

FÍSICA MODERNA

CAPÍTULO 12

Chamamos de física moderna o conjunto de descobertas revolucionárias que aconteceram nos primeiros anos do século XX. Estas novas ideias vieram a complementar a física vigente na época, que era baseada nas Leis de Newton, do século XVII, e no eletromagnetismo do século XIX, que estudamos até agora. As leis da mecânica newtoniana continuam valendo para o mundo macroscópico onde vivemos. Mas quando queremos entender o mundo microscópico dos átomos e das moléculas, temos que usar os fundamentos da mecânica quântica.

FÍSICA QUÂNTICA

No final do século XIX, o conhecimento relacionado ao eletromagnetismo era considerado como uma teoria completa, sem mais nada a acrescentar. Em outras palavras, todos os fenômenos relacionados com o eletromagnetismo deveriam ser explicados pela teoria vigente na época. Sabia-se, por exemplo, que a luz era uma radiação eletromagnética e que poderia ter qualquer valor de frequência, ou seja, qualquer tonalidade. Mesmo se olharmos o espectro do arco-íris, em que temos 7 faixas principais, entre cada uma das faixas existe um número infinito de tonalidades intermediárias. Em termos físicos, dizemos que o espectro da luz solar é contínuo. Podemos ver em qualquer tonalidade. Para ver um espectro contínuo de cores, aproxime um CD de áudio ou de dados de uma lâmpada incandescente. Conforme a inclinação do disco, será possível ver uma gama de cores desde o vermelho até o violeta, de forma contínua. No entanto, se fizermos essa mesma experiência com uma lâmpada fluorescente branca veremos outro espectro. Para intensificar o efeito, é interessante deixar passar a luz proveniente da lâmpada por uma pequena fresta formada por dois livros ou pedaços de papelão afastados 0,5 cm um do outro.

O que vemos no caso da lâmpada fluorescente são três faixas muito intensas com as cores violeta, verde e laranja. Vamos ver um exemplo mais drástico. É comum vermos um anúncio de pizzaria brilhando num vermelho intenso no meio da noite. Porque todas as pizzarias usam a mesma cor vermelha? A explicação está relacionada com o gás neônio no interior da lâmpada submetido a uma ddp.

Os físicos do final do século XIX já conheciam este efeito. Quando um gás é submetido a uma diferença de potencial, ele emite luz num *espectro discreto*. Em física, o termo discreto tem um sentido diferente daquele que normalmente usamos na linguagem coloquial. Vamos entender esta definição através de exemplos.

Quando subimos uma rampa, podemos dar passos do tamanho que queiramos. Desde passos bem largos, até passos extremamente curtos. Não existe limitação para o menor passo que possamos dar. Dizemos, então, que a rampa é contínua. Já numa escadaria, a situação é diferente. Existe uma limitação do menor passo possível. Podemos dar passos de 1, 2, 3... degraus, mas não podemos dar um passo menor que a altura de um único degrau. Dizemos, então, que a escada é discreta. Vejamos outros exemplos. Podemos deslizar a mão continuamente por uma corda, enquanto que, ao passarmos a mão por uma corrente, observamos elos distintos. A corda se apresenta contínua e a corrente discreta. Uma bola que rola, toca continuamente o solo, enquanto que uma pessoa ao caminhar dá passos discretos.

A lâmpada fluorescente que mencionamos acima possui no seu bulbo o gás mercúrio a baixa pressão. Evite quebrar uma lâmpada dessas, pois o gás Hg é extremamente tóxico e prejudicial ao meio ambiente! Este gás, quando submetido a uma ddp, emite um espectro discreto de luz, ou seja, certo número de cores bem definidas. Os anúncios luminosos possuem o gás nobre neônio, que é completamente inofensivo, mas somente emite luz na cor vermelha.

Não só os gases podem emitir luz. Sabe-se que algumas substâncias sólidas apresentam a propriedade chamada de fosforescência. Os ponteiros dos relógios analógicos são exemplo de aplicação deste fenômeno. Enquanto os ponteiros são iluminados, a tinta fosforescente está a absorver fótons da luz incidente. Quando a luz incidente é removida, a substância brilha no escuro por várias horas.

Para explicar este fenômeno, precisamos lançar mão das ideias que foram propostas no início do século XX por Planck e Einstein, aliadas ao modelo de Bohr para o átomo.

Naquela época, o alemão Max Karl Planck (1858-1947) estudava o que chamamos de *corpo negro*. Definimos em física, um corpo negro como aquele que é capaz de absorver toda luz que incide sobre ele. Um punhado de pó de carvão é um bom exemplo.

