

www.cursodefisica.com.br



**Apostilas
Simulações
Exercícios
Experimentos
Humor
Biografias
Videos
e muito mais!**

O Portal da Física CF! respeita os direitos autorais. Caso algum material locado em nosso site lhe pertença e deseja que seja retirado do ar, contacte-nos: contato@cursodefisica.com.br

Física Moderna

Formas de Radiação: Emissores de Luz

Iremos estudar a irradiação de luz pelos corpos. A luz são ondas eletromagnéticas cujo comprimento vai de $4 \cdot 10^{-7}$ a $8 \cdot 10^{-7}$ m. As ondas eletromagnéticas irradiam-se quando o movimento das partículas carregadas é acelerado. Estas partículas carregadas fazem parte dos átomos que constituem a matéria. Mas, se não soubermos como é constituído o átomo, não poderemos dizer nada de concreto sobre o mecanismo da irradiação. Só sabemos que no interior do átomo não há luz, o que é semelhante a dizer que nas cordas de um piano não há som. A semelhança das cordas, que só começam a emitir som depois dos batimentos do martelo, os átomos só emitem luz depois de ser excitados.

Para que um átomo comece a irradiar é necessário transmitir-lhe uma determinada quantidade de energia. Ao irradiar, o átomo perde a energia que adquiriu e para que a matéria emita luz continuamente é necessária a afluência de energia do exterior.

Radiação térmica

A forma mais simples e mais difundida de radiação é a radiação térmica: a energia libertada pelos átomos sob a forma de luz é compensada pela energia do movimento térmico dos átomos (ou moléculas) do corpo que irradia. Quanto maior é a temperatura do corpo tanto mais rapidamente se movem os átomos. Quando os átomos rápidos (ou moléculas) colidem uns com os outros, parte da sua energia cinética transforma-se em energia de excitação dos átomos que depois irradiam luz.

A radiação solar é um exemplo de radiação térmica. Uma lâmpada habitual incandescente é um emissor térmico de luz. É um emissor muito cómodo, mas pouco económico. Só cerca de 12% de toda a energia libertada pelo filamento da lâmpada elétrica se transforma em energia luminosa. Finalmente, outro emissor térmico de luz é a chama. As partículas de fuligem (partes do combustível ainda não queimadas) tornam-se incandescentes, graças à energia libertada durante a combustão, e emitem luz.

Eletroluminescência

A energia, necessária aos átomos para a irradiação de luz, pode ser transmitida também por emissores não térmicos. Quando há descargas nos gases, o campo elétrico comunica aos elétrons uma grande quantidade de energia cinética. Os elétrons rápidos sofrem choques não elásticos com os átomos. Os átomos excitados libertam energia sob a forma de ondas luminosas. Graças a isso, as descargas do gás são acompanhadas de luminescência. Trata-se de eletroluminescência.

As auroras boreais constituem uma manifestação de eletroluminescência. Os fluxos de partículas carregadas, emitidas pelo Sol, são atraídos pelo campo magnético da Terra. Elas excitam os átomos das camadas superiores da atmosfera junto do pólo magnético da Terra e, graças a isso, estas camadas iluminam-se. A eletroluminescência utiliza-se nos tubos dos anúncios luminosos.

Luminescência catódica

A luminescência de corpos sólidos provocada por um bombardeamento de elétrons chama-se luminescência catódica. Graças a luminescência catódica iluminam-se os ecrãs dos tubos catódicos dos televisores.

Luminescência química

Quando se dão algumas reações químicas exotérmicas a parte da energia libertada transforma-se em energia luminosa. O emissor de luz mantém-se frio (à temperatura do meio onde se encontra). Este fenómeno chama-se luminescência química. Quase todos vós, provavelmente, já o conhecem. No Verão na floresta, durante a noite é possível ver um inseto curioso - o pirilampo. No seu corpo "luz" uma pequena lanterna verde. Vocês não queimam os dedos, se apanharem um pirilampo. A mancha luminosa

que se encontra nas costas do pirilampo tem praticamente a mesma temperatura que o ar à sua volta. A propriedade de se iluminarem é encontrada também noutros organismos vivos: bactérias, insetos e muitos peixes, que vivem a grandes profundidades, onde a luz solar não chega. Muitas vezes, no escuro, iluminam-se bocados de madeira em putrefação. Lamentavelmente, até agora não é possível construir emissores da luz econômicos, baseados nos princípios da luminescência química.

Fotoluminescência

Parte da luz que incide na matéria reflete-se e outra parte absorve-se. A energia da luz que é absorvida, na maioria dos casos, provoca apenas o aquecimento do corpo. No entanto, alguns corpos começam imediatamente a emitir luz sob ação da radiação que incide neles. Trata-se da fotoluminescência. A luz excita os átomos (aumenta a sua energia interna), depois do que eles próprios se iluminam. Por exemplo, as tintas luminosas que envolvem muitos brinquedos da árvore de Natal, irradiam luz depois de submetidos a radiação.

A luz irradiada por fotoluminescência tem, em regra, um comprimento de onda maior do que a luz que causou a luminescência. Isto pode ser verificado experimentalmente. Se dirigirmos para um recipiente com tinta fluorescente (orgânica) um fluxo luminoso, que se fez passar através de um filtro da cor violeta, então este líquido começa a iluminar-se com luz verde-amarela, ou seja, a luz que tem um comprimento de onda maior do que o da luz violeta.

O fenômeno de fotoluminescência emprega-se nas lâmpadas de luz natural. As lâmpadas de luz natural são aproximadamente três a quatro vezes mais econômicas do que as habituais lâmpadas incandescentes.

2 Espectros e Instrumentos Espectrais

Distribuição da energia no espectro

Não existe nenhum emissor capaz de dar luz monocromática, ou seja, luz com um comprimento de onda rigorosamente definido. Isto é comprovado pelas experiências sobre a decomposição da luz no espectro com um auxílio de um prisma, bem como experiências sobre interferências ou difração.

A energia, que traz consigo a luz do emissor, distribui-se de uma forma determinada por ondas de todos os comprimentos, que entram na composição do fluxo luminoso. Pode dizer-se que a energia está distribuída segundo as frequências, visto que entre o comprimento de onda e a frequência existe uma relação simples:

$$\lambda \cdot f = c$$

Qualquer emissor de luz é caracterizado pela energia total que irradia por cada unidade de tempo. A energia irradiada não se distribui uniformemente entre as ondas de comprimentos diferentes. Por isso, a principal característica da radiação é a distribuição da energia emitida em cada unidade de tempo segundo os comprimentos de onda ou as frequências. Esta distribuição pode calcular-se experimentalmente. Por isso, com o auxílio de um prisma, pode obter-se o espectro da radiação, por exemplo, de um arco voltaico, e medir-se a energia luminosa que atravessa um pequeno

intervalo espectral de largura Δf . Ao avaliar a distribuição da energia, ainda que aproximadamente, não nos podemos basear na vista. A sensibilidade dos olhos à luz é seletiva. O seu máximo situa-se na zona amarela-verde do espectro. É melhor utilizar um corpo absolutamente negro que absorve quase totalmente a luz de todos os comprimentos de onda, de tal modo que a energia luminosa provoca o seu aquecimento. Basta medir a temperatura do corpo para se avaliar a quantidade de energia absorvida por unidade de tempo.

Um termômetro habitual é pouco sensível para que possa ser utilizado com êxito nestas experiências. São necessários instrumentos mais sensíveis para medir a temperatura. Pode usar-se um termômetro elétrico de resistência, no qual o elemento sensível é constituído por uma placa metálica fina. É necessário cobrir esta placa com uma camada fina de fuligem, que absorve quase totalmente a luz de qualquer comprimento de onda.

