

FÍSICA

Moderna

Único

Pré-vestibular Física Moderna

SISTEMA DE ENSINO
POLIEDRO

Autoria: Marcílio Alberto de Faria Pires.

Diretor executivo: Nicolau Arbex Sarkis.

Cerência editorial: João Carlos Puglisi.

Coordenação de edição técnica: Marília L. dos Santos G. Ribeiro.

Edição técnica: Bruno Barbagallo Fonseca.

Coordenação de produção editorial: Livia Scherrer dos Santos.

Analista de produção editorial: Claudia Moreno Fernandes.

Coordenação de edição: Michelle Silva da Mata e Vivian Plascak Jorge.

Edição: Equipes de edição da Editora Poliedro.

Coordenação de revisão: Mariana Castelo Queiroz.

Revisão: Equipe de revisão da Editora Poliedro.

Coordenação de arte: Antonio Domingues e Kleber S. Portela.

Diagramação: Equipe de arte da Editora Poliedro.

Ilustrações: Equipes de ilustração e de arte da Editora Poliedro.

Coordenação de licenciamento: Ana Rute A. M. Perugini.

Licenciamento: Equipe de licenciamento da Editora Poliedro.

Projeto gráfico: Alexandre Moreira Lemes e Kleber S. Portela.

Projeto gráfico da capa: Bruno Torres.

Coordenador de PCP: Anderson Flávio Correia.

Impressão e acabamento: nyuigraf Editora Gráfica Ltda.

Créditos: capa e frontispício DaCek/Shutterstock 5 EFDA-JET • National Cancer Institute
• Sturm/Wikipedia contracapa Elinalee/Shutterstock.

A Editora Poliedro pesquisou junto às fontes apropriadas a existência de eventuais detentores dos direitos de todos os textos e de todas as obras de artes plásticas presentes nesta obra, sendo que sobre alguns nenhuma referência foi encontrada. Em caso de omissão, involuntária, de quaisquer créditos faltantes, estes serão incluídos nas futuras edições, estando, ainda, reservados os direitos referidos nos arts. 28 e 29 da lei 9.610/98.

SISTEMA DE ENSINO
POLIEDRO

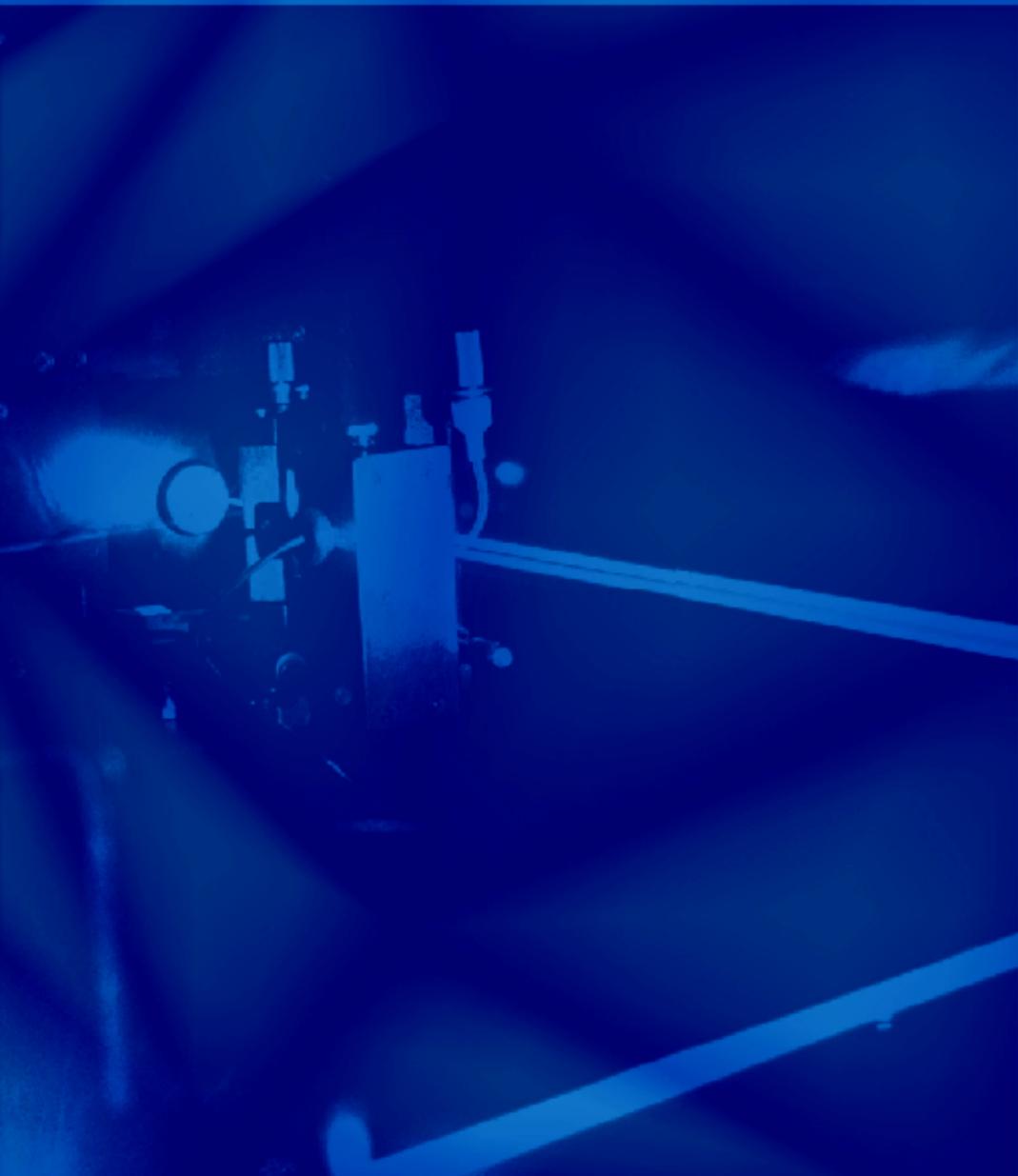
São José dos Campos - SP
ISBN: 978-85-7901-140-5
Telefax: (12) 3924-1616
editora@sistemapoliedro.com.br
www.sistemapoliedro.com.br

