de onda da radiação que a pele emite?

A partir da lei do deslocamento de Wien

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$$

$$\lambda = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}}{308 \text{ K}}$$

$$\lambda = \frac{289,8 \cdot 10^{-5} \text{ m.K}}{308 \text{ K}}$$

$$\lambda = 0,941 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$\lambda = 9,41 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\lambda = 9,41 \cdot \mu \text{ m}$$

$$T_c = T_K - 273$$

$$35 = T_K - 273$$

$$T_K = 35 + 273$$

$$T_K = 308 \text{ K}$$

Lembre: o espectro visível vai de **700nm** a **400nm** (**0,7μm** a **0,4 μm**)
Logo temos que um $\lambda = 9,41 \mu \text{ m}$, está na região do **INFRAVERMELHO!**

4) A temperatura de sua pele é de aproximadamente 35°C. Qual é a potência total emitida por sua pele, supondo que ela o faz como um corpo negro?

1ª Etapa: precisamos fazer uma estimativa da área superficial de sua pele “A”. Podemos fazer isto, modelando seu corpo como se fosse uma caixa retangular de altura 2 m, largura 0,3 m e profundidade 0,2 m.

$$A = 2.(2\text{m}).(0,3\text{m}) + 2.(2\text{m}).(0,2\text{m}) + 2. (0,3\text{m}).(0,2\text{m}) = 2\text{m}^2$$

1ª Etapa: Aplicar a Lei de Stefan

$$P = \sigma \cdot A \cdot e \cdot T^4$$

$$P = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot 2 \text{ m}^2 \cdot 1 \cdot (308 \text{ K})^4$$

$$P = 1 \cdot 10^{+11} \cdot 10^{-8} \text{ W}$$

$$P = 1,0 \cdot 10^{+3} \text{ W}$$

$$P = 1.000 \text{ W}$$

Análise do Resultado: você esta irradiando através da sua pele aproximadamente o mesmo que **10 lâmpadas de 100 W!**

Mas porque você não esta brilhando?

5) O Sol possui uma temperatura superficial de 5.800 K. Sabendo que pode ser modelado a partir da radiação de corpo negro, determine:

a) Em qual λ ocorre o máximo na distribuição da emissão solar;

b) A potência total irradiada por unidade de área, na superfície do sol.

a) Pela Lei de Wien

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$$

$$\lambda = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}}{5.800 \text{ K}}$$

$$\lambda = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}}{5,8 \cdot 10^3 \text{ K}}$$

$$\lambda = 0,51 \cdot 10^{-6} \text{ m ou } 0,5 \mu\text{m}$$

b) Pela Lei de Stefan-Boltzmann

$$P = \sigma \cdot A \cdot e \cdot T^4$$

$$\frac{P}{A} = \sigma \cdot e \cdot T^4$$

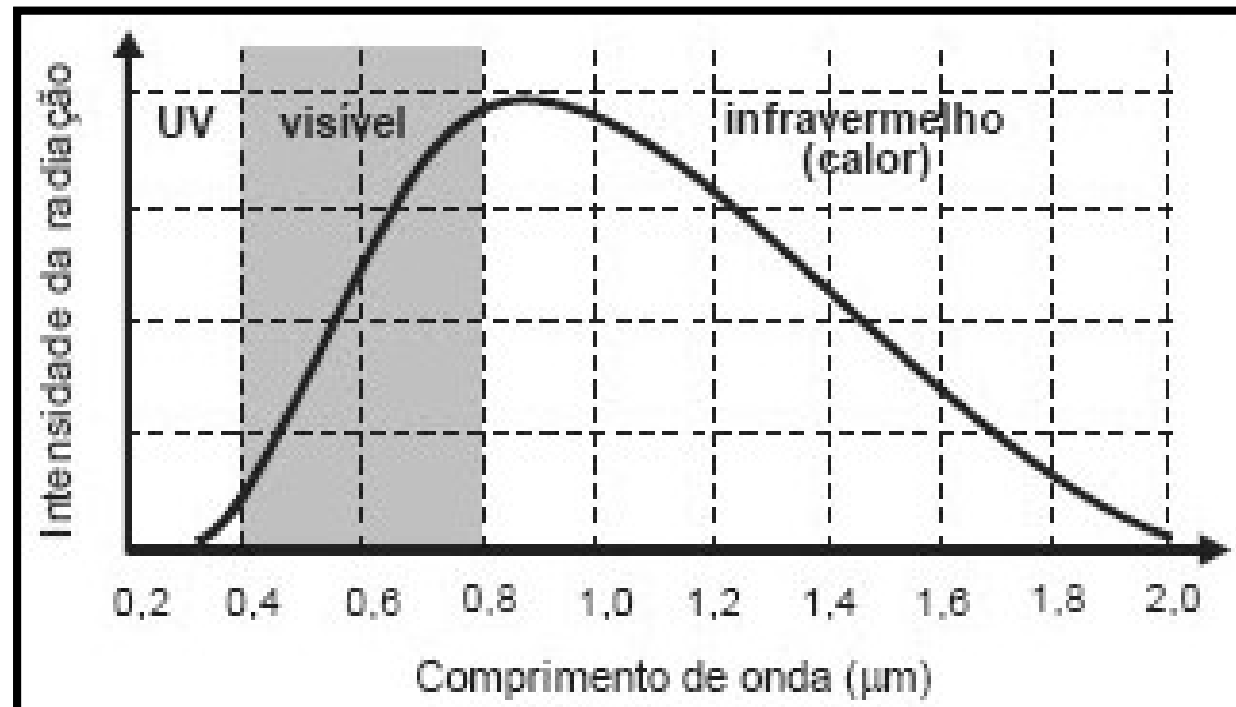
$$\frac{P}{A} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot (5,8 \cdot 10^3)^4$$