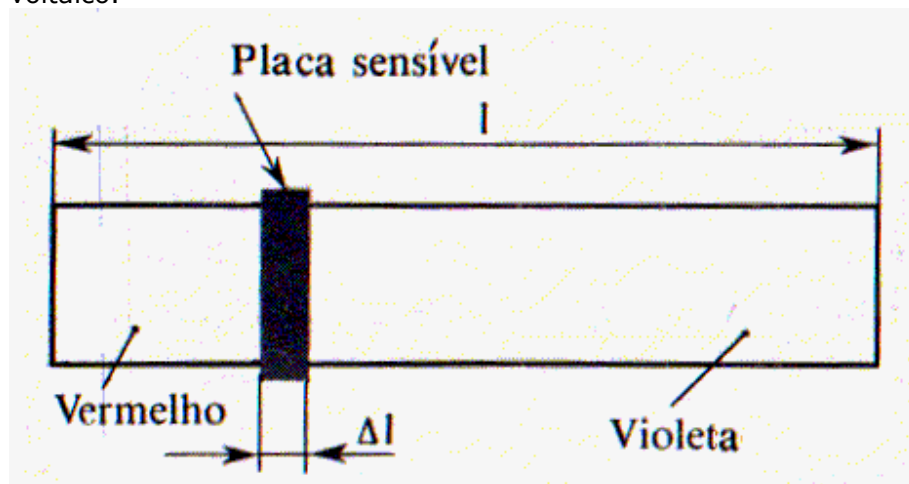
A placa do instrumento, sensível ao aquecimento, deve ser colocada no lugar do espectro (fig.1). A todo o espectro visível, de comprimento l , entre os raios vermelhos e os raios violeta, corresponde o intervalo de frequência de f_{vm} a f_{vi} . À largura Δl da placa negra corresponde um intervalo pequeno Δf . Pelo aquecimento da placa negra do instrumento é possível calcular a quantidade de energia luminosa, que corresponde ao intervalo de frequência Δf . Deslocando a placa ao longo do espectro, verificaremos que grande parte da energia vai para a zona vermelha do espectro e não para a amarela-verde, como nos parece à vista.

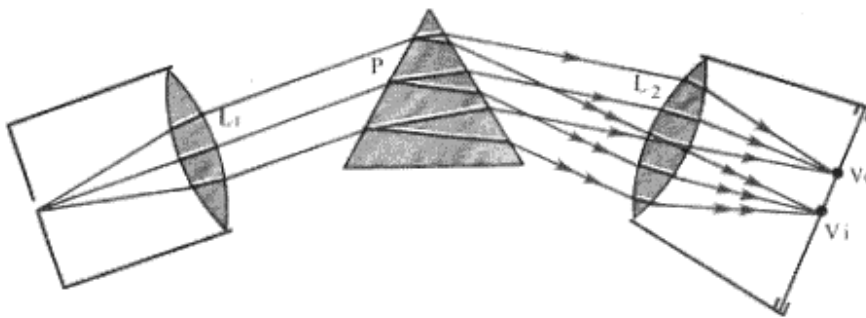
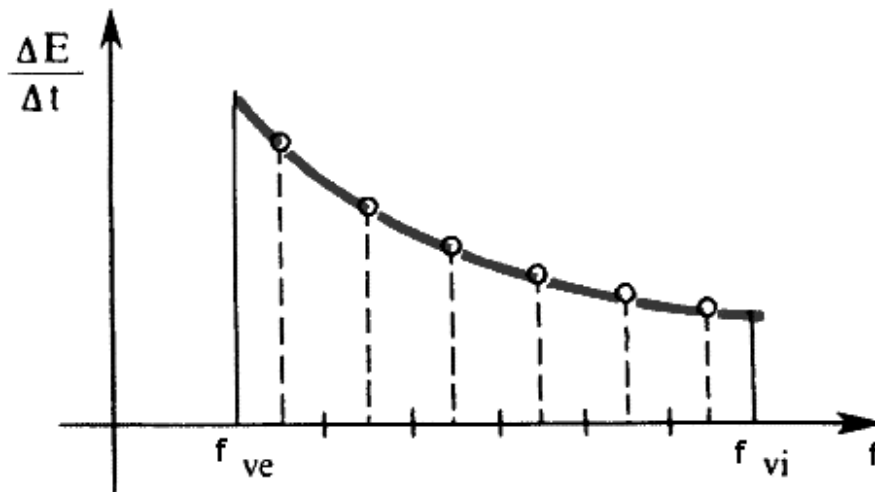
Pelo resultado destas experiências pode construir-se o gráfico de dependência da energia irradiada por unidade de tempo em relação à frequência. A energia irradiada é determinada pela temperatura da placa, enquanto que a frequência não é difícil de calcular se utilizarmos para a decomposição da luz um instrumento graduado, ou seja, se for conhecido a que frequência corresponde uma determinada zona do espectro.

Colocando no eixo das abcissas o valor das frequências, correspondentes aos centros dos intervalos Δf , e no eixo das ordenadas a energia

$$\frac{\Delta E}{\Delta t}$$

absorvida pelo instrumento por unidade de tempo, obtemos um conjunto de pontos, através dos quais podemos fazer passar uma curva lisa (fig.2). Esta curva dá-nos uma idéia concreta sobre a distribuição da energia na parte visível do espectro do arco voltaico.





Instrumentos espectrais.

Mecanismos simples, tais como uma fenda estreita, que limita um feixe luminoso, ou um prisma, já não são suficientes para observarmos com exatidão o espectro. Um dispositivo mais perfeito, composto por um prisma e uma lente, proposto por Newton, também não é completamente satisfatório. São necessários dispositivos que dêem um espectro nítido, ou seja, dispositivos que decomponham bem as ondas de comprimentos diferentes e que não permitam (ou quase não permitam) a sobreposição de zonas diferentes do espectro. Tais dispositivos têm o nome de instrumentos espectrais . Muitas vezes, a parte principal de um instrumento espectral é constituída por um prisma ou por uma rede de difração.

Vejam os esquemas de funcionamento do instrumento espectral prismático (fig. 3). A radiação investigada incide primeiro na parte do instrumento, que se chama colimador . Um colimador é um tubo que numa das pontas tem um biombo com uma fenda estreita, e na outra ponta uma lente convergente L_1 . A fenda encontra-se no plano focal da lente. Por isso, um feixe luminoso divergente que incida na lente através da fenda, sai dela como um feixe paralelo e incide no prisma P .

Visto que a diversas frequências correspondem índices de refração diferentes, então do prisma saem feixes paralelos, mas com uma direção diferentes. Eles incidem na lente L_2 . No plano focal desta lente encontra-se uma tela de vidro fosco ou uma chapa fotográfica. A lente L_2 , foca os raios dos feixes paralelos no écran e, no lugar de uma imagem da fenda, aparece uma série de imagens. A cada frequência (mais

precisamente, a cada estreito intervalo espectral) corresponde a sua imagem. Todas estas imagens juntas formam o espectro.

O instrumento descrito chama-se espectrógrafo . Se no lugar da segunda lente e do écran utilizarmos um tubo para observação visual do espectro, então o instrumento chama-se espectroscópio. Os prismas e outros detalhes dos instrumentos espectrais não são obrigatoriamente fabricados de vidro. No lugar do vidro utilizam-se materiais transparentes tais como o quartzo, o sal-gema e outros. É que o vidro, transparente para ondas eletromagnéticas do espectro visível, absorve fortemente as ondas de outros comprimentos.