Copyright © 2015
Todos os direitos de edição reservados à Editora Poliedro

SUMÁRIO

1	Princípios básicos da Física quântica	6
	Considerações iniciais.....	7
	Revisando	13
	Exercícios propostos	14
	Textos complementares.....	16
	Exercícios complementares	19
2	Átomo de Bohr	22
	O átomo e o espectro de raios.....	23
	Revisando	25
	Exercícios propostos	26
	Texto complementar	29
	Exercícios complementares	30
3	Física nuclear e radioatividade	33
	Introdução.....	34
	Revisando	39
	Exercícios propostos	40
	Texto complementar	41
	Exercícios complementares	46
4	Ondas e matéria	50
	Teoria partícula-onda de De Broglie	51
	O princípio da incerteza de Heisenberg	52
	Revisando	53
	Exercícios propostos	53
	Textos complementares.....	54
	Exercícios complementares	58
5	Teoria da Relatividade Restrita de Einstein	61
	Introdução.....	62
	Revisando	70
	Exercícios propostos	71
	Texto complementar	74
	Exercícios complementares	76
	Cabarito	79





Física Moderna

1

Princípios básicos da Física quântica



O CCD, sigla inglesa para Charge-Coupled Device, ou dispositivo de carga acoplada, comumente empregado em fotografia digital, funciona com uma matriz fotossensível, utilizando-se do efeito fotoelétrico. Descoberto no final do século XIX pelo físico alemão Heinrich Hertz, o efeito fotoelétrico foi explicado por Albert Einstein em 1905, baseado nos resultados do físico Max Planck a respeito do corpo negro.

Considerações iniciais

Ao iniciarmos nosso estudo a respeito dos tópicos de Física moderna, como a Física quântica, é importante que tenhamos a mente bastante aberta para que os conceitos tão arraigados da Física clássica não nos atrapalhem a compreensão dos novos conceitos que serão apresentados.

A Física quântica permite a explicação de muitos fenômenos, como o comportamento do átomo, de uma forma bastante precisa. Começemos então o nosso estudo.

Introdução

No final do século XIX, a humanidade havia chegado a um nível de desenvolvimento científico espantoso porque vivíamos a Segunda Revolução Industrial, sustentada pelos motores elétricos. Navios a vapor de grande porte atravessavam o mundo, as pessoas eram transportadas por trens a vapor.

No entanto, esse desenvolvimento científico já existia, sendo que na Física, a mecânica newtoniana, desenvolvida inicialmente por Galileu e Newton nos séculos XVII e XVIII, havia sido bastante aperfeiçoada nos séculos subsequentes e conseguia determinar com precisão o comportamento de corpos celestes. A teoria eletromagnética de Maxwell descrevia com clareza os fenômenos elétricos e magnéticos, mostrando que a luz é uma onda eletromagnética que se propaga pelo espaço.

O Lorde Kelvin, um físico respeitado pelas suas grandes observações sobre a Física, sugeriu que a mesma havia atingido seu limite. Porém, como ele mesmo observou, ainda existiam dois fenômenos que ainda não estavam resolvidos:

- o experimento de Michelson e Morley, que indicava não haver movimento relativo da Terra em relação ao éter;
- o estudo da distribuição de energia da luz emitida por um corpo negro.

Os resultados do experimento de Michelson e Morley contribuíram para a aceitação da Teoria da Relatividade Restrita, de Einstein, como será estudado no capítulo 5 desse livro.

O estudo sobre a distribuição de energia da luz emitida por um corpo negro constituiu a base para a formulação da mecânica quântica e é um dos objetivos deste capítulo.

O corpo negro

Para entendermos o problema enfrentado pela comunidade científica do final do século XIX, em relação à distribuição de energia da luz emitida por um corpo negro, precisamos primeiramente entender o que é um corpo negro.

Observe a figura 1, na qual se vê um corpo sendo atingido por radiação.

