

Física Moderna

Texto de apoio para docentes do 12^o ano

J. E. Villate

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Setembro de 2005

Este artigo faz parte do material preparado pelos autores do manual *Eu e a Física - 12^o ano* [1], para uma acção de formação com o objectivo de colaborar com os docentes do 12^o ano na preparação da implementação do novo programa de física a entrar em vigor no ano lectivo 2005-2006.

1 Introdução

Para manter vivo o interesse dos alunos pela física é necessário envolver vários sectores sociais: os *media*, pais de família, docentes, empresários e industriais. Esse envolvimento passa por identificar a física como ciência essencial para compreender o mundo actual e para dinamizar o desenvolvimento tecnológico e a inovação. Em grande parte dos fenómenos com que o cidadão moderno é confrontado está presente a física moderna.

Para explicar os conceitos físicos subjacentes à física moderna não é preciso utilizar mecanismos matemáticos complicados. Assim, os fundamentos da física moderna, que não faziam parte dos antigos currículos da física do ensino secundário, podem ser leccionados nessa fase do ensino.

A principal vantagem da introdução da física moderna no actual programa do 12^o ano será uma maior motivação dos alunos. Os alunos, do ensino secundário, e a sociedade contemporânea em geral, são muito mais receptivos aos temas da física moderna do que aos aspectos técnicos da física clássica.

O ensino da física ao nível secundário deveria ser orientado para os conceitos, mais do que para a resolução de problemas. A assimilação de conceitos é facilitada pela discussão com professores, colegas, familiares e amigos, actividades essas que são mais frequentes durante o ensino básico e secundário do que no ensino superior. O treino na resolução de problemas pode ser feito em forma mais individual, durante o ensino superior, quando o aluno é mais autónomo e tem uma melhor preparação matemática.

2 Física moderna em acção

Analisemos um exemplo da nossa realidade quotidiana onde os conceitos da física moderna entram em acção: a compra de um novo aparelho de televisão. Hoje em dia os preços dos televisores de écran de plasma [2] ou de cristal líquido (LCD) [3] já desceram suficientemente para que sejam uma boa opção em relação aos televisores de tubo de raios catódicos (CRT) [4].

Uma pessoa que for comprar um televisor, poderá questionar-se sobre as vantagens e desvantagens de comprar um televisor de CRT, LCD ou plasma. O princípio de funcionamento dos 3 tipos de monitor envolve alguns conceitos da física moderna. É natural que os consumidores possam temer algum efeito nocivo para a sua saúde quando ouvem falar de termos científicos como *plasma* ou *canhão de electrões*. Na realidade o plasma presente em cada *pixel* do écran de plasma é o mesmo plasma que existe em qualquer lâmpada fluorescente, mas em escala muito menor, e a energia dos electrões é muito baixa para constituir qualquer risco à saúde.

De facto, o mecanismo de produção da luz é o mesmo nos três casos: fosforescência de uma camada de fosfato no écran. O que é diferente em cada caso é a forma como é desencadeada a fosforescência: com um feixe de electrões (CRT), com um gás quente (plasma) ou com uma luz branca que passa através de um cristal polarizador (LCD). A vantagem real dos novos tipos de écran, em relação aos écrans de CRT, é que a luz produzida em cada *pixel* é constante. No CRT o varrimento do feixe de electrões produz uma luz oscilante que cansa mais a vista.

3 Fracassos da física clássica

A “física moderna” nasce dos problemas surgidos no fim do século XIX quando foram associadas 3 áreas da física clássica já bastante maduras: a mecânica, o electromagnetismo e a termodinâmica. Apesar dos grandes sucessos da física clássica, apareciam algumas experiências que produziam resultados que contrariavam as conclusões da física clássica. Dentre esses resultados problemáticos destacam-se a **radiação do corpo negro**, o **efeito fotoeléctrico** e o fracasso das tentativas para medir a **velocidade da luz no éter**.

3.1 Radiação do corpo negro

Nos objectos isolados existe um único mecanismo para o seu arrefecimento/aquecimento: transferência de calor por radiação. A primeira lei da termodinâmica permite demonstrar facilmente que o calor radiado, por um objecto, com temperatura absoluta T , é proporcional a T^4 (lei de Stefan-Boltzmann). A constante de proporcionalidade depende da **emissividade** do objecto, nomeadamente, da facilidade com que a sua superfície deixa passar a radiação incidente.