Tipos de Espectros

A composição espectral da irradiação de diferentes substâncias é muito diversa. Mas, apesar disso, todos os espectros, como se viu experimentalmente, podem dividir-se em três tipos que se distinguem fortemente uns dos outros.

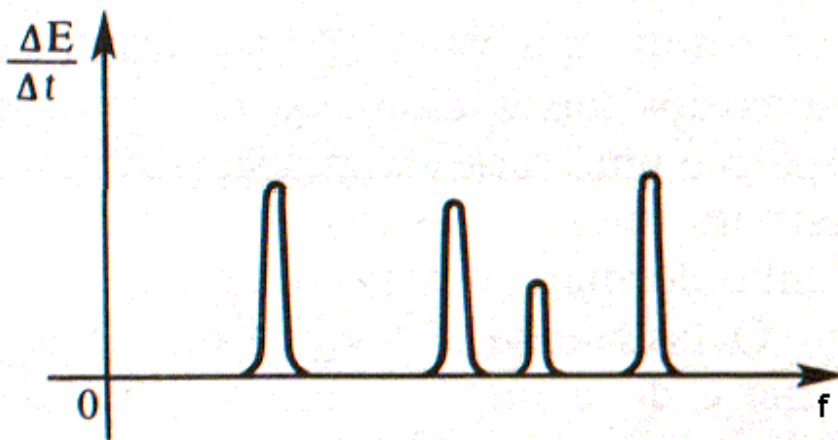
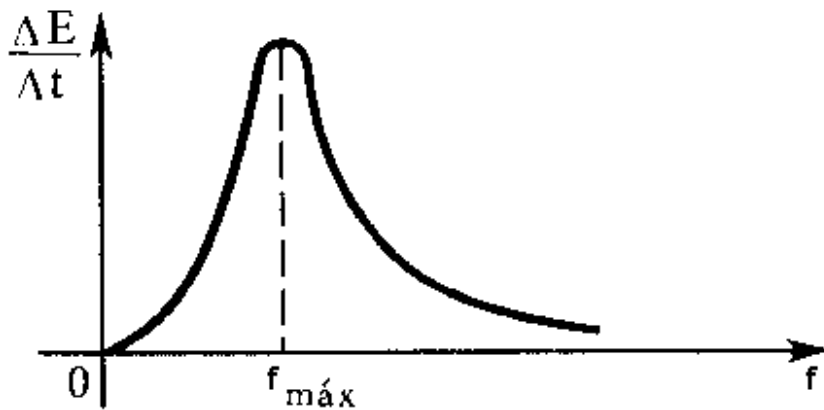
3 Espectros contínuos

O espectro solar ou o espectro de qualquer lanterna de arco é contínuo. Isto significa que no espectro se encontram todos os comprimentos de onda. No espectro não há rupturas e no écran do espectrógrafo pode ver-se uma risca contínua multicolor.

A distribuição da energia segundo a freqüência (ou comprimento de onda) para corpos diferentes varia. Por exemplo, um corpo com superfície muito negra irradia ondas eletromagnéticas de todas as freqüências, mas a curva da dependência da energia em ordem à freqüência atinge o máximo para uma determinada freqüência f_{\max} (fig. 4) . A energia de irradiação, que corresponde a freqüências infinitamente pequenas ($f \rightarrow 0$) e infinitamente grandes ($f \rightarrow \infty$) , é insignificante. Quando aumenta a temperatura, o máximo da energia de radiação desloca-se para o lado das ondas curtas.

Os espectros contínuos, como mostra a experiência, são dados pelos corpos que se encontram no estado sólido ou líquido. Para se obter um espectro contínuo é necessário aquecer o corpo a altas temperaturas.

O caracter de um espectro contínuo e o próprio fato da sua existência é determinado não só pelas propriedades de cada um dos átomos que irradiam, mas também pela interação destes átomos uns com os outros. Os gases não têm espectros contínuos. Os líquidos e os corpos sólidos diferenciam-se dos gases, em primeiro lugar, pelo fato dos seus átomos interagirem fortemente.



O espectro contínuo também é dado pelo plasma a altas temperaturas. as ondas eletromagnéticas são irradiadas pelo plasma quando chocam elétrons com íons.

Espectros de linhas

Coloquemos numa chama fraca de um bico de gás um pouco de amianto umedecido por uma solução de sal de cozinha. Quando observamos a chama através de um espectroscópio, no fundo de um espectro contínuo dificilmente visível destaca-se uma linha amarela brilhante. Esta linha amarela é nos dada pelo vapor de sódio que se forma quando as moléculas de sal se dissociam na chama. No suplemento a cores estão representados também o espectro do hidrogênio e do hélio. Cada um deles é constituído por uma série de linhas coloridas de intensidades diferentes, divididas por largas faixas escuras. Tais espectros chamam-se espectros de linhas . A existência de espectros de linhas significa que a substância analisada irradia luz com determinados comprimentos de onda (mais precisamente, determinados intervalos espectrais muito estreitos). Na figura 5 , vê-se um exemplo da distribuição da energia num espectro de linhas. Cada linha têm uma largura finita.

Os espectros de linhas são-nos dados por todas as substâncias que se encontram no estado gasoso atômico (mas não molecular). Neste caso, a luz é irradiada pelos átomos que, praticamente, não interatuam. É o tipo de espectros mais importantes.

Os átomos isolados de um dado elemento químico irradiam ondas de comprimentos rigorosamente determinados.

Em geral, para se observarem espectros de linhas, utiliza-se a luminescência de vapores em chamas ou de descargas num tubo, cheio do gás que se observa.

Quando aumenta a densidade do gás atômico, as linhas espectrais separadas alargam-se e, por fim, quando a densidade do gás é muito grande e a interação dos átomos se torna significativa, então estas linhas cobrem-se umas às outras, formando um espectro contínuo.

Espectros de faixas

Um espectro de faixas é composto por faixas separadas, divididas, por intervalos escuros. Com o auxílio de um instrumento espectral muito bom pode-se verificar que cada faixa é um conjunto de linhas situadas junto umas às outras.

Ao contrário dos espectros de linhas, os espectros de faixas são formados não por átomos, mas por moléculas isoladas ou com uma ligação fraca entre elas.

Para observação dos espectros moleculares, assim como para observação dos espectros de linhas, em geral, utiliza-se a emissão luminosa de vapor sob chamas ou de descargas em gases.

Espectros de absorção

Todas as substâncias, cujo átomos se encontram em estados excitados, irradiam ondas luminosas, cuja energia, de determinado modo, está distribuída segundo o comprimento de onda. A absorção da luz pelas substâncias também depende do comprimento de onda. Assim, o vidro vermelho deixa passar ondas que correspondem à luz vermelha ($\lambda \gg 8 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$) e absorve as outras ondas.

Se fizermos passar a luz branca através de um gás frio e não irradiante, no fundo do espectro contínuo do emissor aparecem linhas escuras. O gás absorve mais intensamente a luz que tem aquele comprimento de onda que o gás emite num estado bastante aquecido. As linhas escuras no fundo do espectro contínuo são linhas de absorção que formam no conjunto um espectro de absorção.

4 Análise Espectral

Os espectros de linhas têm um papel especial muito importante porque o seu carácter está ligado à estrutura do átomo. Pois estes espectros são formados pelos átomos que não experimentaram ações externas. Por isso, conhecendo os espectros de linhas, nós demos o primeiro passo no estudo da estrutura dos átomos. observando estes espectros, os cientistas tiveram a possibilidade de "olhar" para dentro do átomo. Aqui a óptica e a física atômica tocam-se.