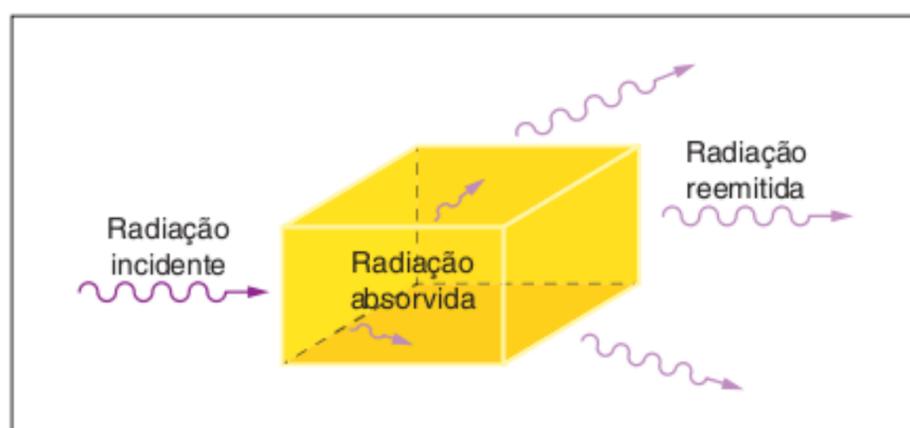


Fig. 1 Absorção e reemissão de energia da radiação.

Ao ser atingido pela radiação, observa-se que o corpo absorve uma parte dela e reemite outra. Em 1859, o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), estudando as relações entre as energias emitidas e absorvidas pelos corpos, definiu duas leis de radiação que tinham como resultado principal o fato de a frequência emitida pelos corpos, quando aquecidos, ser função única da temperatura absoluta e, como segundo resultado, o conceito de corpo negro.

O corpo negro é uma abstração de uma estrutura que tem a capacidade de absorver toda a energia nele incidente, independentemente da frequência da radiação incidente, e emitir toda a radiação gerada por ele próprio. Sendo assim, o corpo negro não é necessariamente negro.

Para obtermos um corpo negro, podemos pensar em uma cavidade com um pequeno furo de forma que a radiação nele incidente fique “aprisionada” no interior da cavidade, conforme se observa na figura a seguir.

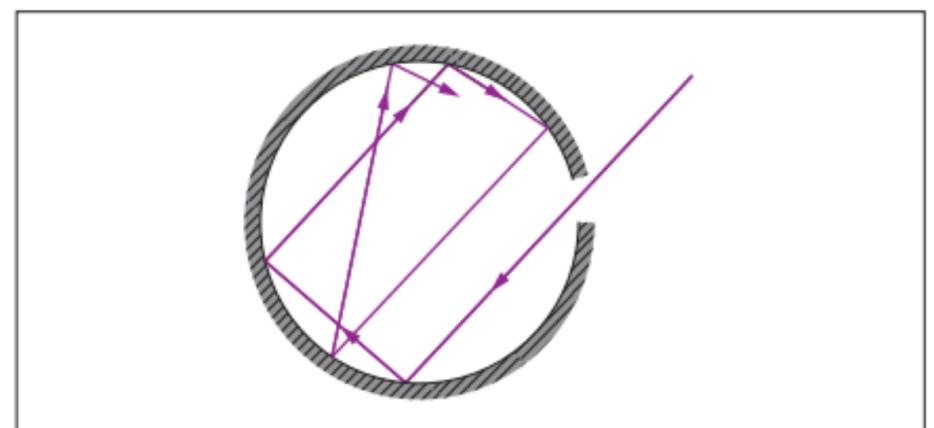


Fig. 2 Esquema de um corpo negro.

Para explicar a radiação do corpo negro, pensava-se que a agitação térmica provocava oscilações nos átomos constituintes do material, que por sua vez geravam ondas eletromagnéticas. Isso se deve ao fato de a teoria eletromagnética de Maxwell afirmar que cargas elétricas aceleradas emitiam radiação.

No caso do corpo negro, o interior da cavidade tende a entrar em equilíbrio com as radiações emitidas e absorvidas pelos diversos átomos oscilando. Através do furo, pode-se medir um pouco da radiação emitida pelo interior da cavidade. Esse corpo negro é denominado irradiador de cavidade.

Tomando-se blocos de diferentes materiais e fazendo-se neles pequenos orifícios, foi observado por dois físicos austríacos, Josef Stefan (1835-1893) e Ludwig Boltzmann (1844-1906), que a intensidade total da energia emitida pelo orifício, expressa em potência por unidade de área $\left(\frac{W}{m^2}\right)$, é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura absoluta, tal que:

$$R_{CN} = \sigma \cdot T^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Na equação (1), R_{CN} é denominada radiância do corpo negro, σ é a constante de **Stefan-Boltzmann** e vale $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ e T é a temperatura absoluta do material. Observa-se que a radiação oriunda do interior da cavidade (corpo negro) independe do material do qual é feito o corpo.

Para a parte externa do bloco, a radiância da superfície (R_s) depende do material, sendo caracterizada pela sua emissividade (ϵ), tal que:

$$R_s = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = \epsilon \cdot R_{CN} \quad (2)$$

Na tabela 1, pode-se observar a emissividade de alguns corpos à temperatura de 300 K.

Material	Emissividade (ϵ)
Alumínio polido	0,05
Alumínio oxidado	0,10
Cobre polido	0,03
Cobre oxidado	0,50
Grafite	0,70
Superfície plana branca	0,87
Vidro	0,90 a 0,95
Ladrilho vermelho	0,93
Concreto	0,94
Superfície plana preta	0,94
Fuligem	0,94
Corpo negro	1,0

Tab. 1 Valores de emissividade para diversos corpos.