Assim como um corpo negro é um excelente absorvedor de radiação, ele também emite radiação com extrema facilidade. Basta colocar fogo no carvão, que podemos observar com nossos olhos a luz emitida. Um bom observador verá que, quanto mais quente estiver o carvão em brasa, mais a sua cor tende ao branco. Se um espeto ou atizador de fogo for colocado por certo tempo junto ao carvão em brasa adquirirá a mesma temperatura do carvão e, além disso, brilhará na mesma cor do carvão. Por outro lado, após o apagar do fogo, ao remexer as cinzas podemos encontrar alguns pedaços de carvão na cor vermelha. Entre esses dois extremos de temperatura, o carvão adquire colorações que vão do vermelho ao amarelo. Em outras palavras, *a cor da luz emitida por um corpo depende de sua temperatura*. Na verdade, todos os corpos com temperatura acima do zero absoluto emitem radiação. Entretanto, à temperatura ambiente, esta radiação situa-se na faixa do infravermelho, que os olhos humanos não são capazes de enxergar. Mas alguns animais sim! Óculos de visão noturna podem fazer a conversão do infravermelho para o espectro visível ao qual o olho humano é sensível.

Planck buscava interpretar a relação entre a cor e a temperatura de um corpo, associando um espectro contínuo de energia à radiação eletromagnética emitida. Após várias e várias tentativas infrutíferas, resolveu tentar, como última solução, um espectro discreto de energia. Foi a sua sorte, pois a teoria explicou perfeitamente as observações. No entanto, Planck era uma pessoa extremamente introvertida e relutou até o último momento em publicar ideia tão revolucionária. Finalmente, em 1900, após chegar à conclusão que a discretização era o único artefato matemático que poderia explicar os fenômenos que estudava, fez a seguinte proposição:

A energia somente pode ser trocada entre diferentes corpos através de um múltiplo inteiro de uma quantidade de energia ao qual chamamos de *quantum*.

Muitos anos antes, em 1887, Heinrich Hertz fez um experimento que mudaria a história da ciência, mas que ele próprio não conseguira explicar. Colocou uma placa metálica no interior de um tubo de vidro evacuado e, ligando-a a terra, observou que, ao ser iluminada com luz ultravioleta, a placa emitia faíscas. No ano seguinte, Wilhelm Hallwachs, observou que a placa ficava carregada positivamente após emitir faíscas. Em outras palavras, o metal emite elétrons sob a incidência de determinado tipo de luz.

Coube ao físico alemão Albert Einstein (1879-1955) explicar o que acontecia neste efeito, o que lhe rendeu mais tarde o prêmio Nobel. Na verdade, a explicação de Einstein acabou por dar um apoio fundamental às novas ideias da mecânica quântica que surgiram no final do século XIX. Einstein propôs que:

A luz incidente é formada por pacotes de energia individuais, cada um possuindo uma energia dada por:

$$E = nhf \quad , \quad n = 1, 2, 3, 4 \dots$$

onde f é a frequência da luz e h é uma constante (de Planck) que vale $6,63 \times 10^{-34}$ J s. O valor desta constante é extremamente pequeno. Isso implica que a discretização entre os níveis de energia de um sistema quântico é normalmente observada em situações em que as energias envolvidas são muito pequenas, como no caso de partículas atômicas ou moleculares.

Cada um destes *quanta* de luz é chamado de *fóton*. Obs: o plural de *quantum* em latim é *quanta*.

Os elétrons emitidos na faísca são chamados de **fotoelétrons**. Vamos analisar em mais detalhes a explicação de Einstein para o fenômeno.

Vemos, da fórmula acima, que quanto maior a frequência da luz, maior a energia de seus fótons. Quando um fóton atinge a superfície metálica, um elétron pode absorver a energia do fóton. Nesta absorção toda energia do fóton é entregue ao elétron de uma só vez, como se fosse um pequeno pacote. Se essa energia for suficientemente alta, o elétron pode ser ejetado da superfície. O mínimo de energia que o elétron precisa adquirir para ser arrancado do metal chama-se de **função trabalho** w , que depende do tipo de metal que é feita a superfície. Por exemplo, no caso do cobre, a função trabalho vale $w_{\text{Cu}} = 7,5 \times 10^{-19}$ J. Se o elétron absorver

uma energia maior do que w , ele é liberado e passa a movimentar-se fora do metal. Sua velocidade vai depender da quantidade de energia que ele teve que usar para vencer a função trabalho. Então, podemos fazer um balanço de energia para determinar a energia cinética que o fotoelétron apresenta no vácuo. Se chamarmos esta energia de K_{max} , temos:

$$K_{max} = hf - w$$

As consequências desta equação podem ser reunidas em quatro características:

1. A energia cinética dos elétrons não depende da intensidade da luz e sim de sua frequência. Duas fontes luminosas com intensidades diferentes, mas que emitam a mesma cor, produzem elétrons com a mesma energia cinética.
2. A emissão de elétrons ocorre instantaneamente após iniciar-se a iluminação. A transferência de energia do fóton incidente para o elétron é instantânea. A absorção não se dá aos poucos.
3. Para que o elétron seja emitido é necessário que $hf > w$, ou seja, é necessário que a luz incidente tenha uma frequência maior que certo limiar. É por isso que infravermelho não causa efeito fotoelétrico, enquanto que luz ultravioleta causa.
4. Quanto maior for a frequência da luz incidente, mais energia terão os fotoelétrons.