$$\frac{P}{A} = 6,4 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

Lembre: o espectro visível vai de 700nm a 400nm (0,7 μm até 0,4 μm), logo um $\lambda = 0,5 \mu\text{. m}$, esta na região visível!

6) A Figura abaixo representa a curva de distribuição da energia irradiada por uma lâmpada incandescente de filamento de Tungstênio a temperatura de 3.000 K.

- Em qual comprimento de onda a emissão é máxima?
- Qual é a potência irradiada por unidade de área?
- Estime quanto é aproveitado em energia luminosa do total de energia irradiada pela lâmpada.
- Essa lâmpada rende mais como aquecedor ou iluminador?



6) Resolução

a) Pela Lei de Wien

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$$

$$\lambda = \frac{2,989 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}}{3.000 \text{ K}}$$

$$\lambda = \frac{2,989 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}}{3,0 \cdot 10^3 \text{ K}}$$

$$\lambda = 0,996 \cdot 10^{-6} \text{ m ou } 0,9 \mu\text{m}$$

$$\lambda = 0,9 \mu\text{m}$$

O espectro visível vai de

700nm - **400nm**

(0,7μm - 0,4 μm)

logo $\lambda = 0,9 \mu\text{m}$ está na região do **INFRAVERMELHO!**

b) Lei de Stefan-Boltzmann

$$\frac{P}{A} = \sigma \cdot e \cdot T^4$$

$$\frac{P}{A} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot (3,0 \cdot 10^3)^4$$

$$\frac{P}{A} = 461,7 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$$

c) Pela trigonometria

$$\frac{P_{\text{luz}}}{P_{\text{tot}}} = \frac{2}{6 + 2} = \frac{2}{8} = 0,25 \text{ ou } 25\%$$

d) Aquecedor ou iluminador?

Com somente 25% da energia irradiada sob a forma de luz e 75% sob a forma de calor é melhor como AQUECEDOR.

7) Uma lâmpada de sódio com potência (P) de 100 W irradia energia ($\lambda = 589 \text{ nm}$) uniformemente em todas as direções.

a) Quantos fótons por segundo (R) são emitidos pela lâmpada?

b) A que distância da lâmpada uma tela totalmente absorvente absorve fótons à razão (ou fluxo: F) de 1,00 fóton/(cm^2s) ?

c) Qual é o fluxo de fótons, F (por unid. de área e de tempo), em uma pequena tela situada a 2,00 m da lâmpada?

$$\text{a) } P = R E = R h \nu = R h \frac{c}{\lambda} \rightarrow R = \frac{\lambda P}{h c} = \frac{(589 \times 10^{-9} \text{ m}) \times (100 \text{ W})}{(6,63 \times 10^{-34} \text{ Js})(3 \times 10^8 \text{ m/s})} \approx 2,96 \times 10^{20} \text{ fótons/s}$$

$$\text{b) } F = \frac{R}{4\pi r^2} \rightarrow r = \left(\frac{R}{4\pi F} \right)^{1/2} = \left(\frac{2,96 \times 10^{20} \text{ fótons/s}}{4\pi \times 10^4 \text{ fótons}/(\text{m}^2\text{s})} \right)^{1/2} \approx 4,85 \times 10^7 \text{ m}$$

onde: $F = 1 \text{ fóton}/(\text{cm}^2\text{s}) = 10^4 \text{ fótons}/(\text{m}^2\text{s})$

$$\text{c) } F = \frac{R}{4\pi r^2} = \frac{2,96 \times 10^{20} \text{ fótons/s}}{4\pi (2 \text{ m})^2} \approx 5,89 \times 10^{18} \text{ fótons}/(\text{m}^2\text{s})$$

Referências Bibliográficas

BONJORNO, Clinton. **Física 3: Eletrodinâmica, Eletromagnetismo e Física Moderna**. 2ª ed. São Paulo: FTD, 2013.