O problema a ser resolvido era a explicação da curva de distribuição de energia emitida pelo corpo negro a uma dada temperatura em função do comprimento de onda λ . Essa curva pode ser vista na figura a seguir, na qual é mostrada a radiância espectral do tungstênio em função do comprimento de onda, para a temperatura de 2.000 K.

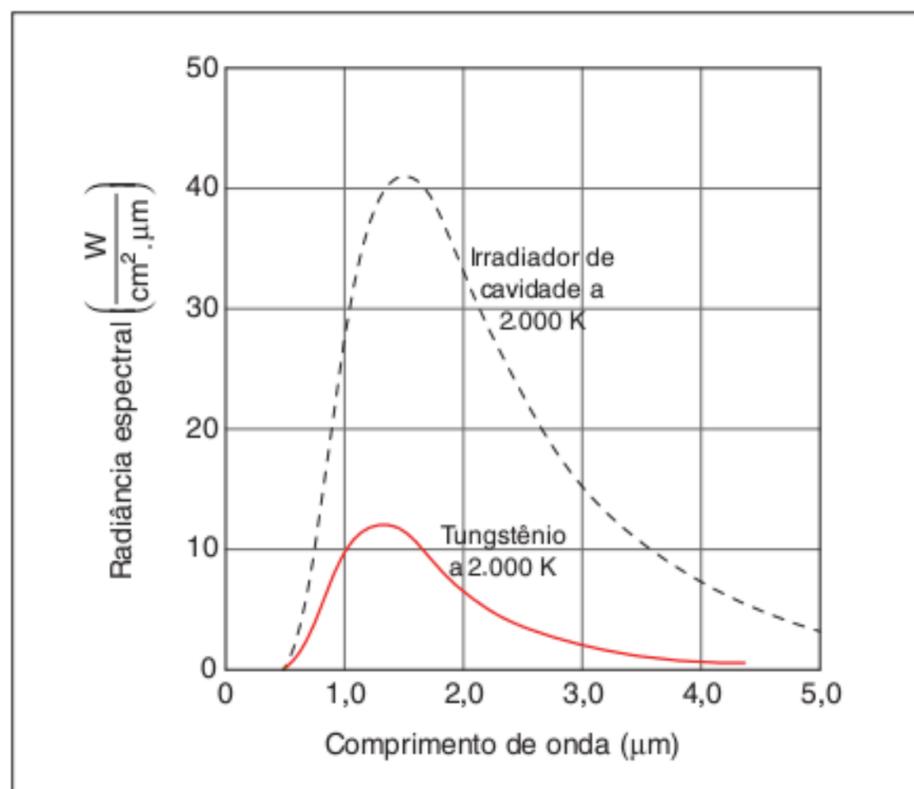


Fig. 3 Radiância espectral R_λ do tungstênio a 2.000 K.

Nenhum cientista conseguia uma teoria que explicasse adequadamente esse comportamento.

Em 1894, o alemão Wilhelm Wien (1864-1928) fez uma demonstração teórica na qual afirmava que o comprimento de onda em que se tinha o pico de radiância espectral era função única da temperatura absoluta T , tal que:

$$\lambda = \frac{2,898}{T} (\text{mm. K}) \quad (3)$$

Wien afirmava ainda que a forma da curva era sempre a mesma, independentemente do material que constituía a cavidade.

Ele também chegou a uma expressão matemática para a distribuição espectral de energia, sua expressão era:

$$R_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}} \quad (4)$$

Nessa expressão, R_λ é o valor da radiância espectral, λ é o comprimento de onda e T é a temperatura absoluta em kelvins. As constantes c_1 e c_2 são determinadas experimentalmente e são aquelas que se ajustam melhor à curva. A expressão de Wien se ajustava à curva experimental somente em altas frequências, ou pequenos comprimentos de onda.

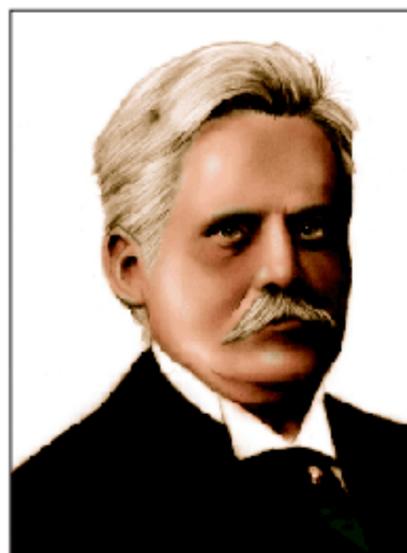


Fig. 4 Wilhelm Wien (1864-1928), físico alemão, Prêmio Nobel de Física em 1911 por suas descobertas relacionadas às leis que governam a radiação do calor.

Apartir das teorias clássicas do eletromagnetismo e da termodinâmica, chegou-se a outra expressão para a distribuição de energia, conhecida como Lei de Rayleigh-Jeans.

$$R_\lambda = \frac{8 \cdot \pi}{\lambda^4} \cdot k \cdot T \quad (5)$$

Na equação (5), k é a constante de Boltzmann que vale $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$, λ é o comprimento de onda e T é a temperatura absoluta.