Quando o elétron é arrancado da superfície metálica, ele deixa para trás um íon positivo. Radiações com frequência igual ou superior à do ultravioleta são chamadas de ionizantes, pois podem causar a ionização de átomos e moléculas. Para células vivas, essas radiações podem ser extremamente perigosas, pois ao ionizar um átomo da célula certas reações químicas podem ser potencializadas, o que pode comprometer seu correto funcionamento. Tanto é que a luz ultravioleta é utilizada para esterilização em laboratórios de biologia e na indústria de alimentos. A luz ultravioleta proveniente do sol costumava ser filtrada pela camada de ozônio em nossa atmosfera. Entretanto, devido à poluição causada pelo ser humano, a camada de ozônio vem sendo constantemente degradada, em especial nas regiões de latitudes distantes da linha do equador, como é o caso do estado do Rio Grande do Sul. As consequências ao

meio ambiente podem ser terríveis, pois causa a morte de seres microscópicos. Nas pessoas que gostam de tomar sol em excesso já se observa um aumento de problemas de pele que vão desde um simples envelhecimento precoce, até casos graves de câncer de pele.

Vamos, agora, finalmente, passar para o modelo que Niels Bohr propôs para o átomo em 1913, para explicar a emissão de luz pelas substâncias. Seu modelo se baseia em apenas duas afirmações:

1 - *Os elétrons comportam-se como ondas estacionárias, localizando-se em órbitas bem definidas em torno do núcleo.*

Este modelo muitas vezes é chamado de modelo planetário, pois, assim como os planetas giram em torno do Sol, os elétrons girariam em torno do núcleo atômico. Entretanto, no modelo de Bohr, os elétrons não podem estar a qualquer distância no núcleo atômico. O raio de suas órbitas deve ser tal que sua energia seja um múltiplo inteiro da constante h :

$$E = n h f \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

2 - *É permitido que um elétron salte para outro orbital, desde que haja a absorção ou emissão de um fóton.*

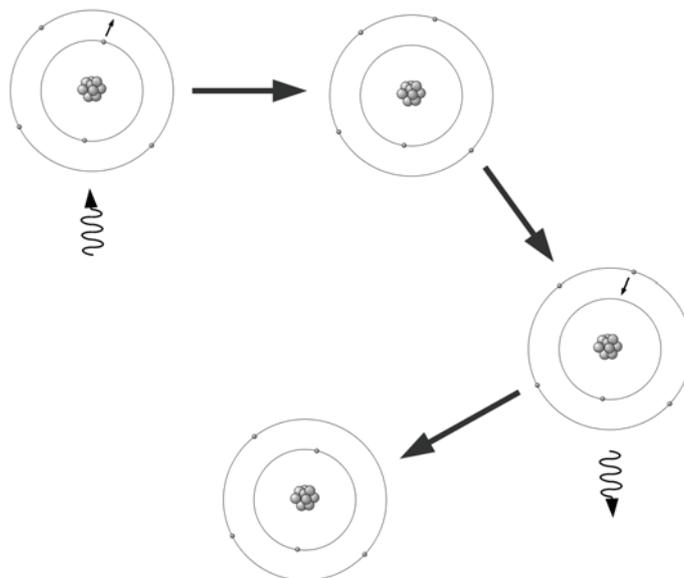
Ou seja, o elétron sofre um acréscimo ou perda de energia que é um múltiplo de h dado pela diferença entre os níveis 1 e 2:

$$E_1 - E_2 = h f$$

Como as órbitas são quantizadas, é necessário absorver um pacote exato de energia para que um elétron salte de um orbital interno para um externo.

Agora podemos entender o fenômeno da emissão de luz que acontece em substâncias fosforescentes. Inicialmente, um fóton externo incide sobre o átomo. Um elétron daquele átomo absorve a quantidade de energia do fóton e salta para um nível de energia mais alto. Dizemos, então, que o elétron encontra-se no estado metaestável: a qualquer momento ele pode decair para o nível de energia mais baixo, o *nível fundamental*. Após certo tempo, o elétron retorna ao nível mais baixo de energia e emite um quantum de energia na forma de um fóton. Devido

ao princípio de conservação da quantidade de movimento, se o fóton é emitido numa certa direção, o átomo sofre um recuo na direção oposta.



Associado às explicações que vimos acima, chegamos a um dos maiores paradoxos da física moderna: a *dualidade onda-partícula*. Dependendo do fenômeno que estivermos estudando, a luz pode se apresentar como onda e obedecer às leis da ótica, ou pode apresentar um comportamento corpuscular como no caso da emissão de luz pelas substâncias.

Mas a coisa não para por aí. Que tal se as partículas materiais também apresentassem essa dualidade?