A propriedade principal dos espectros de linhas consiste no fato dos comprimentos de onda (ou freqüências) de um espectro de linhas de qualquer substancia dependerem apenas das propriedades dos átomos desta substancia, e não das causas da emissão de luz pelos átomos. Os átomos de qualquer elemento químico dão-nos um

espectro que não é parecido com o espectro dos outros elementos: eles têm a capacidade de irradiar num determinado grupo de comprimentos de onda.

É nisto que se baseia a análise espectral - é o método de definir a composição química da substância através do seu espectro. Tal como as impressões digitais das pessoas, os espectros de linhas têm características individuais. As características únicas do desenho da pele dos dedos ajudam freqüentemente a identificar um criminoso. Do mesmo modo, graças às características individuais dos espectros, pode definir-se a composição química dum corpo. Com o auxílio da análise espectral, pode identificar-se um dado elemento que se encontra na composição de uma dada substância composta, mesmo que a sua massa não seja maior do que 10^{-10} g. É um método muito sensível.

Fazer a análise quantitativa da composição da matéria segundo o seu espectro é mais difícil, visto que a intensidade das linhas espectrais depende não só da massa, mas também do método utilizado para provocar a emissão de luz. Assim, quando a temperatura não é alta, muitas linhas espectrais não aparecem. No entanto, observando determinadas condições-padrão ao provocar a emissão de luz, pode fazer-se a análise espectral quantitativa.

Atualmente estão definidos os espectros de todos os átomos e foram feitas tabelas de espectros. Com o auxílio da análise espectral foram descobertos novos elementos: o rubídio, o cézio e outros. Freqüentemente os nomes dados aos elementos correspondem à cor da linha mais intensa do espectro. O rubídio dá-nos linhas vermelho-escuras, da cor do rubi. A palavra cézio significa "azul celeste". Esta é a cor das linhas principais do cézio.

Foi precisamente com o auxílio da análise espectral que se ficou a conhecer a composição química do Sol e das estrelas. Outros métodos de análise não são possíveis neste caso. Verifica-se que as estrelas são compostas pelos mesmos elementos químicos que existem na Terra. É interessante saber que o hélio foi descoberto primeiro no Sol e só depois foi encontrado na atmosfera da Terra. O nome deste elemento faz lembrar a história da sua descoberta: a palavra hélio significa "solar".

Graças à sua simplicidade e universalidade, a análise espectral é o método fundamental de controle da composição dos materiais na metalúrgica, na construção de máquinas, na indústria atômica. Com o auxílio da análise espectral determinou-se a composição química dos minérios e dos minerais.

A composição de misturas complexas, principalmente orgânicas, analisa-se segundo os espectros moleculares das mesmas.

A análise espectral pode ser feita não só segundo os espectros de emissão, mas também segundo os espectros de absorção. Justamente as linhas de absorção do espectro do Sol e das estrelas permitiram verificar a composição química destes corpos celestes. A superfície intensamente luminosa do Sol-fotosfera - dá um espectro contínuo. A atmosfera solar absorve a luz do fotosfera, o que faz aparecer linhas de absorção sobre o fundo do espectro contínuo da fotosfera.

Mas a própria atmosfera do Sol irradia luz. Quando se dão os eclipses do Sol, quando o disco solar é tapado pela Lua, dá-se a inversão do espectro. No lugar das linhas de absorção no espectro solar surgem linhas de radiação.

5 Radiação Infravermelha e Ultravioleta

Radiação infravermelha

Voltemos à experiência destinada ao estudo da distribuição da energia no espectro do arco voltaico, descrita em 2. Quando se desloca a placa negra - o elemento sensível do instrumento - para a zona vermelha do espectro verifica-se um aumento da temperatura. Se deslocarmos a placa para lá da zona vermelha do espectro, onde a

vista já não detecta a luz, então o aquecimento do disco ainda é maior. As ondas electromagnéticas que produzem este aquecimento chamam-se infravermelhas. Qualquer corpo, até no caso de não iluminar, emite tais ondas. Por exemplo, um forno aquecido ou um aquecedor numa casa emitem ondas infravermelhas que aquecem os corpos à sua volta. Por isso, as ondas infravermelhas também se designam térmicas.

As ondas infravermelhas, às quais a nossa vista não é sensível, têm comprimentos superiores ao das ondas vermelhas. O máximo da energia de radiação do arco voltaico e da lâmpada de incandescência corresponde aos raios infravermelhos.

A radiação infravermelha utiliza-se para secar revestimentos de tintas e de vernizes, legumes, frutas, etc. Foram construídos instrumentos com o auxílio dos quais a imagem infravermelha invisível do objeto se transforma numa imagem visível. Fabricam-se binóculos e lunetas que permitem ver no escuro.

Radiação ultravioleta

Para lá do extremo violeta do espectro o instrumento também revela um aumento de temperatura, mas, verdade se diga, não muito alto. Consequentemente, existem ondas electromagnéticas cujo comprimento é menor do que o da luz violeta - são as ondas ultravioletas.

Para verificar a radiação ultravioleta, pode usar-se uma pantalha coberta de substância luminescente. A pantalha começa a iluminar-se na parte, na qual incidem os raios que se encontram para lá da zona violeta do espectro.

Os raios ultravioletas distinguem-se por uma alta atividade química. As fotoemulsões são dotadas de maior sensibilidade à radiação ultravioleta. Podemos verificar isto, projetando o espectro num local escuro sobre papel fotográfico. Depois de revelado, o papel escurece mais para lá do extremo violeta do espectro do que na sua parte visível.

Os raios ultravioletas não formam imagens visuais, são invisíveis. Mas a sua ação na retina do olho e na pele é muito intensa e destruidora. A radiação ultravioleta do Sol é insuficientemente absorvida pelas camadas superiores da atmosfera. Por isso, nas zonas altas das montanhas, não se deve estar na neve sem óculos de vidro escuros nem muito tempo sem roupa. O vidro absorve intensamente os raios ultravioletas. Por isso, óculos escuros de vidro, transparentes para o espectro visível, defendem os olhos da radiação ultravioleta.

No entanto, em pequenas doses, os raios violetas têm ação curativa. Uma exposição moderada ao Sol é proveitosa, em especial para os mais novos: os raios ultravioletas contribuem para o desenvolvimento e a consolidação do organismo. Para além da ação direta nos tecidos da pele (formação de um pigmento de defesa - queimado do Sol, vitamina D₂), os raios ultravioletas têm ação sobre o sistema nervoso central, estimulando um conjunto de funções vitais do organismo.

Os raios ultravioletas têm também uma ação bactericida. Eles destroem muitas bactérias prejudiciais ao organismo e utilizam-se na medicina com esse fim.

6 Os Raios X

Pode ser que nem todos tenham ouvido falar dos raios ultravioletas e infravermelhos, mas da existência dos raios X é evidente que todos sabem. Estes raios interessantes atravessam corpos que, para a luz habitual, são opacos. O expoente de absorção deles é proporcional à densidade da substância. Por isso, com o auxílio dos raios X é possível obter uma fotografia dos órgãos internos do homem. Nestas fotografias, distinguem-se bem os ossos do esqueleto (fig. 6) e detectam-se diferentes deformações dos tecidos brandos.