A equação anterior adequa-se muito bem para baixas frequências (elevados comprimentos de onda), mas apresenta um grave problema quando λ tende a valores pequenos (faixa do ultravioleta), pois como se observa na equação (5) R_λ tende a infinito, nesse caso. É como se em um ambiente fechado, no qual há uma janela por onde entra radiação ultravioleta, a energia tendesse a um valor infinito, torrando tudo o que há dentro do ambiente. No entanto, essa conclusão não condiz com a experiência. Essa contradição ficou conhecida como catástrofe do ultravioleta; um problema que parecia não ter solução.

Dessa forma, a solução dada por Max Planck, em 1900, iria ocasionar uma verdadeira revolução na Física.

A Lei de Planck da radiação

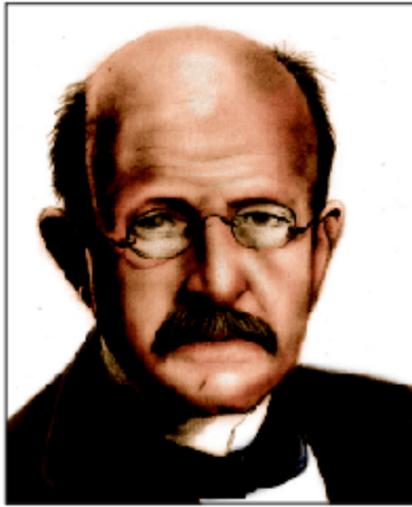


Fig. 5 Max Karl Ernst Ludwig Planck, físico alemão, (1858-1947), ganhador do Prêmio Nobel de Física, em 1918, pelo descobrimento do *quantum* de energia.

Em 1889, Planck tornou-se professor de Física da Universidade de Berlim. Foi nessa ocasião que ele se dedicou ao estudo do problema do corpo negro, problema este inicialmente levantado por seu antigo professor Kirchhoff, que havia morrido recentemente e cujo cargo era agora ocupado por Planck.

A explicação teórica da radiação de cavidades foi um dos sérios problemas da Física, sem solução, no final do século XIX. Inicialmente, partiu-se para equações empíricas, que proporcionavam alguma semelhança entre dados experimentais e teóricos, como a Lei de Wien. Porém, Max Planck introduziu uma modificação nessa equação de maneira que os valores teóricos se ajustassem precisamente aos valores experimentais, resultando na chamada Lei de Planck.

$$R_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (6)$$

onde c_1 e c_2 são constantes a serem determinadas, λ é o comprimento de onda e T a temperatura absoluta do material.

Para explicar a equação, Planck adotou um modelo no qual os átomos no interior da cavidade se comportassem como osciladores eletromagnéticos, ou seja, que fossem geradores de onda eletromagnética, cada qual com uma frequência característica. Esses osciladores podem emitir e absorver energia da cavidade. Assim, a característica da radiação de cavidade pode ser determinada através das propriedades dos osciladores em equilíbrio com essa radiação.

Para tal, Planck teve de fazer duas hipóteses a respeito desses osciladores atômicos. Essas hipóteses, radicais para a época, constituem as primeiras hipóteses da Física quântica.

I. Um oscilador não pode ter uma energia qualquer, mas apenas uma que satisfaça a equação:

$$E = n \cdot h \cdot f \quad (7)$$

onde n é um número inteiro, hoje conhecido como número quântico principal, h é a constante de Planck, que vale $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ e f é a frequência de oscilação. Cada valor de n define um estado chamado estacionário. Essa hipótese nos diz que *a energia não é algo contínuo, ela é discreta, quantizada. Ainda nos diz que quanto maior a frequência de oscilação, maior a energia.*

II. Os osciladores não irradiam energia de forma contínua, mas em pulsos, os chamados *quanta*. Tal emissão de energia se

dá quando o oscilador passa de um dos seus estados estacionários para outro, ou seja, quando há variação de n , ou de acordo com a equação (7):

$$\Delta E = \Delta n \cdot h \cdot f \quad (8)$$

Pela equação (8), verifica-se que a energia emitida é quantizada (discreta).

Dessa forma, se não há variação do número quântico n , o oscilador não emite nem absorve energia.

Observe que essas hipóteses são um tanto difíceis de se aceitar quando se pensa no mundo macroscópico. Analisando as equações (7) e (8), observa-se que nos casos de altos valores de energia, como é o caso do mundo macroscópico, os números quânticos são altíssimos, pois a constante de Planck tem valor muito pequeno. Assim, pequenas variações de número quântico causam baixíssimas variações de energia, parecendo-nos que a energia é perfeitamente contínua.

Observe o exercício a seguir.

Exercício resolvido

1 Um sistema massa-mola, com massa $m = 200 \text{ g}$ e constante de mola $k = 1 \text{ N/m}$, oscila com a amplitude de 5 mm .

- Supondo sua energia quantizada como na equação (7), determine o seu número quântico n .
- Se o número quântico variar de uma unidade, qual seria a variação da energia correspondente?