Como se não bastasse esta novidade surpreendente, que é a dualidade da luz, o duque Louis Victor de Broglie postulou, em 1924, que, da mesma forma que a luz se comporta ora como partícula, ora como onda, as partículas em geral também podem se comportar como onda. Na sua concepção, uma partícula de massa m , que possui um *momentum* dado por $p = m v$ comporta-se de forma ondulatória, apresentando um comprimento de onda dado por:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

É graças a isto que existe o microscópio eletrônico, que nos permite enxergar objetos tão pequenos quanto uma fileira de átomos. No microscópio comum, um feixe de luz é emitido através do corpo que se quer observar. Esta luz é focalizada através de um sistema ótico de lentes que, ao seguir as leis da ótica, propicia um aumento da imagem. No microscópio eletrônico, um feixe de elétrons atravessa a amostra que queremos enxergar. O feixe de elétrons, após atravessar a amostra, é tratado por um sistema de lentes magnéticas, seguindo as leis da ótica, e é ampliado milhares de vezes.

Exemplos:

1. (UFRGS) Um átomo de hidrogênio tem sua energia quantizada em níveis de energia (E_n), cujo valor genérico é dado pela expressão $E_n = -E_0/n^2$, sendo n igual a 1, 2, 3, ... e E_0 igual à energia do estado fundamental (que corresponde a $n = 1$).

Supondo-se que o átomo passe do estado fundamental para o terceiro nível excitado ($n = 4$), a energia do fóton necessário para provocar essa transição é:

a) $\frac{1}{16} E_0$.

b) $\frac{1}{4} E_0$.

c) $\frac{1}{2} E_0$.

d) $\frac{15}{16} E_0$.

e) $\frac{17}{16} E_0$.

2. (UFRGS) Em 1887, quando pesquisava sobre a geração e a detecção de ondas eletromagnéticas, o físico Heinrich Hertz (1857-1894) descobriu o que hoje conhecemos por efeito fotoelétrico. Após a morte de Hertz, seu principal auxiliar, Philip Lenard (1862-1947), prosseguiu a pesquisa sistemática sobre o efeito descoberto por Hertz. Entre as várias constatações experimentais daí decorrentes, Lenard observou que a energia cinética máxima, K_{\max} , dos elétrons emitidos pelo metal era dada por uma expressão matemática bastante simples:

$$K_{\max} = B f - C,$$

onde B e C são duas constantes cujos valores podem ser determinados experimentalmente. A respeito da referida expressão matemática, considere as seguintes afirmações.

- I. A letra f representa a frequência das oscilações de uma força eletromotriz alternada que deve ser aplicada ao metal.
- II. A letra B representa a conhecida Constante de Planck, cuja unidade no Sistema Internacional é J.s.
- III. A letra C representa uma constante, cuja unidade no Sistema Internacional é J, que corresponde à energia mínima que a luz incidente deve fornecer a um elétron do metal para removê-lo do mesmo.

Quais estão corretas?

- a) Apenas I.
- b) Apenas II.
- c) Apenas I e III.
- d) Apenas II e III.
- e) I, II e III.

3. (UFRGS) O espectro de radiação emitido por um corpo negro ideal depende basicamente de

- a) seu volume.
- b) sua condutividade térmica.
- c) sua massa.
- d) seu calor específico.
- e) sua temperatura.

Exercícios:

1. (UFCSPA) Assinale a alternativa que preenche correta e respectivamente as lacunas do texto abaixo.

Em 2005, Ano Mundial da Física, comemorou-se um século do *annus mirabilis* de Albert Einstein: há cem anos Einstein publicou três trabalhos que vieram a revolucionar a física. Em um deles lançou as bases do que depois veio a se chamar a Teoria da Relatividade Restrita. Em outro trabalho, pelo qual lhe foi outorgado, em 1921, o Prêmio Nobel, desenvolveu uma explicação para o efeito fotoelétrico, isto é, para o fato de que, quando uma superfície metálica absorve luz, com _____ acima de um valor mínimo, ocorre a emissão de _____, sendo o número destas partículas emitidas dependente da _____ da luz absorvida pelo metal.

- a) frequência – fótons – intensidade
- b) frequência – elétrons – intensidade
- c) intensidade– fótons – frequência
- d) intensidade– elétrons – frequência
- e) intensidade– fótons – intensidade

2. (PUCRS) A escolha do ano de 2005 como o Ano Mundial da Física teve como um de seus objetivos a comemoração do centenário da publicação dos primeiros trabalhos de Albert Einstein. No entanto, é importante salientar que muitos outros cientistas contribuíram para o excepcional desenvolvimento da física no século passado. Entre eles cabe destacar Max Planck, o qual, em 1900, propôs a teoria da quantização da energia. Segundo esta teoria, um corpo negro irradia energia de forma _____, em porções que são chamadas de _____, cuja energia é proporcional à _____ da radiação eletromagnética envolvida nessa troca de energia.

A sequência de termos que preenche corretamente as lacunas do texto é:

- a) descontínua – prótons – frequência
- b) contínua – prótons – amplitude

- c) descontínua – fótons – frequência
- d) contínua – fótons – amplitude
- e) descontínua – elétrons – frequência

3. (La Salle) O efeito fotoelétrico usado em sensores elétricos de luz, como as células fotoelétricas, rendeu a Albert Einstein o Nobel de Física de 1921. O efeito fotoelétrico

- a) é a capacidade de o material irradiar energia no espectro visível.
- b) refere-se à capacidade da luz de fixar elétrons em uma superfície de metal.
- c) refere-se ao curvamento da luz quando próxima de corpos de massa muito grande.
- d) refere-se às radiações que, atingindo uma superfície metálica, cedem energia aos elétrons do metal, “arrancando-os” do mesmo.
- e) refere-se ao funcionamento de uma central termelétrica.