A descoberta dos raios X

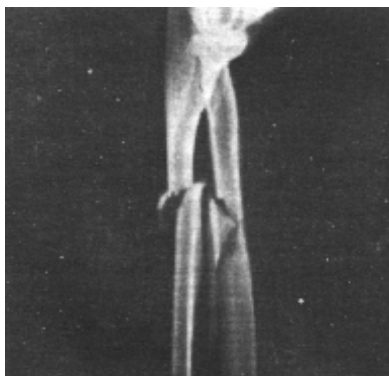
Os raios X foram descobertos em 1895 pelo físico alemão W. Röntgen. Röntgen soube ver, soube notar coisas novas onde muitos cientistas - seus antecessores - não viram nada de interessante. Este dom especial permitiu-lhe fazer uma descoberta importante

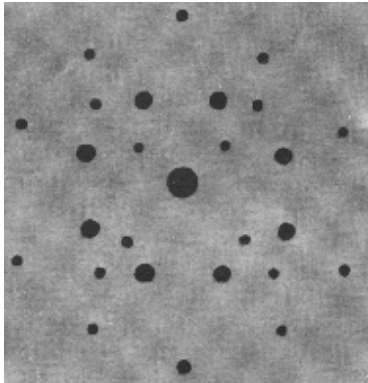


No fim do séc. XIX, a atenção geral dos físicos estava virada para as descargas em gases a pressão baixa. Nestas condições, num tubo de descarga de gás forma-se um fluxo de elétrons muito rápidos. Nesse tempo, chamavam-lhes raios catódicos. A natureza destes raios ainda não tinha sido determinada rigorosamente. Só se sabia que estes raios partiam do tubo catódico.

Tendo-se dedicado ao estudo dos raios catódicos, Röntgen depressa viu que a chapa fotográfica, que se encontrava perto do tubo de descarga, era impressionada mesmo no caso do tubo estar envolvido em papel preto. Depois disto, ele conseguiu observar ainda um fenómeno que o surpreendeu. Um écran de papel, umedecido por uma solução de platinocianeto de bário, começava a iluminar-se, se com ele se envolvesse o tubo carregado. Além disso, quando Röntgen colocou a mão entre o tubo e o écran, neste tornaram-se visíveis as sombras escuras dos ossos, sobre o fundo de impressões mais claras da mão inteira.

O cientista compreendeu que quando o tubo de descarga funcionava, aparecia uma radiação fortemente penetrante que até então não era conhecida. Chamou-lhe raios X. Mais tarde, esta radiação passou a ser chamada também " raios Röntgen ".





Röntgen verificou que o novo tipo de radiação aparecia no lugar onde os raios catódicos (feixes de elétrons rápidos) chocavam com as paredes de vidro do tubo. Neste lugar o vidro iluminava-se com uma cor esverdeada. Experiências posteriores mostraram que os raios X apareciam quando os elétrons rápidos eram retardados por qualquer obstáculo, em particular, pelos eléctrodos metálicos.

Propriedades dos raios X

Os raios, descobertos por Röntgen, atuavam na chapa fotográfica, provocavam a ionização do ar, mas não eram refletidos, de forma sensível, por nenhuma substância e não se refratavam. O campo electromagnético não exercia nenhuma influência na direção da sua propagação.

Logo surgiu a hipótese de que os raios X são ondas electromagnéticas que se irradiam durante a travagem brusca dos elétrons. Os raios X distinguem-se dos raios luminosos da parte visível do espectro e dos raios ultravioletas pelo fato de terem menor comprimento de onda. O seu comprimento de onda é tanto menor quanto maior for a energia dos elétrons que chocam com os obstáculos. A grande capacidade de penetração dos raios X e as suas outras particularidades estão ligadas ao fato de eles terem um comprimento de onda muito pequeno. Mas esta hipótese precisava de ser demonstrada e a sua demonstração só foi obtida 15 anos depois da descoberta do Röntgen.

A difração dos raios X

Se a radiação de Röntgen (de raios X) é constituída por ondas electromagnéticas, então ela deve verificar a difração - fenômeno a que obedecem todos os tipos de ondas. Ao princípio, fazia-se passar os raios X através de uma fenda muito estreita em discos de chumbo, mas não se conseguiu verificar nada que fosse parecido com difração. O físico alemão MAX LAUE considerou que o comprimento de onda dos raios X fosse muito pequeno para que se tornasse possível verificar a difração destas ondas em obstáculos criados artificialmente, visto que não é possível construir fendas de comprimento 10^{-10} m, porque desse tamanho são os próprios átomos. E se os raios X tivessem um comprimento de onda próximo das dimensões dos átomos? Então restamos uma única possibilidade - utilizar os cristais. Estes têm uma estrutura ordenada, onde as distâncias entre os átomos isolados são da mesma ordem que o tamanho dos próprios átomos, ou seja, 10^{-10} m. Os cristais, com a sua estrutura periódica, constituem um dispositivo natural, que deve, sem falta, provocar uma difração sensível das ondas, se o comprimento destas for próximo do tamanho dos átomos.

E assim se fez incidir um feixe de raios X num cristal, atrás do qual se encontrava uma chapa fotográfica. O resultado estava totalmente de acordo com as perspectivas mais optimistas. A par de uma mancha central grande, dada pelos raios, que se propagavam em linha reta, surgiram pequenas manchas dispostas regularmente à volta da primeira (fig. 7) . O aparecimento destas manchas só se podia explicar com base na difração dos raios X pela estrutura ordenada do cristal.

O estudo do quadro de difração permitiu determinar o comprimento de onda dos raios X. Ele era menor do que o comprimento da onda da radiação ultravioleta e era da mesma ordem do tamanho do átomo (10^{-10} m) .

A aplicação dos raios X

Os raios X têm numerosas aplicações práticas muito importantes.

Na medicina aplicam-se para diagnosticar doenças.

Os raios X são amplamente aplicados na investigação científica.

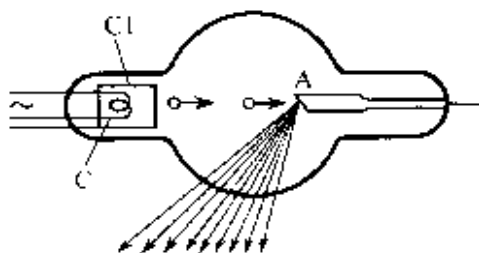
Devido ao quadro de difração, que nos é dado pelos raios X quando atravessam cristais, é possível verificar a ordem de disposição dos átomos no espaço-estrutura dos cristais. Fazer isto para os cristais de substâncias inorgânicas não foi muito difícil. Mas com o auxílio da análise estrutural com raios de Röntgen pode decifrar-se a estrutura das ligações orgânicas complexas, incluindo as proteínas. Em particular, foi determinada a estrutura das moléculas da hemoglobina que contém dezenas de milhares de átomos.

Isto foi possível graças ao fato do comprimento de onda dos raios X ser muito pequeno e de isso tornar possível "ver" as estruturas moleculares. Ver, como é evidente, não no sentido literal da palavra; trata-se de obter um quadro de difração , com o auxílio do qual, trabalhando bastante na sua decifração , se pode conhecer o carácter da disposição dos átomos no espaço .

Uma das aplicações dos raios X é a radiolocalização - um método de detectar falhas em peças fundidas, fendas nos carris, verificação da qualidade das costuras de soldagem, etc. A radiolocalização com raios de Röntgen é baseada na variação da absorção dos raios X pelo artigo, se dentro dele existirem cavidades ou corpos estranhos.