Um corpo negro é um objecto ideal com superfície que deixa sair toda a radiação produzida no seu interior; conseqüentemente, toda a radiação incidente é absorvida. O **teorema de equipartição da energia**, implica que, a energia radiada, dentro de um intervalo de comprimentos de onda, é proporcional ao número de possíveis modos de oscilação nesse intervalo. Um argumento simples mostra que esse número de modos de oscilação (possíveis ondas) aumenta quando o comprimento de onda diminui. Isto é, as ondas com menores comprimentos de onda seriam mais fáceis de produzir e um corpo quente deveria produzir mais luz violeta do que vermelha, independentemente da temperatura.

Não é isso o que se observa experimentalmente. Todos sabemos que se uma barra metálica é aquecida começa por emitir luz vermelha e à medida que a temperatura aumenta, essa luz muda de cor tornando-se mais branca. Assim, existe uma relação entre a temperatura do objecto e o comprimento de onda da luz emitida. Uma medição mais precisa mostra que a potência da luz emitida atinge um valor máximo para um comprimento de onda que é menor quanto maior for a temperatura (figura 1).

Em vez da curva experimental da figura 1, a física clássica conduz a uma hipérbole que cresce até infinito quando o comprimento de onda se aproxima de zero, resultado esse que não faz sentido, e

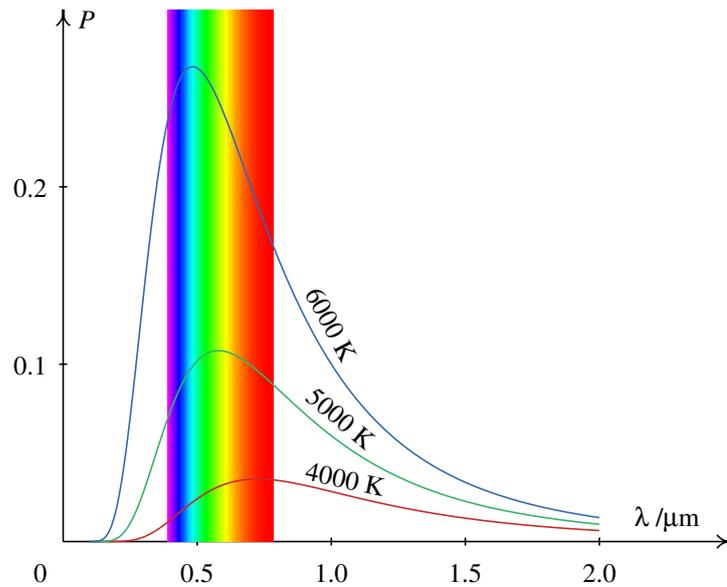


Figura 1: Potência da radiação emitida por um corpo negro, em função do comprimento de onda, para três temperaturas diferentes.

que foi designado por **catástrofe do ultravioleta**.

3.2 Efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico foi descoberto por Hertz, em 1887, nas mesmas experiências em que demonstrou experimentalmente a existência das **ondas eletromagnéticas** postuladas por Maxwell. Hertz observou que a passagem de corrente entre dois eléctrodos metálicos era facilitada iluminando-os com luz.

Com a descoberta do electrão, em 1897, ficou claro que a causa do efeito fotoelétrico é a extracção de electrões de um metal, quando é atingido por radiação electromagnética. A energia electromagnética transportada pela luz é absorvida por alguns electrões do metal, fazendo com que consigam fugir à barreira de potencial que os mantém presos dentro do metal.

Esse efeito explica o funcionamento das células fotoelétricas (figura 2). Uma célula fotoelétrica simples resulta da união entre dois semicondutores de tipo *p* e *n*. O semicondutor do tipo *p* fica com maior potencial do que o semicondutor *n*, impedindo a passagem dos electrões de condução do semicondutor *p* para o *n*. Quando o semicondutor do tipo *p* é atingido por um feixe de luz, libertam-se electrões que passam para o condutor *n* e podem circular por um circuito externo devido à diferença de potencial entre os dois semicondutores. A célula actua como uma fonte de tensão com eléctrodos positivo e negativo nos semicondutores *p* e *n*.