4. (PUCRS) A quantização da energia eletromagnética é evidenciada no efeito

- a) Doppler.
- b) Oersted.
- c) paramagnético.
- d) fotoelétrico.
- e) Joule.

5. (PUCRS) Após inúmeras sugestões e debates, o ano 2005 foi declarado pela ONU o “Ano Mundial da Física”. Um dos objetivos dessa designação é comemorar o centenário da publicação dos trabalhos de Albert Einstein, que o projetaram como físico no cenário internacional da época e, posteriormente, trouxeram-lhe fama e reconhecimento. Um dos artigos de Einstein publicado em 1905 era sobre o efeito fotoelétrico, que foi o principal motivo da sua conquista do Prêmio Nobel em 1921. A descrição de Einstein para o efeito fotoelétrico tem origem na quantização da energia proposta por Planck em 1900, o qual considerou a energia eletromagnética irradiada por

um corpo negro de forma descontínua, em porções que foram chamadas *quanta* de energia ou fótons. Einstein deu o passo seguinte admitindo que a energia eletromagnética também se propague de forma descontínua e usou esta hipótese para descrever o efeito fotoelétrico.

Em relação ao efeito fotoelétrico numa lâmina metálica, pode-se afirmar que:

I. A energia dos elétrons removidos da lâmina metálica pelos fótons não depende do tempo de exposição à luz incidente.

II. A energia dos elétrons removidos aumenta com o aumento do comprimento de onda da luz incidente.

III. Os fótons incidentes na lâmina metálica, para que removam elétrons da mesma, devem ter uma energia mínima.

IV. A energia de cada elétron removido da lâmina metálica é igual à energia do fóton que o removeu.

Analisando as afirmativas, conclui-se que somente:

- a) está correta a afirmativa I.
- b) está correta a afirmativa IV.
- c) estão corretas as afirmativas I e III.
- d) estão corretas as afirmativas II e IV.
- e) estão corretas as afirmativas III e IV.

6. (IPA) Normalmente, quando se faz um desenho, costuma-se representar ambientes frios com cores de tons azulados. Para os ambientes quentes, buscam-se cores de tons avermelhados. No estudo da arte, diz-se, até, que as cores azuis são frias e as vermelhas são quentes. Porém quando se estudam as radiações, principalmente as luminosas, verifica-se o contrário: que o vermelho é a cor mais fria e o azul é a cor mais quente. Isto é, no espectro das cores (que a física costuma chamar de “radiações”), se se deslocar do azul para o vermelho, tem-se um decréscimo do valor da energia das radiações. O estudo das radiações garante que a energia liberada por uma radiação é diretamente proporcional ao valor de sua frequência. Isto pode ser escrito na forma

$$E = h f,$$

onde h é uma constante de proporcionalidade denominada de “constante de Planck”.

Comparando-se entre si as “cores” *laranja*, *amarelo* e *verde* do espectro luminoso, pode-se avaliar que a ordem de valores das respectivas frequências corresponde, respectivamente a:

- a) maior, médio e menor;
- b) médio, menor e maior;
- c) menor, maior e médio;
- d) médio, maior e menor;
- e) menor, médio e maior.

7. (PUCRS) O dualismo onda-partícula refere-se a características corpusculares presentes nas ondas luminosas e a características ondulatórias presentes no comportamento de partículas, tais como elétrons. A Natureza nos mostra que características corpusculares e ondulatórias não são antagônicas mas, sim, complementares. Dentre os fenômenos listados, o único que não está relacionado com o dualismo onda-partícula é:

- a) o efeito fotoelétrico.
- b) a ionização de átomos pela incidência de luz.
- c) a difração de elétrons.
- d) o rompimento de ligações entre átomos pela incidência de luz.
- e) a propagação, no vácuo, de ondas de rádio de frequência média.

8. (UFRGS) Assinale a alternativa que preenche corretamente a lacuna do parágrafo abaixo:

O ano de 1900 pode ser considerado o marco inicial de uma revolução ocorrida na física do século 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.

- a) conservação
- b) quantização
- c) transformação
- d) conversão
- e) propagação

9. (UFRGS) No início do século XX, as teorias clássicas da física - como o eletromagnetismo de Maxwell e a mecânica de Newton - não conduziam a uma explicação satisfatória para a dinâmica do átomo. Nessa época, duas descobertas históricas tiveram lugar: o experimento de Rutherford demonstrou a existência do núcleo atômico, e a interpretação de Einstein para o efeito fotoelétrico revelou a natureza corpuscular da interação da luz com a matéria. Em 1913, incorporando o resultado dessas descobertas, Bohr propôs um modelo atômico que obteve grande sucesso, embora não respeitasse as leis da física clássica.

Considere as seguintes afirmações sobre a dinâmica do átomo.