A estrutura do tubo de Röntgen

Para obter raios X, construíram-se mecanismos muito perfeitos que se chamam tubos de Röntgen . Eles diferenciam-se substancialmente dos aparelhos construídos por Röntgen.



Na fig. 8 está representada esquematicamente a estrutura de um tubo eletrônico de Röntgen. O cátodo C é uma espiral de volfrâmio, que emite elétrons graças à emissão termoeletrônica. O cilindro CI foca o feixe de elétrons que depois colidem com o eléctrodo metálico (ânodo) A . Durante este processo, formam-se os raios X. A diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo atinge várias dezenas de quilovolts. No tubo forma-se um alto vácuo; a pressão do gás neste tubo é de 10^{-5} - 10^{-7} mm Hg.

7 Escala de Radiações Eletromagnéticas

Sabemos que o comprimento das ondas eletromagnéticas varia desde valores da ordem de 10^3 m (ondas de rádio) até 10^{-10} m (raios X). A luz visível constitui uma parte minúscula do espectro das ondas electromagnéticas. No entanto, só quando se estudou esta pequena parte do espectro é que se descobriam outras radiações com propriedades pouco habituais.

Veja a escala completa das ondas eletromagnéticas, com a indicação do comprimento de onda e da frequência de radiações diferentes, assim como os mecanismos , com o auxílio dos quais se obtêm ondas electromagnéticas de diversos diapasões de frequência.

Costuma-se distinguir a radiação de baixa frequência, a radiação de rádio, os raios infravermelhos, a luz visível, os raios ultravioletas, os raios X e a radiação gama . Já conhecem todas as radiações, exceto a radiação gamai . Esta última tem as ondas mais curtas e é emitida pelos núcleos dos átomos.

Diferenças de princípio entre os vários tipos de radiação não existem. Todos eles são ondas eletromagnéticas criadas por partículas carregadas em movimento acelerado. As ondas eletromagnéticas são detectadas, em última análise, pela sua ação sobre partículas carregadas. No vácuo a radiação de qualquer comprimento de onda propaga-se à velocidade de 300 000 km/s. As fronteiras entre diferentes domínios da escala de radiação são muito convencionais.

As radiações de diferentes comprimentos de onda diferenciam-se umas das outras pelo método de obtenção (a radiação de antena, a radiação térmica, a radiação por travagem dos elétrons rápidos e outras) e pelos métodos de registro.

Sobre a forma de obter ondas de rádio e sobre os métodos de as registrar não falaremos neste texto. Sobre as ondas eletromagnéticas do diapasão óptico (infravermelhas, naturais e ultravioletas) e sobre os raios X falou-se brevemente neste capítulo. Mais adiante, falaremos sobre a radiação γ . À medida que diminui o comprimento de onda, as diferenças quantitativas do seu valor convertem-se em mudanças qualitativas.

As radiações de comprimentos de ondas diferentes diferenciam-se fortemente umas das outras pela maneira como a matéria as absorve. As radiações de ondas curtas (Röntgen e em especial os raios gama) são fracamente absorvidas. As substancias opacas para as ondas do diapasão óptico são transparentes para estes últimos tipos de radiação. O coeficiente de reflexão das ondas electromagnéticas depende também do comprimento de onda. Mas a principal diferença entre as radiações de ondas longas e as de ondas curtas consiste no fato das radiações de ondas curtas revelarem as propriedades das partículas. Acerca disto falaremos no capítulo seguinte.

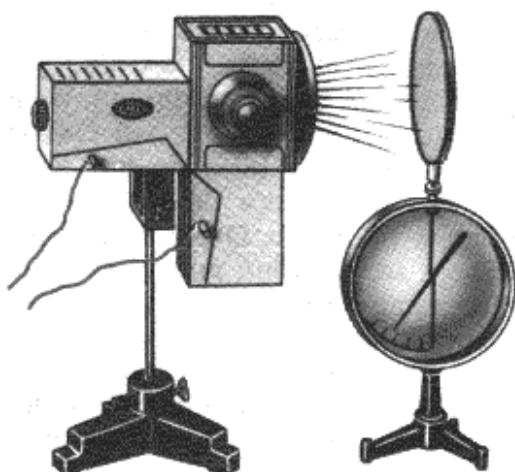
Efeito Fotoelétrico: Introdução

Um importante passo no desenvolvimento das concepções sobre a natureza da luz foi dado no estudo de um fenômeno muito interessante, descoberto por H. Hertz . Este fenômeno recebeu o nome de efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons pela matéria sob a ação da luz.

Para se observar o efeito fotoelétrico , é conveniente utilizar um eletroscópio de folhas (fig. 1). No eletroscópio monta-se uma lâmina de zinco. Se a lâmina estiver carregada positivamente, a sua iluminação, por exemplo com a ajuda de um arco voltaico, não influi na velocidade de descarga do eletroscópio. No entanto, se a lâmina estiver carregada negativamente, o feixe de luz do arco descarrega o eletroscópio com grande rapidez.

Este fato só pode ser explicado de uma maneira. A luz provoca a emissão de elétrons pela superfície da lâmina. Quando a lâmina está carregada negativamente, repele os elétrons e o eletroscópio descarrega-se. Quando está carregada positivamente, os elétrons emitidos sob a ação da luz são atraídos e voltam ao eletroscópio. É por esta razão que a carga do eletroscópio não varia.



No entanto, quando o feixe de luz é interceptado por um vidro normal, a lâmina carregada deixa de perder elétrons, independentemente da intensidade do feixe de luz. Como é conhecido que o vidro absorve os raios ultravioletas, pode concluir-se que é precisamente a parte ultravioleta do espectro que provoca o efeito fotoelétrico. Este fato, apesar de simples, não pode ser explicado com base na teoria ondulatória da luz. Não se compreende porque é que as ondas de luz de pequena frequência não provocam a emissão de elétrons mesmo nos casos em que a amplitude da onda, e, portanto, a força com que ela atua nos elétrons, são grandes.

Leis do efeito fotoelétrico

Para se obter uma idéia mais completa sobre o efeito fotoelétrico é necessário determinar de que depende o número de elétrons (foto elétrons) emitidos, sob a ação da luz, por uma superfície e a velocidade ou energia cinética desses elétrons. Com este objetivo foram levadas a cabo investigações experimentais, que passamos a descrever. Colocam-se dois eléctrodos num balão de vidro do qual se retirou previamente o ar (fig. 2). Num dos eléctrodos, através de uma "janela" de quartzo, transparente não só para a luz visível como também para a radiação ultravioleta, incidem os raios de luz. Com a ajuda de um potenciômetro faz-se variar a diferença de potencial entre os eléctrodos, medindo-a por meio de um voltímetro. O pólo negativo

da pilha liga-se ao eléctrodo iluminado. Sob a ação da luz, este eléctrodo emite elétrons que, ao movimentarem-se no campo elétrico, criam corrente elétrica. Quando o potencial é pequeno, nem todos os elétrons atingem o outro eléctrodo. Se se aumentar a diferença de potencial entre os eléctrodos e não se alterar o feixe de luz, a intensidade da corrente aumenta, atinge o valor máximo, depois do que deixa de crescer (fig. 3). O valor máximo da intensidade da corrente I_s chama-se corrente de saturação. A corrente de saturação é determinada pelo número de elétrons emitidos num segundo pelo eletrodo iluminado.

Mudando, nesta experiência, o feixe luminoso, determinou-se que o número de elétrons emitidos pela superfície do metal num segundo é diretamente proporcional à energia da onda de luz, absorvida durante o mesmo intervalo de tempo. Neste fato não há nada de inesperado, já que quanto maior é a energia do feixe de luz, mais eficaz se torna a sua ação.