O paradoxo em torno do efeito fotoelétrico é que, quando se aumenta a intensidade da radiação incidente no metal, o número de electrões extraídos aumenta, mas a energia cinética de cada electrão não aumenta. No entanto, essa energia cinética aumenta quando se aumenta a frequência da luz (mudança da cor), algo que pareceria não ter qualquer relação física com o efeito. De facto, existe uma **frequência limiar**, na qual a energia cinética dos electrões aproxima-se de zero e, assim, não existe extracção de electrões se a luz tiver uma frequência menor do que esse valor.

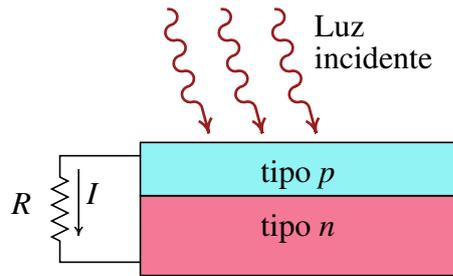


Figura 2: Célula fotoelétrica. A luz incidente no semicondutor do tipo p , faz passar electrões para o semicondutor do tipo n , produzindo corrente eléctrica.

3.3 Velocidade da luz no éter

Na teoria electromagnética a velocidade da luz no vácuo aparece como constante fundamental dependente das propriedades electromagnéticas do vácuo. Assim, a velocidade no vácuo deveria ser constante. Mas parece óbvio que a velocidade de uma onda deverá mudar se o meio onde se propaga se encontrar em movimento. Uma velocidade universal de propagação só faz sentido se for medida em relação a algum meio. Foi postulada a existência de um meio hipotético, imaterial, designado de **éter**, no qual se propagariam os campos electromagnéticos.

A medição da velocidade da luz em diferentes referenciais deveria permitir determinar a velocidade desses referenciais, em relação ao éter. Muitas experiências foram feitas, usando luz proveniente das estrelas ou luz produzida por fontes na Terra. Todas essas experiências falhavam na detecção de qualquer modificação da velocidade da luz; não era possível observar diferenças na velocidade da luz quando a fonte e/ou o observador estavam em movimento. Por cada nova experiência que fracassava, aparecia uma nova teoria que admitia que o éter era arrastado parcialmente pela fonte ou pelo observador em movimento. O arraste do éter não parecia seguir nenhuma regra simples que pudesse ser determinada sem ambiguidade, mas parecia apenas um artifício que precisava ser ajustado para cada experiência.

A actividade de investigação intensa nessa área levou Michelson a conceber vários dispositivos experimentais para detectar variações na velocidade da luz num referencial em movimento. A evolução desses dispositivos resultou no desenvolvimento do interferómetro designado de **interferómetro de Michelson** (figura 3), onde é possível eliminar de forma mais clara qualquer efeito do arraste do éter.

No interferómetro de Michelson, um feixe de luz é separado em dois feixes perpendiculares, por meio de um espelho semitransparente que reflecte parte da luz e deixa passar outra parte. Os dois feixes, provenientes da mesma fonte, são reflectidos por dois espelhos fazendo com que regressem novamente ao espelho semitransparente, misturando-se novamente para produzir um padrão de interferência que pode ser observado num écran.

A distância percorrida pelos dois feixes pode ser ajustada com precisão. Uma pequena variação no tempo que demora um dos feixes a percorrer o seu percurso, pode ser observada através da deslocação do padrão de interferência. Se a velocidade da luz fosse diferente em diferentes direcções (devido ao movimento da Terra), quando se rodasse o interferómetro o padrão de interferência deveria deslocar-se. Michelson e Morley realizaram essa experiência sem observar nenhum efeito da translação da Terra na velocidade da luz. O que observaram foi que a velocidade da luz era a mesma em todas as direcções.



Figura 3: O interferómetro de Michelson permite detectar diferenças entre os percursos da luz em duas direcções perpendiculares.

4 Teoria da Relatividade

A teoria da relatividade nasce a partir dos postulados de Einstein para explicar o fracasso das tentativas de medir as diferenças na velocidade da luz em diferentes referenciais. É uma teoria muito simples do ponto de vista matemático, mas que conduz a resultados surpreendentes que contrariam o senso comum e as previsões da mecânica clássica.

Para compreender a teoria da relatividade é preciso ter bem clara a origem dos resultados da mecânica clássica que são contrariados pela teoria da relatividade. Nomeadamente, a lei de adição das velocidades — transformação de Galileu.