I - No átomo, os raios das órbitas dos elétrons podem assumir um conjunto contínuo de valores, tal como os raios das órbitas dos planetas em torno do Sol.

II - O átomo pode existir, sem emitir radiação, em estados estacionários cujas energias só podem assumir um conjunto discreto de valores.

III - O átomo absorve ou emite radiação somente ao passar de um estado estacionário para outro.

Quais dessas afirmações foram adotadas por Bohr como postulados para o seu modelo atômico?

- a) Apenas I.
- b) Apenas II.
- c) Apenas III.
- d) Apenas II e III.
- e) I, II e III.

10. (UFRGS) Selecione a alternativa que preenche corretamente as lacunas do texto abaixo, na ordem em que elas aparecem.

Uma lâmpada de iluminação pública contém vapor de mercúrio a baixa pressão. Quando ela está em funcionamento, dois eletrodos no interior da lâmpada submetem o gás a uma tensão, acelerando os íons e os elétrons. Em consequência das colisões provocadas por essas partículas, os átomos são levados a estados estacionários de energia mais alta (estados excitados). Quando esses átomos decaem para estados menos excitados, ocorre emissão de luz. A luz emitida pela lâmpada

apresenta, então, um espectro , que se origina nas de elétrons entre os diferentes níveis de energia.

- a) discreto - transições - atômicos
- b) discreto - transições - nucleares
- c) contínuo - colisões - atômicos
- d) contínuo - colisões - nucleares
- e) contínuo - transições - atômicos

11. (UFRGS) A intensidade luminosa é a quantidade de energia que a luz transporta por unidade de área transversal à sua direção de propagação e por unidade de tempo. De acordo com Einstein, a luz é constituída por partículas, denominadas fótons, cuja energia é proporcional à sua frequência.

Luz monocromática com frequência de 6×10^{14} Hz e intensidade de $0,2 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}$ incide perpendicularmente sobre uma superfície de área igual a 1 cm^2 . Qual o número aproximado de fótons que atinge a superfície em um intervalo de tempo de 1 segundo?

(Constante de Planck: $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

- a) 3×10^{11} .
- b) 8×10^{12} .
- c) 5×10^{13} .
- d) 4×10^{14} .
- e) 6×10^{15} .

RELATIVIDADE

Quando Einstein tinha 17 anos, ele se perguntava: “como deve parecer um raio de luz se alguém que estiver à velocidade da luz o observar?” Aos 26 anos, ele publicou um artigo na revista alemã *Annalen der Physik* que fornecia as pistas para a resposta a esta pergunta.

As elucubrações de Einstein eram completamente produto de seu raciocínio, ou seja, ele nunca foi ao laboratório comprovar suas ideias. Isso coube a outros cientistas, que por sinal sempre acabaram

ratificando suas hipóteses. Einstein chamava seus raciocínios de *experiências mentais*. Para facilitar nosso aprendizado da relatividade de Einstein, vamos também desenvolver uma experiência mental.

Vamos fazer uma experiência mental em dois momentos: o primeiro momento corresponde ao princípio da relatividade de Galileu e o segundo corresponde ao princípio da relatividade de Einstein. Nesta experiência mental que iniciamos, Filomena será nossa personagem principal.

Filomena tirou umas férias e foi curtir esse tempo em um cruzeiro a bordo de um imenso transatlântico. A viagem até o Caribe demora vários dias, mesmo que os motores do navio estejam a pleno vapor. O navio viaja com velocidade constante e em linha reta. Devido ao seu grande tamanho, as ondas não conseguem balançar o barco. Para passar o tempo, Filomena passeia entre os vários andares do navio, e repara várias coisas. Quando passa no restaurante, fica a olhar um aquário repleto de peixes coloridos. Ainda que o barco esteja se deslocando com velocidade constante, os peixes distribuem-se uniformemente pelo volume do aquário e não se acumulam em uma das paredes de vidro, como poderia se pensar. Ao passar no salão de jogos, Filomena vê dois sujeitos se defrontando numa partida de sinuca. Mesmo com o barco em movimento, as bolas não correm todas para um canto da mesa. Os jogadores de pingue-pongue também continuam jogando normalmente, sem sentir o movimento do barco. No salão de baile, Filomena olha para os lustres e vê que estão todos pendentes na vertical e não com algum ângulo em relação à vertical, como alguém poderia supor devido ao movimento do barco. Para Filomena, tudo acontece como se o barco estivesse completamente parado.

Todos estes efeitos estão sujeitos às leis da mecânica. Filomena, sem olhar para fora do barco, não consegue dizer se o mesmo encontra-se ancorado ou navegando, apenas observando os fenômenos que acontecem em seu interior. Podemos então enunciar o princípio da relatividade de Galileu: *as leis da mecânica são as mesmas para todos os corpos que estiverem em um referencial inercial*. Einstein estendeu este princípio para toda a física que, além de conter a mecânica, engloba a termodinâmica, o eletromagnetismo, a ótica e a quântica.