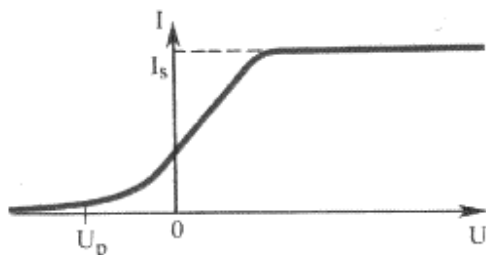
Passemos agora à medição da energia cinético (ou velocidade) dos elétrons. No gráfico da fig. 3, vê-se que a intensidade da corrente fotoelétrica é diferente de zero mesmo quando a diferença de potencial é nula. Isto significa que, mesmo na ausência de diferença de potencial, uma parte dos elétrons atinge o eléctrodo direto (fig. 2). Se se alterar a polaridade da bateria, a intensidade da corrente diminui até se anular, quando o potencial de polaridade inversa atinge o valor U_p . Isto significa que os elétrons emitidos são detidos e forçados a voltar para trás, sob a ação do campo elétrico.

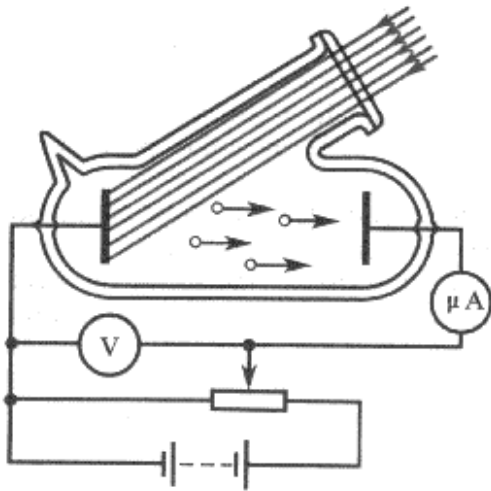
O potencial de paragem U_p depende do valor máximo da energia cinética que os elétrons emitidos atingem sob a ação da luz. A medição do potencial de paragem e o teorema da energia cinética permitem calcular energia cinética máxima dos elétrons:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_p$$

Verificou-se experimentalmente que o potencial de paragem não depende da intensidade da luz (energia transmitida ao eléctrodo por unidade de tempo). Não muda, portanto, também a energia cinética dos elétrons. Do ponto de vista da teoria ondulatória, este fato é incompreensível já que, quanto maior for a intensidade da luz, maiores são as forças que se exercem sobre os elétrons por parte do campo electromagnético da onda luminosa e, portanto, mais energia deveria ser transmitida aos elétrons.

Verificou-se experimentalmente que a energia cinética dos elétrons emitidos sob a ação da luz só depende da frequência da luz. A energia cinética máxima dos fotoelétrons é proporcional à frequência da luz e não depende da intensidade desta. O efeito fotoelétrico não se verifica quando a frequência da luz é menor do que um dado valor mínimo ν_{\min} , dependente do material do eléctrodo.





9 Teoria do Efeito Fotoelétrico

Não resultou nenhuma das tentativas, feitas no sentido de explicar o efeito fotoelétrico com base nas leis de Maxwell (segundo as quais a luz é uma onda electromagnética distribuída continuamente no espaço). Era impossível compreender porque é que a energia dos elétrons fotoelétricos é determinada apenas pela frequência da luz, nem perceber a causa pela qual só quando o comprimento de onda é pequeno a luz se torna capaz de arrancar elétrons.

O esclarecimento do efeito fotoelétrico foi dado em 1905 por Alberto Einstein que desenvolveu a idéia de Planck sobre a emissão intermitente de luz. Nas leis experimentais do efeito fotoelétrico, Einstein viu uma prova evidente de que a luz tem uma estrutura intermitente e é absorvida em porções independentes. A energia E de cada uma das porções de emissão, de acordo com a hipótese de Planck, é proporcional à frequência.

$$E = hf, \text{ onde } h \text{ é a constante de Planck. (1)}$$

O fato de, como provou Planck, a luz ser emitida em porções, ainda não constitui uma confirmação definitiva do caráter descontínuo da estrutura da própria luz. Repara-se que a chuva também cai na terra sob a forma de gotas, o que não quer dizer que a água nos rios e lagos seja constituída por gotas, isto é, quantidades pequenas independentes. Apenas o efeito fotoelétrico permite pôr em evidência a estrutura descontínua da luz: a porção de energia luminosa $E = hf$ continua a manter a sua integridade, de tal modo, que essa dada porção de luz, quando é absorvida, tem de absorver-se toda de uma vez. A energia E de cada uma das porções de emissão é dada pela fórmula (1).

A energia cinética do elétron fotoelétrico pode ser calculada aplicando a lei da conservação de energia. A energia de uma porção de luz, hf permite realizar o trabalho de arranque W , isto é, o trabalho indispensável para arrancar um elétron do seio do metal e comunicar-lhe uma certa energia cinética. Por conseguinte,

$$hf = W + \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

Esta equação permite esclarecer todos os fatos fundamentais relacionados com o efeito fotoelétrico. A intensidade da luz, segundo Einstein, é proporcional ao número de quantos (porções) de energia contido no feixe luminoso e, por conseguinte, determina o número de elétrons arrancados da superfície metálica. A velocidade dos elétrons, conforme (2), é dada apenas pela frequência da luz e pelo trabalho de

arranque, que depende da natureza do metal e da qualidade da sua superfície. Atenda-se a que a velocidade dos elétrons não depende da intensidade da luz.

Para uma dada substância, o efeito fotoelétrico pode observar-se apenas no caso de a frequência f da luz ser superior ao valor mínimo f_{\min} . Convém reparar que para se poder arrancar um elétron do metal, mesmo sem lhe comunicar energia cinética, há que realizar o trabalho de arranque W . Portanto, a energia de um quanto (quantum) deve ser superior a este trabalho:

$$hf > W$$

A frequência limite f_{\min} tem o nome de limite vermelho do efeito fotoelétrico e calcula-se pela seguinte fórmula:

$$f_{\min} = \frac{W}{h}$$

O trabalho de arranque W depende da natureza da substância. Portanto, a frequência limite f_{\min} do efeito fotoelétrico (dito limite vermelho) varia de substância para substância.

Por exemplo, ao limite vermelho do zinco corresponde o comprimento de onda $\lambda_{\max} = 3,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ (radiação ultravioleta). É precisamente por isso se explica o fato de efeito fotoelétrico cessar quando se interpõe uma lâmina de vidro, capaz de deter raios ultravioletas.

O trabalho de arranque no alumínio ou no ferro é maior do que no zinco, razão por que na experiência de 1 se utilizou uma lâmina de zinco. Nos metais alcalinos, pelo contrário, o trabalho de arranque é menor, ao passo que o comprimento de onda λ_{\max} correspondente ao limite vermelho é maior. Assim, por exemplo, relativamente ao sódio verifica-se $\lambda_{\max} = 6,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

Através da equação de Einstein (2) é possível calcular a constante de Planck h . Para tal há que determinar experimentalmente a frequência ν da luz, o trabalho de arranque W e avaliar a energia cinética dos elétrons fotoelétricos. Avaliações e cálculos apropriados mostram que $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$. O mesmo valor numérico foi obtido por Planck durante o estudo teórico de outro fenómeno diferente que é a radiação térmica. O fato de terem coincidido os valores da constante de Planck obtidos por métodos diferentes, confirma a certeza da hipótese acerca do caráter descontínuo da emissão e absorção da luz pelas substâncias

10 Fótons

A luz, tanto durante a sua emissão como durante a absorção, comporta-se como um fluxo de partículas com energia $E = hf$, dependente da frequência. A porção de luz resultou ser, inesperadamente, muito parecida com o que costuma chamar-se partícula. As propriedades da luz que se verificam durante a sua emissão e absorção dizem-se propriedades corpusculares, ao passo que a partícula de luz chama-se fótons ou quanto luminoso.