EISBERG, R., RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Partículas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979 – 29ª reimpressão.

KAZUHITO, Yamamoto; SHIGEKIYO, Carlos T.; FUKU, Luiz Felipe. **Alicerces da Física**. 10. ed. São Paulo: Scipione, 2011.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica**, vol. 4: ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blucher. 2014.

RAMALHO, F. J. NICOLAU, G. F.; TOLEDO, P. A. S. **Os Fundamentos da Física**. Vol.1. 7ª ed. Editora Moderna, 2010.



Efeito Fotoelétrico

Prof. Isaías Fernandes Gomes
2019.2

Efeito Fotoelétrico: breve histórico

Física Moderna:

1. *Marie Curie;*
2. *Max Planck;*
3. *Albert Einstein;*
4. *Ernest Rutherford;*
5. *Niels Bohr;*
6. *Louis Victor (De Broglie);*
7. *Werner Heisenberg;*

Apoia-se basicamente em duas teorias.

- Quanta (Max Planck) – 1900;
- Relatividade (Albert Einstein) – 1905.

Física Clássica

Desenvolvida antes de 1900

- Mecânica Newtoniana
- Termodinâmica
- Eletromagnetismo

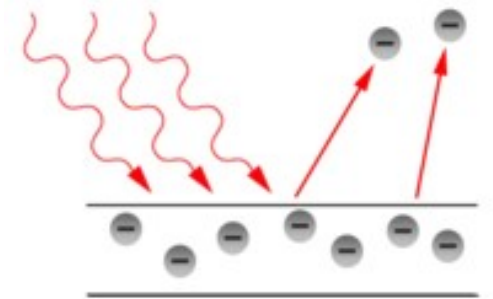
Física Moderna

Desenvolvida de 1900 até hoje

- Mudança radical de alguns conceitos físicos (quebra de paradigmas).
- Rápido progresso tecnológico.

Efeito Fotoelétrico

O efeito fotoelétrico consiste na emissão de partículas carregadas (elétrons, íons) de um meio material qualquer que absorva radiação eletromagnética (luz visível, ultravioleta, raios X etc.).



Heinrich Hertz

- Foi descoberto por H. Hertz, de forma acidental, em 1887 ao realizar o seu experimento de geração de ondas eletromagnéticas em laboratório (a luz é uma onda).
- Hertz percebeu que a incidência de luz ultravioleta sobre a superfície de um metal produzia descargas elétricas (centelhas);

Efeito Fotoelétrico: breve histórico

A **ENERGIA RADIANTE** não é emitida (ou absorvida) de modo contínuo, como em geral imaginamos, mas sim em porções descontínuas, “partículas” que transportam, cada qual, uma quantidade de energia **E** bem definida. Essas “partículas” de energia foram denominadas fótons. A energia **E** de cada fóton é denominada quantum (no plural quanta).

O que é Quanta? é o *plural de quantum, palavra latina que significa “quantidade”*.

O quantum **E** de energia radiante de frequência **f** é dado por:

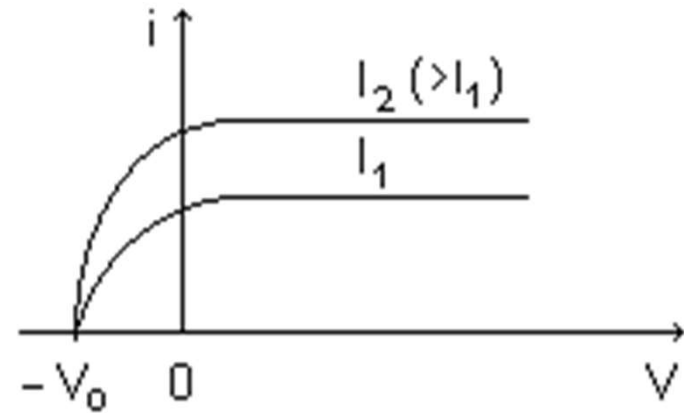
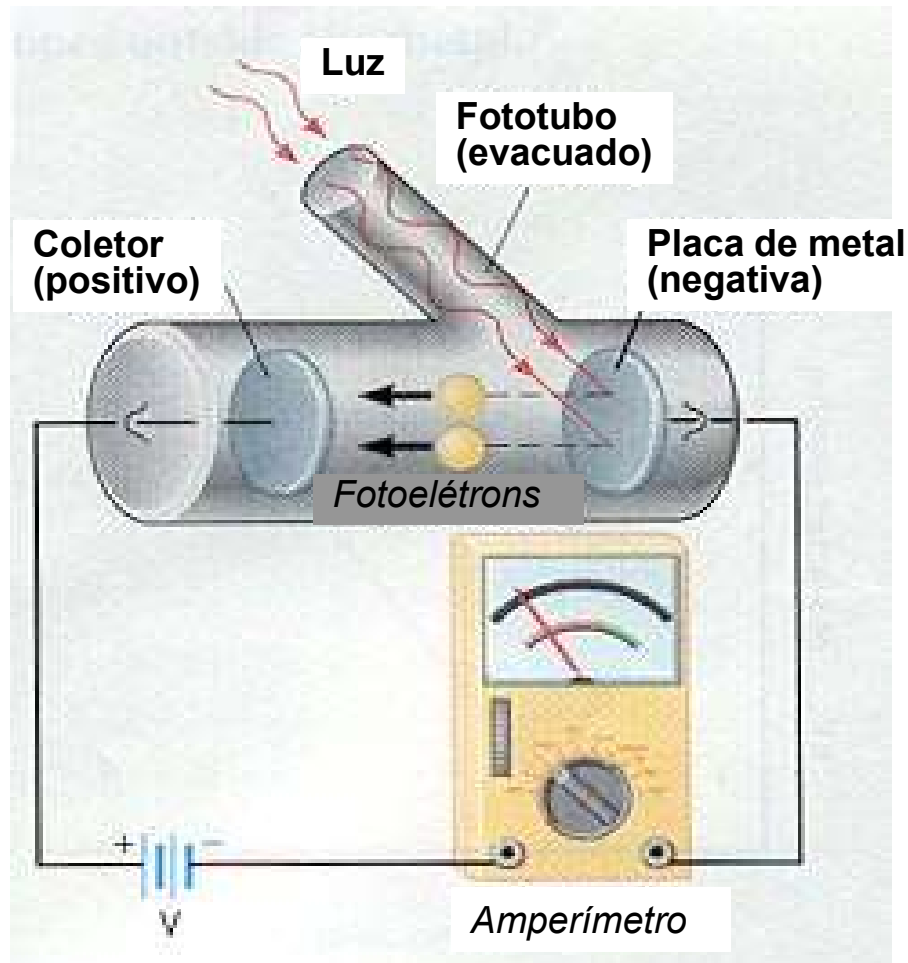
$$E = h \cdot f$$

h é a *Constante de Planck*

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ j}\cdot\text{s} \quad \text{ou} \quad h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

PLANCK, Max Karl Ernst Ludwig (1858-1947), físico alemão. Dedicou-se ao estudo de Irradiação Térmica, Óptica e Termodinâmica. Formulou a Teoria dos Quanta (Prêmio Nobel -1918).

Efeito Fotoelétrico: o fenômeno

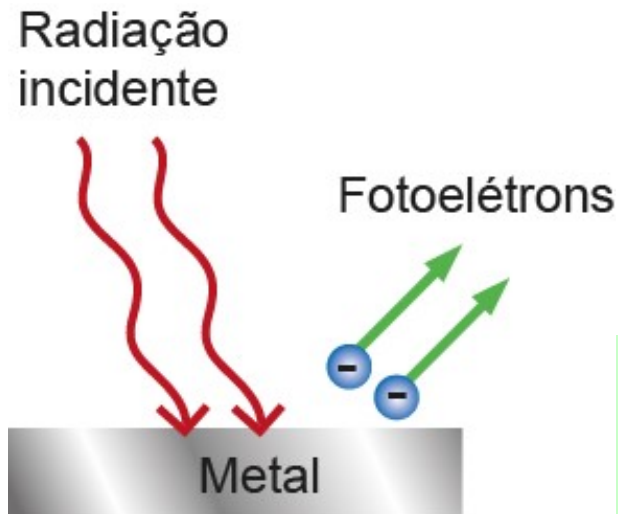


Energia cinética máxima:

$$K_{max} = eV_{corte}$$

O Problema: A luz composta de pacotes de energia (fótons), ao atingir uma chapa metálica gera uma corrente elétrica, pois libera elétrons da placa. Alguns raios provocam o efeito fotoelétrico outros não. Por quê?

Efeito Fotoelétrico: explicação de Einstein



Conceito: é quando uma radiação eletromagnética incide sobre a superfície de um metal, arrancando elétrons dessa superfície.

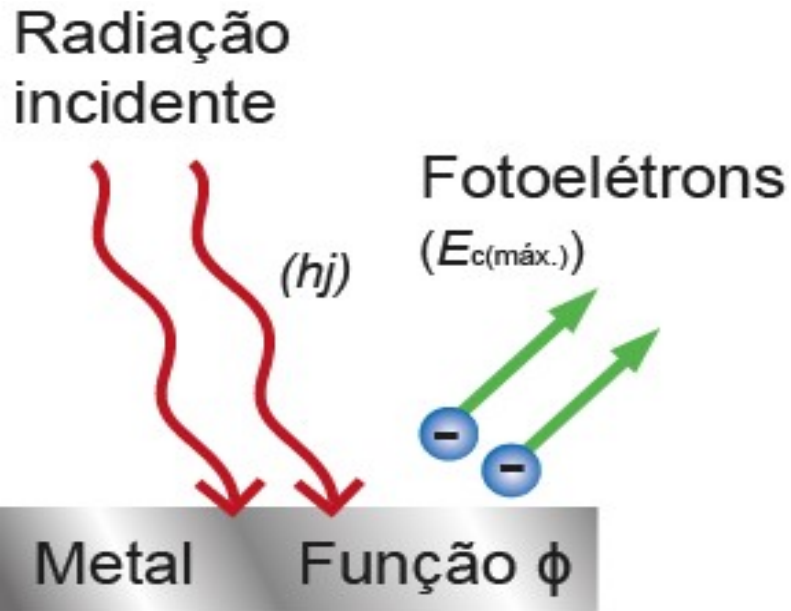
Fotoelétrons: são os elétrons arrancados da superfície metálica.