1 – *As leis da física valem para todos os sistemas inerciais, independentemente do referencial em que se encontrem.*

As leis da mecânica de Newton são baseadas no princípio da relatividade de Galileu. Elas continuam sendo válidas para fenômenos que acontecem a baixas velocidades, que é o cotidiano da maioria das pessoas. No entanto, quando vamos a velocidades mais altas, aquelas leis perdem a validade e temos que usar a relatividade de Einstein. Para que os efeitos relativísticos sejam notados é necessário que os corpos se movimentem a uma velocidade de pelo menos 10% da velocidade da luz, que é de 300.000 km/s.

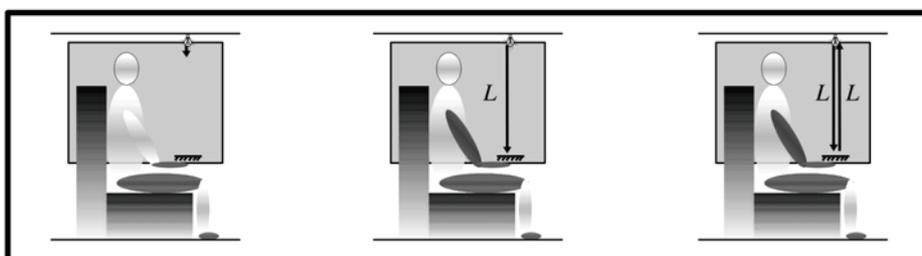
Cabe agora, enunciar o segundo postulado da relatividade de Einstein.

2- A velocidade da luz no vácuo c é a máxima velocidade que pode ser atingida no universo e é sempre a mesma para qualquer referencial.

Para analisar as consequências destes dois postulados, vamos continuar a nossa experiência mental.

Após as merecidas férias, Filomena desembarca no porto e toma um trem de levitação magnética para ir para casa. Este trem atinge uma velocidade de cerca de 500 km/h e não faz nenhuma escala entre a primeira e a última parada de sua linha. Meia hora antes de chegar ao destino final do trem, Filomena resolve retocar a maquiagem. Com a mão esquerda tira da bolsa um pequeno espelho. Como é noite, Filomena precisa ligar a luz que fica no teto do trem acima de sua poltrona. Com o braço direito, Filomena aciona o botão da luz no braço da poltrona. Casualmente, no exato instante que Filomena ligou a luz, ela passava por uma pequena estação ferroviária onde algumas pessoas esperavam a chegada do próximo trem. Uma pessoa na estação observa o exato instante em que a luz interna do trem foi ligada por Filomena e marca no seu relógio o tempo em que isso ocorreu. O feixe de luz é então emitido da lâmpada e atinge o espelho na mão esquerda de Filomena, que casualmente está na posição horizontal. Assim, o feixe acaba sendo refletido de volta ao ponto inicial. Uma segunda pessoa que estava mais adiante na estação ferroviária, marca em seu relógio o instante exato em que o feixe retorna à lâmpada. Filomena também cronometra em seu relógio o tempo Δt que a luz levou para ser emitida, refletir no espelho e chegar novamente ao ponto de partida. Denominaremos este tempo de *tempo*

próprio. As duas pessoas que estavam na estação conversam entre si, comparam seus relógios e observam que estão perfeitamente sincronizados. Então elas calculam o tempo da luz ir e voltar e encontram o valor $\Delta t'$. Enquanto Filomena continua a viagem no trem, vai deixando para trás aquela pequena estação, mas se faz a pergunta: “Será que o tempo que eu medi tem o mesmo valor que o tempo que aquelas duas pessoas mediram?” Ou, em termos matemáticos, será que $\Delta t = \Delta t'$?



Lembrando da cinemática, sabemos que a velocidade é dada por:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

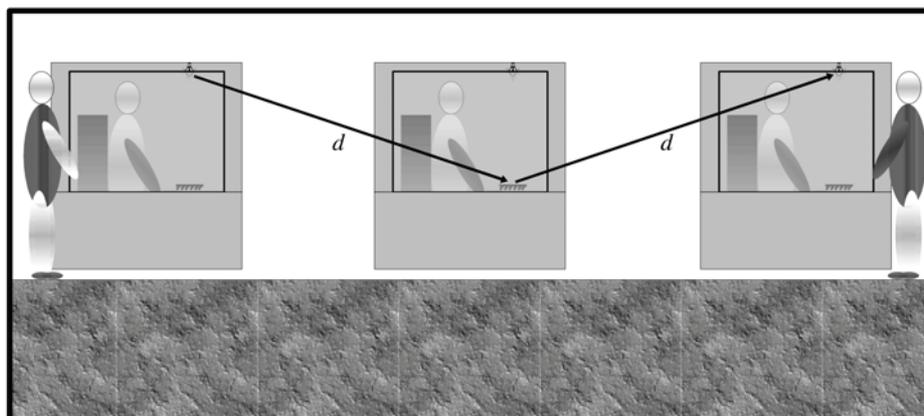
Assim sendo, Filomena mede o tempo Δt que o raio leva para percorrer o caminho de ida e volta $2L$ e é dado em termos da velocidade da luz c :

$$c = \frac{2L}{\Delta t}$$

O primeiro postulando de Einstein nos diz que as leis da ótica devem ser respeitadas em qualquer sistema de referência que não esteja acelerado, ou seja, o raio de luz deve ser refletido no espelho. Então, se Filomena observa a reflexão do raio no espelho, as pessoas na estação também enxergarão esta reflexão, mas de uma forma um pouco diferente, pois o trem encontra-se em movimento em relação a eles.