Resolução:

a) Para o sistema dado, a frequência de oscilação é dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{0,2}} \approx 0,36 \text{ Hz}$$

A energia do sistema é dada pela expressão:

$$E = \frac{1}{2} k \cdot x^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2 = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

Assim, pela equação (7) temos:

$$n = \frac{1,25 \cdot 10^{-5}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 0,36} = 5,2 \cdot 10^{28}$$

b) Se há variação de uma unidade no número quântico, então $\Delta n = 1$ e, assim, pelas equações (7) e (8), temos:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta n h f}{n h f} = \frac{1}{n} \approx 2 \cdot 10^{-29}$$

Assim, como dito anteriormente, se no mundo macroscópico temos altíssimos números quânticos, a quantização de energia não é observada, ou seja, não se observa que a matéria é formada de átomos e elétrons no mundo macroscópico.

A partir de suas hipóteses, Planck deduziu a sua lei da radiação de modo teórico, resolvendo um dos grandes problemas da Física do final do século XIX, tornando possível deduzir os valores das constantes c_1 e c_2 , tal que:

$$c_1 = 2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h \text{ e } c_2 = \frac{c}{k}$$

onde c é a velocidade da luz, h a constante de Planck e k é a constante de Boltzmann que vale $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ (não confundir com a constante de Stefan-Boltzmann). De posse dos valores de c_1 e c_2 já conhecidos, foi possível calcular h e k . A teoria de Planck foi apresentada em 1900, à Sociedade Alemã de Física, em Berlim, rendendo-lhe o Prêmio Nobel em 1918.

No gráfico a seguir, observa-se os pontos experimentais da radiação espectral do corpo negro. Sobrepostas a eles, as curvas teóricas obtidas pelas formulações de Wien, Rayleigh-Jeans e Planck. Pode-se notar a coincidência precisa da formulação de Planck e os pontos experimentais.

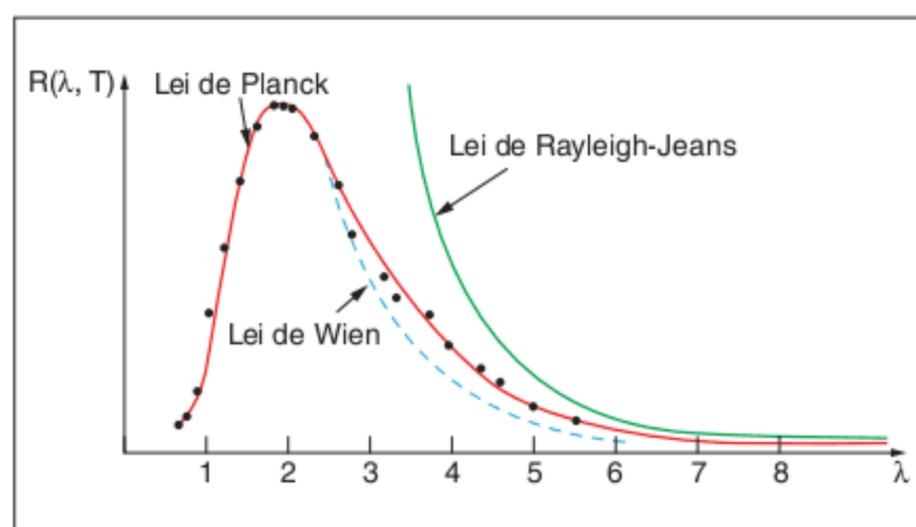


Fig. 6 Sobreposição das curvas obtidas pelas formulações de Planck, Wien e Rayleigh-Jeans e os dados experimentais.

Essas ideias foram utilizadas por Einstein para explicar um fenômeno importante que é o efeito fotoelétrico, estudado no próximo tópico. É importante notar que Planck em todo o seu estudo continuou tratando a radiação de cavidade como fenômeno eletromagnético. Einstein mostrou que o efeito fotoelétrico seria impossível de ser explicado pela teoria ondulatória da luz.

Observação: Posteriormente, mostrou-se que a expressão correta para a equação (7) é:

$$E = \left(n + \frac{1}{2} \right) \cdot h \cdot f \quad (9)$$

Porém, essa diferença não altera qualquer uma das conclusões de Planck.

O efeito fotoelétrico

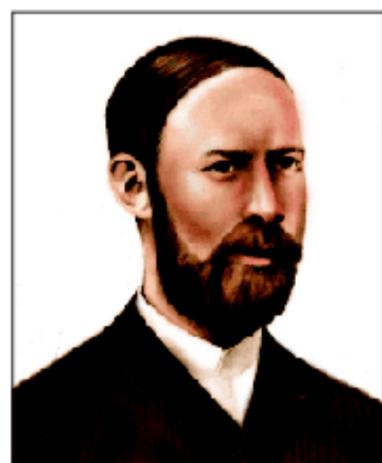


Fig. 7 Heinrich Hertz, físico alemão, descobridor do efeito fotoelétrico e o primeiro homem a gerar e detectar experimentalmente ondas eletromagnéticas.

Em 1887, Hertz descobriu que a incidência de luz sobre uma superfície metálica lisa provocava a emissão de elétrons.

A esse fenômeno deu-se o nome de efeito fotoelétrico. Apesar de Hertz ter dado a esse fenômeno uma importância menor, pois a ele preocupava a geração de ondas eletromagnéticas e a comprovação experimental da teoria de Maxwell, o efeito fotoelétrico causou uma verdadeira revolução na Física do final do século XIX e início do século XX, mudando inclusive o tratamento clássico da teoria eletromagnética.