Explicação de Einstein considerando a quantização da energia: um fóton da radiação incidente, ao atingir o metal, é completamente absorvido por um único elétron, cedendo-lhe sua energia hf . Com essa energia adicional o elétron pode escapar do metal.

Importante!

Einstein em sua teoria sugere que a luz ou outra forma de energia radiante é composta de “partículas” de energia, os **fótons**.

Efeito Fotoelétrico: equação



A Energia dos Fótons (hf) é absorvida pelos elétrons do metal que vencem a barreira da energia Φ do mesmo, adquirindo energia cinética (E_c) na emissão.

$$E_{c(máx)} = hf - \Phi$$

$\Phi \Rightarrow$ Função Trabalho

Representa a energia mínima necessária para um elétron escapar do metal.

Condições:

- $hf > \Phi$ há efeito fotoelétrico
- $hf < \Phi$ Não há efeito

Einstein, Albert (1879-1955), físico alemão. Em 1905, aos 26 anos, dentre outros trabalhos, publicou a teoria da Relatividade Especial, bem como a explicação do Efeito Fotoelétrico (Prêmio Nobel -1921).

Efeito Fotoelétrico: equação

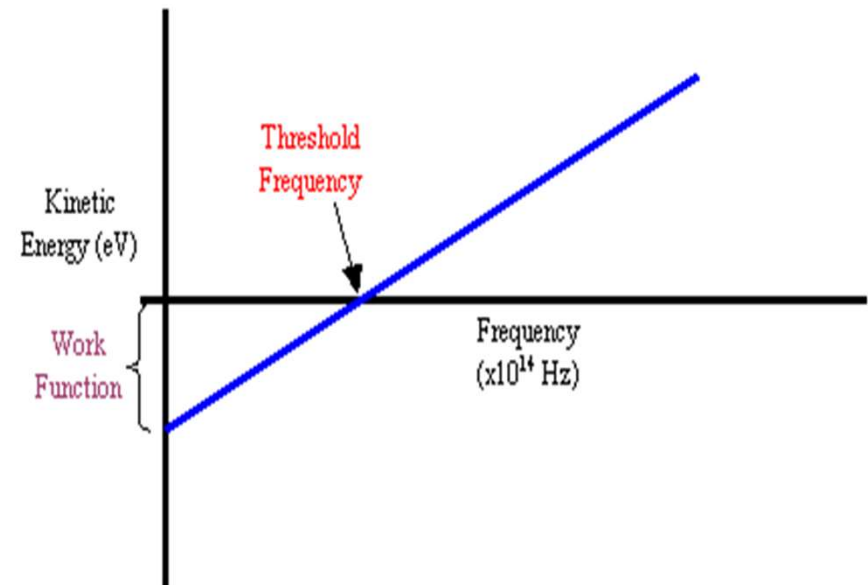
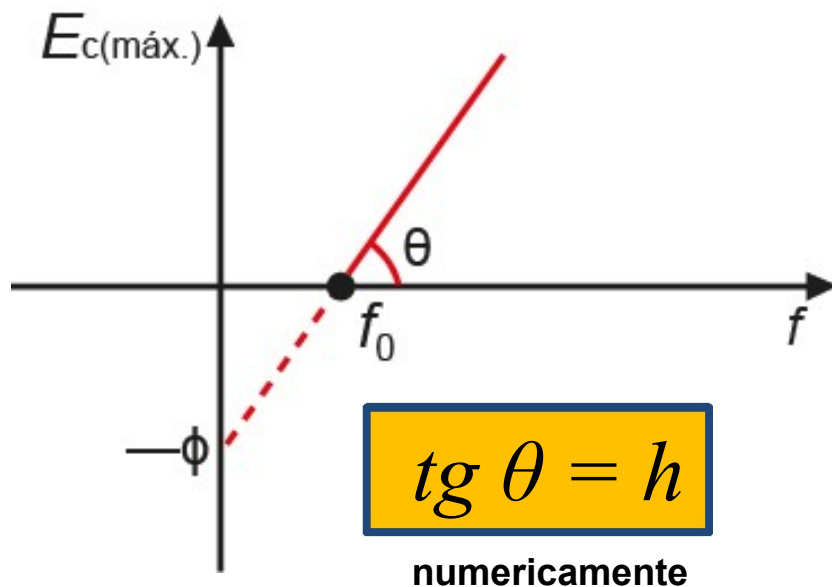
Equação do Efeito Fotoelétrico:

$$E_{c(máx)} = hf - \Phi$$

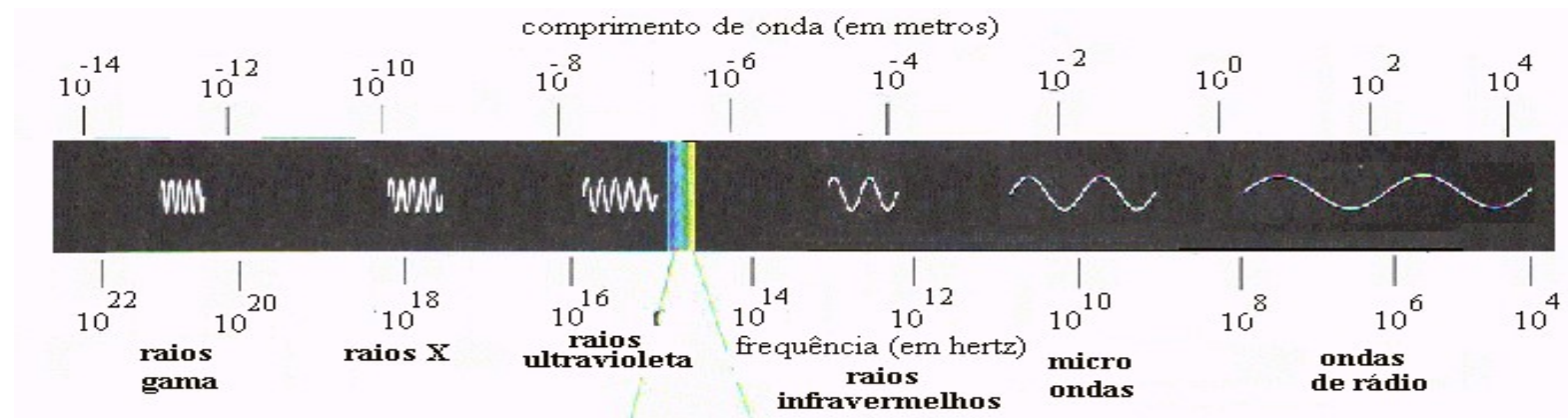
Freq. de Corte (f_0): representa a frequência mínima a partir da qual os elétrons escapam do metal.

$$\Phi = h \cdot f_0$$

Gráfico: E_c versus Frequência (f)



Efeito Fotoelétrico: frequência de corte



Metal		Frequência de Corte - f_0 (Hz)	Função Trabalho – ϕ (eV)
Sódio	Na	$5,50 \cdot 10^{14}$	2,28
Alumínio	Al	$9,8 \cdot 10^{14}$	4,08
Potássio	K	$4,22 \cdot 10^{14}$	1,75
Cobre	Cu	$1,13 \cdot 10^{15}$	4,70
Zinco	Zn	$1,04 \cdot 10^{15}$	4,31
Prata	Ag	$1,14 \cdot 10^{15}$	4,73
Platina	Pt	$1,53 \cdot 10^{15}$	6,35
Chumbo	Pb	$1,0 \cdot 10^{15}$	4,14
Ferro	Fe	$1,09 \cdot 10^{15}$	4,50

Efeito Fotoelétrico: questionamentos

- 1) Uma luz mais intensa, mais brilhante, arrancará mais elétrons de uma superfície metálica que uma luz mais fraca de mesma frequência ?
- 2) Uma luz de alta frequência ejetará um maior número de elétrons do que uma luz de baixa frequência?
- 3) Por que uma luz vermelha muito intensa não transfere mais energia a um elétron ejetado do que um fraco feixe de luz ultravioleta?
- 4) A intensidade de um feixe de luz depende fundamentalmente da frequência dos fótons ou do número deles?
- 5) Queimaduras solares produzem danos às células da pele. Por que a radiação ultravioleta é capaz de produzir tais danos, enquanto a radiação visível, ainda que muito intensa não é capaz?

Efeito Fotoelétrico

Física Clássica

Física Moderna

PROBLEMA DA INTENSIDADE

- Maior a intensidade da luz;
- Maior o módulo do vetor campo elétrico;
- Maior a força sobre o elétron ($F = q.E$);
- Conclusão: os elétrons ejetados deveriam ter mais E_c .

- Maior intensidade da luz; aumenta apenas o número de fótons;
- Conclusão: a E_c máx. que cada elétron pode receber de um fóton na “colisão” é a mesma.