Para explicar a teoria da relatividade, convém pensarmos em termos de eventos físicos. Um evento é algo que acontece num ponto do espaço, (x, y, z) , e num instante de tempo t . As medições físicas consistem no registo de dois eventos diferentes. Por exemplo, para medirmos um intervalo de tempo, Δt , observamos dois eventos: a posição dos ponteiros do relógio em dois instantes diferentes. Para medirmos o comprimento de uma barra, L , comparamos dois eventos simultâneos: a passagem dos dois extremos da barra por dois pontos P e Q, no mesmo instante t . Do ponto de vista clássico, os valores obtidos, para o intervalo de tempo, Δt , e para o comprimento da barra, L , serão os mesmos, independentemente de que os eventos tenham acontecido num referencial estático ou em movimento.

Na teoria da relatividade de Einstein, é preciso lembrar que a velocidade da luz deverá ser sempre a mesma em qualquer referencial. Se considerarmos eventos que tenham a ver com a passagem de um raio de luz, poderemos aplicar o princípio da invariância da velocidade da luz para comparar eventos em dois referenciais diferentes. Vamos explicar essa metodologia com um exemplo concreto: a dedução da expressão para a dilatação do tempo nos referenciais em movimento.

A figura 4 mostra dois eventos E_1 e E_2 . E_1 consiste no envio de um raio de luz na direcção perpendicular a um espelho plano, e E_2 é a chegada do raio de luz à fonte, após ter sido reflectido pelo espelho, que se encontra a uma distância d da fonte. O intervalo de tempo entre os dois

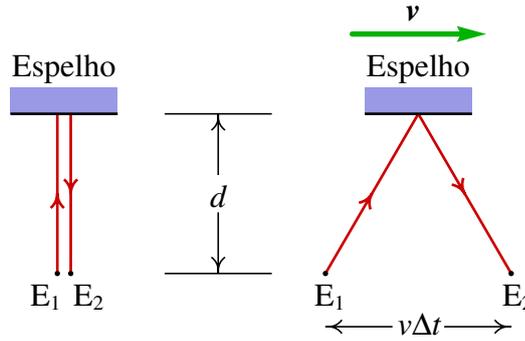


Figura 4: Dois eventos E_1 e E_2 , observados em dois referenciais em movimento relativo.

eventos, que designaremos por $\Delta t'$, é o tempo que demora a luz a percorrer a distância total, $2d$

$$\Delta t' = \frac{2d}{c} \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz.

Num segundo referencial, onde a fonte e o espelho aparecem em movimento, com velocidade v no sentido positivo do eixo dos x , enquanto a luz vai até o espelho e regressa à fonte, a fonte desloca-se uma distância $v\Delta t$, onde Δt é o intervalo de tempo entre os dois eventos, medido no segundo referencial. O raio de luz percorre os dois lados iguais de um triângulo isósceles com base igual a $v\Delta t$ e altura d . É de salientar que a distância entre a fonte e o espelho, d , deverá ser a mesma nos dois referenciais, pois não existe movimento relativo entre eles, segundo a direcção y . Assim, no segundo referencial, a distância total percorrida pela luz é igual a:

$$\sqrt{v^2\Delta t^2 + 4d^2} = \sqrt{v^2\Delta t^2 + c^2\Delta t'^2} \quad (2)$$

(o termo no lado direito foi obtido por substituição da equação 1). Essa distância, dividida pelo tempo entre os dois eventos, no segundo referencial, Δt , deverá ser igual à velocidade da luz, c . Assim, obtemos a relação que expressa a **dilatação do tempo** no referencial em que a fonte de luz e o relógio estão em movimento:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (3)$$

Existe muita evidência experimental que corrobora a teoria da relatividade, e esta é, hoje em dia, parte importante da física do quotidiano e não apenas uma teoria abstracta. Um exemplo é a dilatação do tempo de vida dos muões nos raios cósmicos devido ao seu movimento [5].

5 Introdução à Física Quântica

5.1 Teoria quântica

Em 1900, Max Planck conseguiu explicar o espectro de radiação do corpo negro, postulando que a energia de oscilação dos átomos no corpo negro não muda em forma contínua, mas em forma discreta. Nomeadamente, a energia aumenta em múltiplos inteiros de um **quantum** de energia

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

onde f é a frequência de oscilação e h é uma constante (constante de Planck) medida experimentalmente.

Combinando essa hipótese quântica com o teorema de equipartição da energia, Planck obteve uma curva que reproduz perfeitamente o resultado experimental apresentado na figura 1.