O fóton tal como qualquer partícula, possui uma certa energia hf . A energia do fóton, amiúde, exprime-se através da frequência angular $\omega = 2\pi f$, em vez de frequência f . Neste caso, em vez da grandeza h , usa-se, como coeficiente de proporcionalidade, a grandeza \hbar , cujo valor numérico se calcula pela seguinte fórmula:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

Então, a energia de um fóton é dada pela fórmula

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

De acordo com a teoria da relatividade, a energia varia em função da massa segundo a fórmula $E = mc^2$. Uma vez que a energia de um fóton é igual a hf , a massa dele calcula-se através da seguinte fórmula:

$$m = \frac{hf}{c^2} \quad (5)$$

O fóton não possui massa de repouso m_0 , isto é, não pode estar em repouso e, no instante em que nasce, é-lhe comunicada a velocidade c . A sua massa, cujo valor se calcula pela fórmula (5), é a massa do fóton em movimento. Conhecidas a massa e a velocidade do fóton, podemos calcular o seu impulso:

$$p = mc = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (6)$$

A direção do impulso do fóton coincide com a do raio luminoso.

Quanto maior for a frequência, maiores são a energia e o impulso do fóton e mais evidentes se tornam as propriedades corpusculares da luz. Dado o fato de a constante de Planck ser muito pequena, é muito pequena também a energia dos fótons da luz visível. Os fótons correspondentes à luz verde, por exemplo, possuem a energia de $4 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Contudo, as experiências que o olho humano é capaz de reagir e distinguir diferenças de intensidades luminosas da ordem de alguns quantos.

Foi assim que os cientistas foram forçados a considerar a luz como um fluxo de partículas. Poder-se-ia pensar que se trata de um retorno à teoria corpuscular de Newton. Porém, não devemos esquecer que os fenômenos de interferência e difração da luz provam a natureza ondulatória da luz. Verifica-se uma espécie de dualismo das propriedades da luz. Durante a propagação da luz põem-se em evidência as suas propriedades ondulatórias, enquanto que a sua interação com as substâncias (radiação e absorção) se manifestam as propriedades corpusculares. Tudo isto parece-nos estranho e impróprio, pois não podemos esquematizar tais fatos na nossa imaginação. Mas é uma realidade. Não sabemos esquematizar com evidência todos os aspectos que caracterizam o desenvolvimento dos inúmeros processos que se verificam no mundo microscópico, por serem muito diferentes dos fenômenos macroscópicos que estamos acostumados a ver há já milênios, os quais obedecem a leis descobertas e formuladas até ao fim do século XIX.

Com o decorrer do tempo, o dualismo das propriedades foi provado tanto nos elétrons como noutras partículas elementares. O elétron, nomeadamente, também possui, além das propriedades corpusculares, propriedades ondulatórias. Note-se que é relativamente fácil observar a difração dos elétrons.

Todas estas características específicas dos objetos microscópicos podem ser esclarecidas através da mecânica quântica, que constitui a teoria moderna do movimento de partículas microscópicas. A mecânica de Newton torna-se inadequada neste caso. O estudo pormenorizado da mecânica quântica não será feito neste texto.

11 Aplicações do Efeito Fotoelétrico

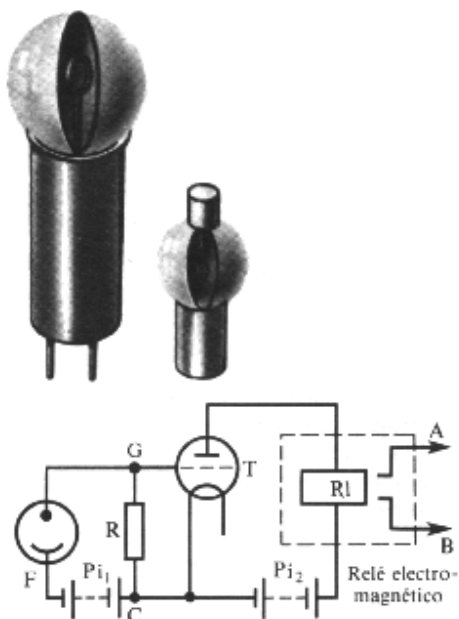
A descoberta do efeito fotoelétrico teve grande importância para a compreensão mais profunda da natureza da luz. Porém, o valor da ciência consiste não só em esclarecer-nos a estrutura complexa do mundo que nos rodeia, como em fornecer-nos os meios que permitem aperfeiçoar a produção e melhorar as condições de trabalho e de vida da sociedade.

Graças ao efeito fotoelétrico tornou-se possível o cinema falado, assim como a transmissão de imagens animadas (televisão). O emprego de aparelhos fotoelétricos permitiu construir maquinaria capaz de produzir peças sem intervenção alguma do homem. Os aparelhos cujo funcionamento assenta no aproveitamento do efeito

fotoelétrico controlam o tamanho das peças melhor do que o pode fazer qualquer operário, permitem acender e desligar automaticamente a iluminação de ruas, os faróis, etc.

Tudo isto tornou-se possível devido à invenção de aparelhos especiais, chamados células fotoelétricas, em que a energia da luz controla a energia da corrente elétrica ou se transforma em corrente elétrica.

Uma célula fotoelétrica moderna consta de um balão de vidro cuja superfície interna está revestida, em parte, de uma camada fina de metal com pequeno trabalho de arranque (fig. 4) . É o cátodo. Através da parte transparente do balão, dita "janelinha", a luz penetra no interior dela. No centro da bola há uma chapa metálica que é o ânodo e serve para captar elétrons fotoelétricos. O ânodo liga-se ao pólo positivo de uma pilha. As células fotoelétricas modernas reagem à luz visível e até aos raios infravermelhos.



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

Os aparelhos deste tipo tornam possível a prevenção de acidentes. Por exemplo, nas empresas industriais uma célula fotoelétrica faz parar quase instantaneamente uma prensa potente e de grande porte se, digamos, o braço dum operário se encontrar, por casualidade, na zona de perigo.

A figura 5 esquematiza uma célula fotoelétrica. Quando a luz incide na célula, no circuito da pilha Pi_1 produz-se uma corrente elétrica de pequena intensidade que atravessa a resistência R cujas extremidades estão ligadas à grelha e ao cátodo do tríodo T . O potencial do ponto G (grelha) é inferior ao do ponto C (cátodo) . A válvula, nestas condições, não deixa passar a corrente elétrica e, portanto, no circuito anódico do tríodo não há corrente. Se a mão ou o braço do operário se encontrar, por casualidade ou negligência, na zona de perigo, faz com que seja cortado o fluxo luminoso que normalmente incide na célula fotoelétrica. A válvula fica aberta e através

do enrolamento do relé electromagnético ligado ao circuito anódico passa a corrente eléctrica, acionando o relé cujos contatos fecham o circuito de alimentação do mecanismo responsável por parar a prensa.

Uma célula fotoelétrica permite reconstituir os sons registrados nas películas do cinematógrafo.

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