A velocidade do raio de luz observado da plataforma é:

$$c = \frac{2d}{\Delta t'}$$



Pelo segundo postulado, a velocidade da luz deve ser constante em qualquer referencial. Então, podemos igualar as duas expressões acima para c :

$$\frac{2d}{\Delta t'} = \frac{2L}{\Delta t}$$

Relacionando d e L pelo teorema de Pitágoras e lembrando novamente da definição de velocidade, chega-se finalmente a:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Num trem de levitação a 500 km/h, os efeitos relativísticos são imperceptíveis, pois a razão v/c é muito pequena, e ficamos com $\Delta t \approx \Delta t'$. Para velocidades baixas em relação à luz, os fenômenos relativísticos são desprezíveis e a velha mecânica de Newton continua valendo. Mas e se em vez de trem, estivéssemos numa plataforma espacial observando o mesmo fenômeno, mas com uma nave passando com a metade da velocidade da luz?

Neste caso, o tempo medido na plataforma seria 15% maior que o tempo medido por Filomena dentro da nave. Ou seja, o tempo para Filomena passou mais devagar do que para os observadores na plataforma!

Esta dilatação temporal nos leva ao seguinte paradoxo. Se Filomena embarcasse num cruzeiro espacial que passasse vários anos viajando numa velocidade muito próxima da luz e sua irmã gêmea, Filirmina,

ficasse na Terra, o que aconteceria? No final do cruzeiro espacial, ao retornar à Terra, Filomena estaria muito mais jovem que Filirmina, pois o tempo na nave teria passado muito mais lentamente do que na Terra.

Assim como o tempo passa mais devagar, o comprimento dos corpos na direção do movimento diminui. Se em repouso um corpo possui um *comprimento próprio* L , quando em movimento ele diminui seu comprimento para L' :

$$L' = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Quando um corpo está com uma velocidade comparável à da luz, sua massa aumenta da seguinte quantidade:

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Assim sendo, se tentarmos acelerar um corpo até a velocidade da luz, sua massa vai ficando cada vez maior, e será necessário cada vez mais energia para aumentar a velocidade do corpo. É por isso que até hoje nunca ninguém conseguiu chegar à velocidade da luz. Nem mesmo elétrons, que são extremamente leves, atingiram este objetivo. Somente corpos sem massa podem viajar a velocidade da luz. No ano de 2008, foi inaugurado na fronteira da França com a Suíça, o Grande Acelerador de Hádrons (LHC, na sigla em inglês), que foi projetado para acelerar partículas atômicas a mais alta velocidade já atingida em algum experimento desenvolvido pelo ser humano: 99,999% da velocidade da luz.

Outro resultado da teoria da relatividade é que podemos transformar massa em energia pura. Assim, um corpo que no repouso tiver massa m pode ser convertido em energia E pela famosa fórmula.

$$E = mc^2$$

Esta fórmula será estudada em mais detalhes na próxima seção, que abrange a física nuclear.

O que vimos até agora, é chamado de relatividade restrita (ou especial), porque se restringe a apenas referenciais inerciais. Quando generalizamos para sistemas que sofrem aceleração temos a relatividade geral. Uma das consequências da relatividade geral é a de que o espaço é curvo. Esse fenômeno foi confirmado pela primeira vez em 1919, numa expedição para o interior do nordeste brasileiro para assistir um eclipse total do Sol. Devido à sua grande massa, o Sol encurva o espaço à sua volta. A luz, ao passar numa região em que o espaço é curvo, segue a sua curvatura. Assim, durante aquele eclipse, enquanto o Sol estava tapado pela Lua e o céu ficou escuro, estrelas que deveriam estar atrás do sol foram vistas ao seu lado, conforme previra a teoria de Einstein.

Exemplo:

4. (La Salle) De acordo com a Teoria da Relatividade Restrita, a expressão para a massa relativística de um corpo em que m_0 é a massa de repouso do corpo (medida em um referencial em relação ao qual o corpo está em repouso), c é a velocidade da luz no vácuo e v é a velocidade do corpo.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Uma extraterrestre faz amizade com um professor de física. Ao partir, ela deixa sua poderosa arma laser para o professor, e a única coisa que o professor possui para retribuir o presente é o pequeno *bóton* com a foto de Albert Einstein, cuja massa vale aproximadamente 10 g. Na volta ao seu planeta natal, a nave da extraterrestre viaja a uma velocidade tal que $v^2/c^2 = 0,9999$. A massa do bóton medida nestas condições registrará aproximadamente:

- a) 0,10 kg.
- b) 1,0 kg.
- c) 10 kg.
- d) 100 kg.
- e) 1000 kg.