Assim, um **oscilador quântico** tem níveis discretos de energia e a distância entre os níveis de energia — modos de oscilação — aumenta a medida que o comprimento de onda diminui. Assim, quando o comprimento de onda se aproxima para zero, o número de modos de oscilação e portanto, a energia, aproximam-se para zero (figura 1), evitando-se a catástrofe ultravioleta da física clássica.

5.2 Teoria dos fótons

Em 1905, no mesmo ano em que publicou a sua teoria da relatividade, Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico, com uma teoria muito simples, que lhe valeu a atribuição do prémio Nobel anos mais tarde. Segundo Einstein, a energia da luz só pode ser produzida e absorvida em pacotes de energia (**fótons**) que correspondem aos **quanta** de energia postulados por Planck na radiação do corpo negro.

Assim a libertação de um electrão de um metal, no efeito fotoelétrico, é devida à absorção de um fóton por parte do electrão. A energia cinética com que ficará o electrão após a sua saída do metal, será assim a energia do fóton absorvido, menos a energia de ligação do electrão no metal. Como a energia do fóton é directamente proporcional à sua frequência, existirá uma frequência mínima para que exista efeito fotoelétrico, que corresponde à energia de ligação dos electrões no metal e será diferente para cada metal.

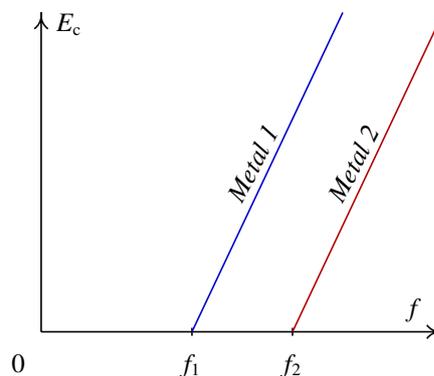


Figura 5: Relação entre a energia cinética dos electrões extraídos por efeito fotoelétrico, e a frequência da luz incidente, para dois metais diferentes.

Por cima da frequência mínima, a energia cinética dos electrões libertados aumentará directamente proporcional à frequência da luz. Obtem-se assim a relação apresentada na figura 5, que é corroborada experimentalmente com bastante precisão. O declíve das rectas é igual para qualquer metal e é exactamente igual à constante de Planck que já tinha sido obtida observando a radiação do corpo negro.

Antes do famoso artigo de Einstein em 1905, já tinha sido resolvido um debate de vários séculos entre as teorias ondulatória e corpuscular da luz [6]. Já desde o século XIX existia suficiente evidência para demonstrar claramente que a luz era uma onda electromagnética e não um conjunto de corpúsculos, como tinha pensado Newton. A teoria dos fótons de Einstein veio reavivar o debate.

Ao final a luz é tanto onda como partícula (fótons). Designou-se esse comportamento de **dualidade onda-partícula**, o qual constitui um paradoxo do ponto de vista clássico.

5.3 Modelos atômicos

A teoria dos fótons proposta por Einstein permitiu associar a termodinâmica, o electromagnetismo e a mecânica, numa nova perspectiva, usada por uma nova geração de físicos, como ponto de partida para desenvolver o modelo atômico da matéria.

No início do século XX já existia muita evidência empírica, na área da física atômica, que não podia ser explicada com um modelo em que o átomo for semelhante a um pequeno sistema solar. Um exemplo é o espectro de emissão, ou de absorção, dos átomos: quando um gás é excitado produz luz que com alguns comprimentos de onda bem definidos que seguem uma sequência matemática simples designada por espectro de emissão (figura 6). Se o gás for atravessado por luz branca, são absorvidas as componentes da luz com uma sequência de comprimentos de onda que correspondem exactamente à mesma série do espectro de emissão.