O efeito fotoelétrico pode ser definido como o fato de a radiação eletromagnética, na forma de raios X, ultravioleta, ou mesmo na faixa da luz visível, ao incidir sobre determinadas superfícies, fazer com que elétrons sejam ejetados destas superfícies.

Na figura 8, podemos ver o esquema de uma montagem experimental para se estudar o efeito fotoelétrico.

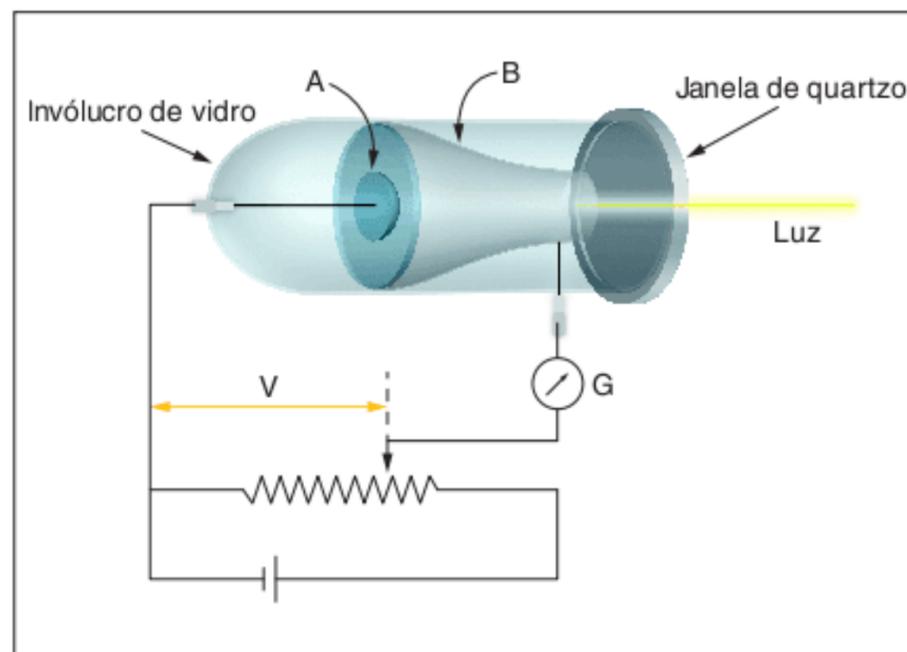


Fig. 8 Montagem experimental – efeito fotoelétrico.

A luz incide sobre a placa metálica A e os elétrons são arrancados do metal e atraídos pela taça metálica B devido a uma diferença de potencial aplicada entre A e B, assim uma fotocorrente pode ser detectada pelo galvanômetro G.

Na figura 9, temos a curva da fotocorrente i em função do potencial V aplicado. Para valores de V bastante grandes, (potencial positivo em B) a fotocorrente tende para um valor limite. Nas situações a e b, o que varia é a intensidade da luz incidente.

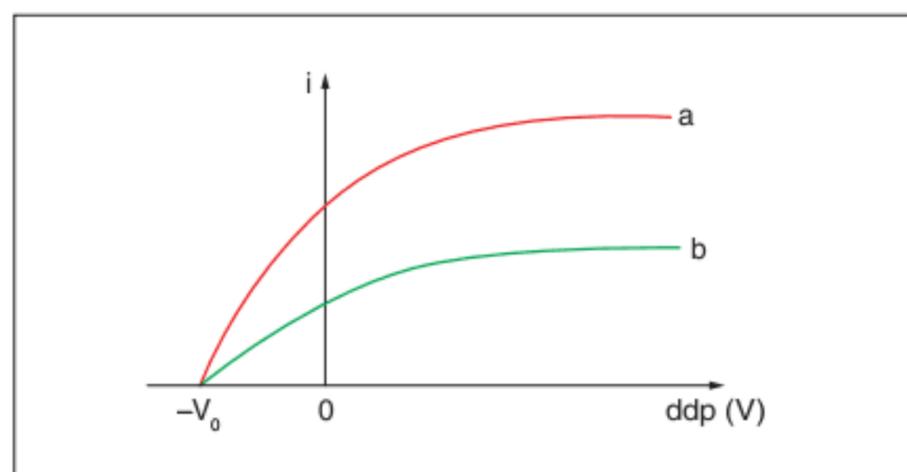


Fig. 9 Fotocorrente em função da diferença de potencial V aplicada.

Observamos que, para um valor negativo de tensão V_0 , a fotocorrente cessa. Essa tensão é aquela capaz de deter os elétrons mais rápidos, portanto, pelo Teorema da energia cinética, temos:

$$E_{c_{\text{máx}}} = e \cdot V_0 \quad (10)$$

Inicialmente, o efeito fotoelétrico não foi visto com surpresa pela comunidade científica, já que se pensava que a luz, sendo uma onda eletromagnética, transportasse energia proporcional a sua intensidade, porém alguns fatos experimentais fizeram com que a teoria eletromagnética não explicasse o fenômeno. Tais fatos são:

- I. Nenhum elétron era emitido se a frequência da luz não fosse maior do que um valor mínimo f_0 para um dado material (Fig. 10).