PROBLEMA DA FREQUÊNCIA

O efeito deveria ocorrer para qualquer frequência, bastando que a luz fosse intensa o suficiente. Porém, há a frequência de corte, abaixo da qual não há efeito.

Os elétrons de condução se mantêm no metal por causa do campo elétrico. Então, para ser ejetado o elétron tem que receber uma energia mínima Φ .

PROBLEMA DO RETARDO NO TEMPO

Se a luz for pouco intensa, haverá um retardo de tempo mensurável entre o instante em que a onda atinge a superfície da luz e o instante em que o elétron emerge.

Este problema não existe para os fótons. A transferência se dá como em uma colisão, toda de uma vez.

Efeito fotoelétrico: resumo e aplicações

O Efeito Fotoelétrico depende da:

- **frequência** (f) e não da intensidade (**A**mplitude).
- **função trabalho** do material, a energia do fóton deve ser maior que a função trabalho ($hf > \Phi$)

Quanto maior a frequência do fóton incidente maior a energia cinética (E_c) do elétron ejetado.

Por isso os raios infravermelhos não provocavam o efeito fotoelétrico enquanto os raios ultravioletas sim.

1. Você sabe o que é um chip CCD usado em câmeras digitais?
2. Você sabe como é o controle de portas de elevadores? E as portas dos shoppings?
3. Você sabe como funciona uma o acionamento de lâmpadas em postes?
4. O que dizer do funcionamento das esteiras de caixas de supermercado?

01) (UFRGS) "De acordo com a teoria formulada em 1900 pelo físico alemão Max Planck, a matéria emite ou absorve energia eletromagnética de maneira emitindo ou absorvendo, cuja energia é proporcional à da radiação eletromagnética envolvida nessa troca de energia."

Assinale a alternativa que, pela ordem, preenche corretamente as lacunas:

- a) contínua - quanta - amplitude
- b) descontínua - prótons - frequência
- c) descontínua - fótons - frequência
- d) contínua - elétrons - intensidade
- e) contínua - nêutrons - amplitude

Resposta: C

02) O ano de 1900 pode ser considerado o marco inicial de uma revolução ocorrida na Física do séc. XX. Naquele ano, Max Planck apresentou um artigo à Sociedade Alemã de Física, introduzindo a ideia da da energia, da qual Einstein se valeu para, em 1905, desenvolver sua teoria sobre o efeito fotoelétrico. Qual palavra preenche corretamente a lacuna acima?

- a) Conservação;
- b) Transformação;
- c) Quantização;
- d) Propagação;
- e) Conversão.

Resposta: C

04) Qual das afirmações abaixo explica corretamente o efeito fotoelétrico?

- a) Choque elétrico entre as partículas leves e núcleos.**
- b) Produção de raios X, quando há choque de elétrons em uma placa de metal.**
- c) Produção de luz por modificação energética de um sistema atômico.**
- d) Ejeção de elétrons de uma superfície metálica por incidência de radiação eletromagnética.**
- e) Nenhum dos fenômenos acima.**

Resposta: D

05) A emissão de fotoelétrons por um determinado metal exige que:

- a) A luz incidente tenha uma frequência maior que um determinado valor.**
- b) A luz incidente tenha um comprimento de onda superior a um determinado valor.**
- c) A temperatura do metal esteja próximo à de sua temperatura de fusão.**
- d) A luz incidente tenha uma intensidade superior a um determinado valor.**
- e) O metal não esteja ligado à Terra.**

Resposta: A

05) O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons pela matéria sob a ação de fótons (luz). Os elétrons emitidos possuem variadas energias, sendo os mais energéticos aqueles que estavam menos ligados ao material. Considerando um feixe de luz coerente (única frequência), incidindo sobre a superfície de um material, e que esteja produzindo o efeito fotoelétrico, é correto afirmar:

(001) A energia máxima em que os elétrons são emitidos não depende da frequência do feixe de luz incidente.

(002) Quanto maior for a intensidade do feixe da luz incidente, maior a taxa de emissão de elétrons.

(004) A energia de um feixe de luz não depende do comprimento de onda da luz.

(008) A emissão de elétrons é explicada pela teoria ondulatória da luz.

(016) Os elétrons são emitidos porque absorvem energia dos fótons durante a colisão.