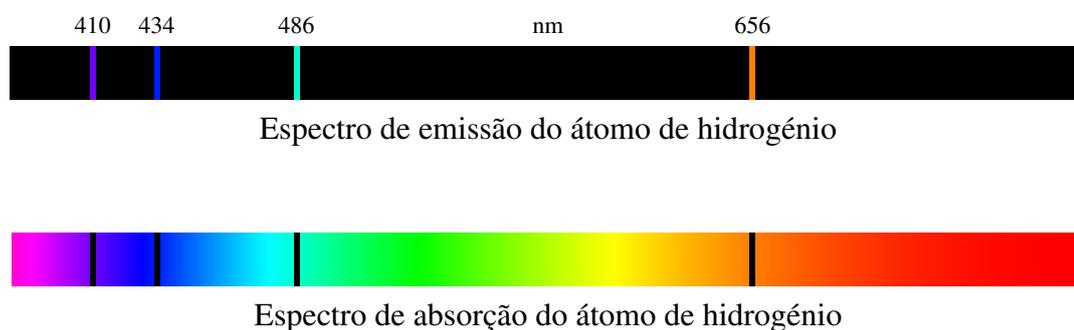


Figura 6: Espectros de emissão e de absorção do átomo de hidrogénio. A luz é emitida, ou absorvida, em alguns comprimentos de onda bem definidos, que formam uma sequência matemática simples.

As séries espectrais são características próprias de cada átomo e são usadas para identificar, com bastante precisão, a composição química das estrelas, observando a luz que produzem. No entanto, do ponto de vista clássico, o movimento circular dos electrões à volta do núcleo atômico deveria produzir luz com a mesma frequência desse movimento circular. Por outro lado, a terceira lei de Kepler permite associar a frequência do movimento circular ao raio da órbita. As séries espectrais implicam que o movimento orbital dos electrões no núcleo só pode ter uma sequência bem definida de raios, característicos de cada elemento químico. Isso é algo que não acontece, por exemplo, com o sistema solar ou com os satélites da Terra; podemos colocar um satélite em órbita, com qualquer raio orbital arbitrário, se tiver a velocidade necessária para produzir a frequência associada a essa órbita.

Em consequência das tentativas para explicar os fenómenos atômicos, surge uma nova mecânica: **mecânica quântica**. Dois conceitos básicos da mecânica quântica são a **dualidade onda-partícula** e o **princípio da incerteza**.

Como vimos, o efeito fotoelétrico torna evidente o carácter dual “onda-partícula” da luz. Mas existe muita evidência experimental que demonstra que a mesma dualidade onda-partícula existe para qualquer outro tipo de matéria ou energia. Por exemplo, os electrões e prótons sofrem difracção, como se fossem uma onda, quando passam através de um cristal. Na mecânica quântica, a dualidade onda-partícula é aceite como algo natural e próprio de qualquer tipo de matéria-energia. A energia é transportada de um ponto para outro na forma de uma onda, mas é absorvida ou emitida em níveis discretos, na forma de partículas (quanta de energia).

O princípio de incerteza é consequência da relação que existe entre a energia e a frequência, equação 4, corroborada também em todas as experiências referidas acima. Relação essa que im-

plica uma relação directa entre o comprimento de onda e o momento linear de uma onda-partícula:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (5)$$

Para podermos observar objectos mais pequenos, o objecto observado deverá ser “iluminado” com radiação de comprimento de onda menor, mas essa radiação terá um momento linear maior que é transferido para o objecto que está a ser observado. Um aumento da precisão na medição de distâncias conduz à diminuição na precisão da medição de momentos lineares.

O princípio de incerteza explica também porque existem átomos estáveis. Do ponto de vista clássico, a rotação de um electrão à volta de um núcleo deveria produzir uma radiação electro-magnética, dando origem a uma perda de energia, suficientemente elevada para que o electrão fosse absorvido pelo núcleo rapidamente. Admitindo uma órbita circular, a força centrípeta que produz o movimento do electrão num núcleo de hidrogénio é a força electrostática com o protão no núcleo:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{ke^2}{r^2} \quad (6)$$

onde k é a constante de Coulomb, e a carga elementar, m a massa do electrão, v o módulo da sua velocidade e r o raio da órbita. A partir dessa relação, obtemos o valor seguinte para o produto entre o momento linear e o raio da órbita:

$$pr = e\sqrt{kmr} \quad (7)$$

portanto, pr aproxima-se de zero, à medida que o electrão se aproxima do núcleo.

Do ponto de vista quântico, o produto pr não pode diminuir indefinidamente, pois o princípio de incerteza diz que

$$\Delta p \Delta r \geq h/4\pi \quad (8)$$

Como p e r são ambas grandezas positivas, as incertezas nas suas medições, Δp e Δr , não podem ultrapassar os valores das próprias variáveis. Isto é:

$$pr \geq \Delta p \Delta r \quad (9)$$

e combinando as equações 7, 8 e 9, conclui-se que

$$r \geq \frac{h^2}{16\pi^2 k m e^2} \quad (10)$$

Usando os valores conhecidos de h , e , k e m , obtemos

$$r \geq 1,33 \times 10^{-11} \text{ m} \quad (11)$$

isto é, o raio da órbita mais pequena em que pode estar o electrão (átomo estável), é da ordem das centésimas de nanometro. Essa é, de facto, a ordem de grandeza medida experimentalmente. Um cálculo mais preciso, usando a equação de Schrödinger, permite obter o valor mais aproximado de 5 centésimas de nanometro.

A mecânica quântica constitui a base física para explicar a origem das reacções químicas e das propriedades químicas da matéria. Embora a sua interpretação filosófica seja ainda alvo de agitados debates na comunidade científica, a grande quantidade de fenómenos físicos que consegue explicar não deixam dúvida acerca da sua veracidade.

6 Núcleos atômicos e radioactividade

As reacções químicas e a ligação entre diferentes átomos são consequência da transição de electrões entre diferentes níveis de energia nos átomos. O espectro atómico de níveis de energia é determinado pela força electromagnética entre electrões e núcleos atômicos.

Na escala do núcleo atómico também existe uma estrutura interna e um espectro de níveis de energia. Os níveis de energia dos **nucleões** (protões e neutrões), no núcleo, é determinado por uma força designada de **força forte**.

Os nucleões (isolados ou a formarem um núcleo) podem ser combinados para dar origem a novos núcleos maiores — fusão nuclear — e um núcleo grande pode dividir-se dando origem a dois novos núcleos menores — **fissão nuclear**. A nível nuclear, esses mecanismos são o equivalente das reacções químicas a nível atómico. A grande diferença está em que as energias envolvidas nas reacções nucleares são muito mais elevadas do que as energias das reacções químicas.

Existem outros tipos de reacções nucleares, que envolvem a transformação de um neutrão em protão, ou ao contrário, e cujo mecanismo físico é uma outra força nuclear designada de **força fraca**. Os núcleos podem também produzir/absorver luz, quando os nucleões passam de um nível energético para outro. É um processo perfeitamente análogo à produção/absorção de luz nos átomos, mas, como as diferenças de energias entre níveis é muito maior, a energia da radiação emitida — **raios gama** — é muito maior do que a radiação visível.

7 A física moderna no laboratório

Não são precisas experiências muito complicadas para estudar os fenómenos quânticos. Esse tipo de fenómenos está presente em experiências simples, como as que serão descritas já a seguir.

No caso da teoria da relatividade, para observar a contracção do espaço ou a dilatação do tempo é preciso usar velocidades muito maiores das que podemos produzir com experiências simples; esse tipo de velocidades são comuns nos aceleradores de partículas. No entanto, existem muitos outros fenómenos naturais onde estão implícitas as consequências da famosa equação relativista $E = mc^2$. Por exemplo, um prego de ferro a enferrujar dentro de um contentor com água, fechado herméticamente. O processo de oxidação do ferro liberta calor que é transferido para o exterior; o sistema perde energia, o qual se traduz numa diminuição da sua massa, embora seja pequena, em função do tempo [5]

7.1 Células fotoeléctricas

Hoje em dia, o efeito fotoeléctrico é utilizado para construir células fotoeléctricas (figura 2), que geram electricidade a partir da luz. Existem no mercado calculadoras electrónicas com preços bastante acessíveis, que usam uma célula fotoeléctrica como fonte de electricidade. Essa célula fotoeléctrica pode ser extraída para fazer demonstrações na sala de aula. Ligando um amperímetro à célula, consegue-se medir a corrente produzida quando a célula é iluminada.

7.2 Díodos emissores de luz

Nos **díodos emissores de luz** (LED) usa-se o efeito oposto ao efeito fotoeléctrico, para produzir luz. Um LED está formado por dois semicondutores do tipo p e n , tal como a célula fotoeléctrica

da figura 2. Quando se liga uma *fem*, produzindo um potencial maior no semiconductor *p*, circula corrente através do LED, no sentido oposto ao sentido indicado na figura 2, e é emitida luz monocromática cada vez que um electrão passa do semiconductor *n* para o *p*. Diferentes LEDs (figura 7) produzem luzes de diferentes cores, por serem construídos com semicondutores diferentes. A cor da luz emitida não depende da cor do plástico usado à volta do LED.



Figura 7: Vários tipos diferentes de LED. Cada algarismo num display numérico está formado por 8 LEDs.