Resposta: 018

Efeito fotoelétrico: resumo e aplicações

06) Quais das seguintes substâncias, Ta (4,2), W (4,5), Ba (2,5), Li (2,3) (função trabalho, em eV, entre parênteses), podem ser usadas para confeccionar uma fotocélula para ser usada com luz visível? Os valores aproximados dos comprimentos de onda (em nm) no visível são apresentados na tabela abaixo

Violeta	Azul	Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho
425	475	525	575	625	675

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$E = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{425 \cdot 10^{-9}}$$

$$E = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{0,425 \cdot 10^{-6}}$$

$$E = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 7,05 \cdot 10^{+8 - (-6)}$$

$$E = 29,19 \cdot 10^{-15} \cdot 10^{+14}$$

$$E = 29,19 \cdot 10^{-1} eV$$

$$E = 2,92 eV$$

Resposta: Apenas Ba e Li

Efeito fotoelétrico: resumo e aplicações

07) Determine a energia cinética máxima dos fotoelétrons se a função trabalho do material é de 2,3 eV e a frequência da radiação é de $3,0 \cdot 10^{15}$ Hz.

$$E = h \cdot f$$

$$E = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3,0 \cdot 10^{15}$$

$$E = 12,42 \cdot 10^0$$

$$E = 12,42 \text{ e.V}$$

$$E_{c(máx)} = hf - \Phi$$

$$E_{c(máx)} = 12,42 - 2,3$$

$$E_{c(máx)} = 10,12 \text{ e.V}$$

Resposta: 10,12 eV

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

a) Verifique se ocorre emissão fotoelétrica quando sobre esse metal incide luz de comprimento de onda $\lambda = 6,0 \cdot 10^{-7}$ m. A constante de Planck é $h \approx 4,2 \cdot 10^{-15}$ eV.s e a velocidade da luz no vácuo é $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s.

b) Qual é a frequência mais baixa da luz incidente capaz de arrancar elétrons do metal?

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$E = 4,2 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{6,0 \cdot 10^{-7}}$$

$$E = 4,2 \cdot 10^{-15} \cdot 0,5 \cdot 10^{+8 - (-7)}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^{-15} \cdot 10^{+15}$$

$$E = 2,1 \text{ e.V}$$

$$E_{c(\text{máx})} = hf - \Phi \quad hf \geq \Phi$$

$$hf = \Phi \quad 2,5 = 4,2 \cdot 10^{-15} \cdot f$$

$$f = \frac{2,5}{4,2 \cdot 10^{-15}} = 0,595 \cdot 10^{+15} = 6,0 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

R^{ta}: a) não ocorrerá emissão ; b) $6 \cdot 10^{14}$ Hz

Efeito fotoelétrico: exercícios

09) O leitor precisa escolher um elemento para uma célula fotoelétrica que funcione com luz visível. Quais dos seguintes elementos são apropriados (a função trabalho aparece entre parênteses): Tântalo (4,2 eV); tungstênio (4,5 eV); alumínio (4,2 eV), bário (2,5 eV), lítio (2,3 eV)?

$$hf = K_{max} + \Phi \quad E = hf = \frac{hc}{\lambda} > \Phi$$

Luz visível: 400 nm até 700 nm

$$E = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8 / 4 \cdot 10^{-7}$$

$$E = 3,11 \text{ eV}$$

$$E = 4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8 / 7 \cdot 10^{-7}$$

$$E = 1,77 \text{ eV}$$

Importante
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ j}\cdot\text{s}$
 $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

Resposta: *bário (2,5 eV) e lítio (2,3 eV)*

Efeito fotoelétrico: exercícios

10) Uma lâmpada ultravioleta emite luz com um comprimento de onda de 400 nm, com uma potência de 400 W. Uma lâmpada infravermelha emite luz com um comprimento de onda de 700 nm, também com uma potência de 400 W.

(a) Qual das duas lâmpadas emite mais fótons por segundo?

(b) Quantos fótons por segundo emite esta lâmpada?

Nº. de fótons/s = potência / energia de cada fóton

$$N = \frac{P}{E} = \frac{P}{hf} = \frac{P\lambda}{hc}$$

Para ultravioleta (UV):

$$N_{uv} = \frac{P\lambda}{hc} = \frac{(400) \cdot (400 \times 10^{-9})}{(6,63 \times 10^{-34}) \cdot (3 \times 10^8)} \approx 8,05 \times 10^{20} \text{ fotons/s}$$

Para infravermelha (IR):

$$N_{ir} = \frac{P\lambda}{hc} = \frac{(400) \cdot (700 \times 10^{-9})}{(6,63 \times 10^{-34}) \cdot (3 \times 10^8)} \approx 1,4 \times 10^{21} \text{ fotons/s}$$

Referências Bibliográficas

BONJORNO, Clinton. **Física 3: Eletrodinâmica, Eletromagnetismo e Física Moderna**. 2ª ed. São Paulo: FTD, 2013.

EISBERG, R., RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Partículas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979 – 29ª reimpressão.

KAZUHITO, Yamamoto; SHIGEKIYO, Carlos T.; FUKU, Luiz Felipe. **Alicerces da Física**. 10. ed. São Paulo: Scipione, 2011.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica**, vol. 4: ótica, relatividade, física quântica. 2 ed. São Paulo: Blucher. 2014.

RAMALHO, F. J. NICOLAU, G. F.; TOLEDO, P. A. S. **Os Fundamentos da Física**. Vol.1. 7ª ed. Editora Moderna, 2010.