7.3 Característica de um LED

Um LED pode ser usado para realizar experiências muito simples na sala de aula. Por exemplo, para determinar a curva característica do LED, podemos usar o circuito representado no diagrama da figura 8.

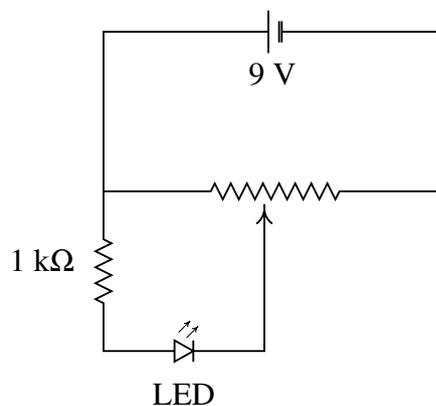


Figura 8: Circuito para determinar a característica tensão-corrente de um LED.

A resistência variável usada é um potenciómetro com resistência na ordem dos $k\Omega$. A fonte de tensão pode ser uma pilha comum de 9 V. O LED deverá ser ligado em série a uma resistência de aproximadamente $1 k\Omega$, para limitar a corrente, pois um LED queima-se facilmente se a corrente ultrapassar algumas dezenas de mA. Ligam-se um voltímetro e um emperímetro, em paralelo e em série com o LED. Rodando o eixo do potenciómetro obtêm-se vários valores diferentes de tensão-corrente.

A figura 9 mostra o resultado dessa experiência, realizada com um LED vermelho. A ordenada na origem é a força contraelectromotriz, \mathcal{E}' do LED, isto é, a energia eléctrica, por unidade de carga, que é transformada em luz no díodo. A energia que um electrão perde, quando atravessa a

diferença de potencial ε' , na interface entre os dois semicondutores, é transformada na energia do fóton produzido. Assim:

$$e\varepsilon' = hf \quad (12)$$

Para os dados experimentais apresentados na figura 9, o resultado da regressão linear produz

$$\varepsilon' = 1,825 \text{ V} \quad (13)$$

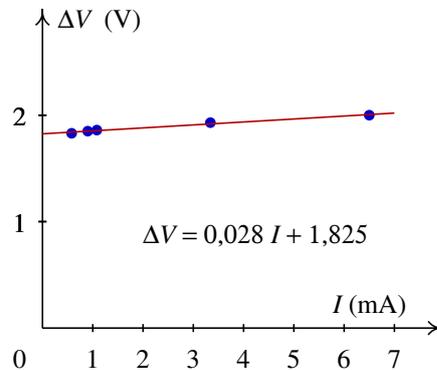


Figura 9: Característica tensão-corrente de um LED vermelho.

Se a experiência for repetida com LEDs de diferentes cores, observa-se que a força contraelectromotriz dos LEDs é directamente proporcional à frequência da luz (os comprimentos de onda dos LEDs disponíveis no mercado podem ser obtidos na referência [7]). A constante de proporcionalidade é a constante de Planck.

Portanto, a experiência anterior permite calcular a constante de Planck a partir da equação 12, usando o valor da carga elementar $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, e sabendo que a frequência da luz dos LED vermelhos é $f = 4,545 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (dado obtido pelo fabricante por meios ópticos). O valor que obtemos é $h = 6,78 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, que é apenas 2% maior do que o valor aceite actualmente: $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

Referências

- [1] N. Maciel, M. M. Gradim, M. J. Campante e J. E. Villate. *Eu e a Física, 12º ano*. Porto Editora, Porto, 2005.
- [2] T. Harris. *How Plasma Displays Work*. <http://www.howstuffworks.com/plasma-display.htm> (consultado em 2005-08-30).
- [3] J. Tyson. *How LCDs Work*. <http://www.howstuffworks.com/lcd.htm> (consultado em 2005-08-30).
- [4] M. Brain. *How Television Works*. <http://www.howstuffworks.com/tv.htm> (consultado em 2005-08-30).
- [5] B. Crowell. *Simple Nature: an Introduction to Physics for Engineering and Physical Science Students*. 2005. <http://www.lightandmatter.com/arealsn.html>
- [6] J. E. Villate. *Exposição de Experiências sobre a Luz*. 2005. <http://fisica.fe.up.pt/luz/>
- [7] J. Hewes. *Light Emitting Diodes (LEDs)*. <http://www.kpsec.freeuk.com/components/led.htm> (consultada em 2005-08-30).