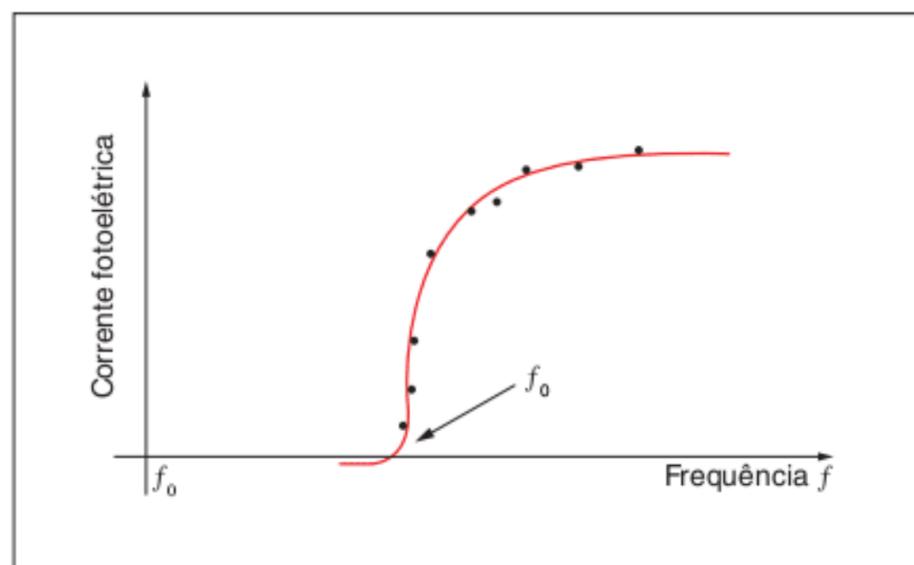


Fig. 10 Fotocorrente em função da frequência.

- II. A energia cinética dos elétrons retirados do metal aumentava proporcionalmente ao aumento da frequência da onda eletromagnética, conforme pode ser visto na figura 11.

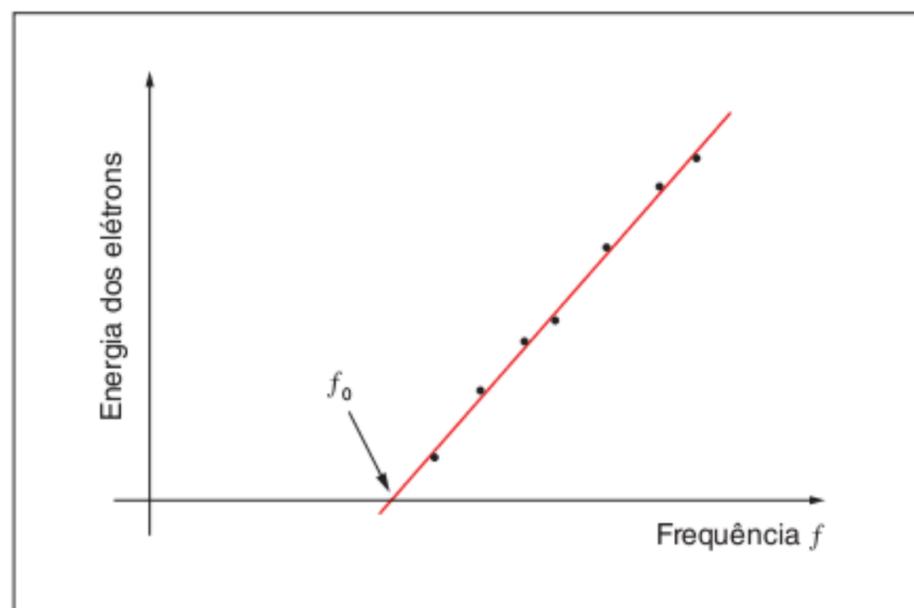


Fig. 11 Energia cinética dos elétrons em função da frequência.

- III. Por último, o aumento da intensidade da onda eletromagnética não alterava a energia cinética dos elétrons retirados do metal, somente aumentava o número de elétrons retirados por unidade de tempo, o que refletia na fotocorrente.

Esses resultados experimentais fizeram com que a teoria ondulatória clássica fosse incapaz de explicar tais fenômenos, pois, para ela, a energia da onda eletromagnética incidente nada dependia da frequência. Além do mais, *por que a energia dos elétrons retirados do metal não aumentava com a intensidade da luz incidente e sim com a frequência?* A resposta veio com Einstein em 1905.

Einstein e a teoria do fóton

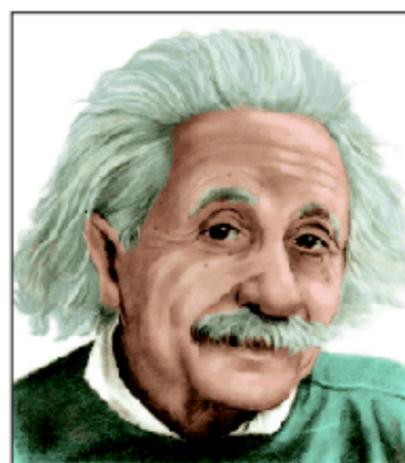


Fig. 12 Albert Einstein (1879-1955), físico alemão, criador da Teoria da Relatividade e Prêmio Nobel de Física em 1921 por seus serviços à Física teórica, e, especialmente, pelo descobrimento da Lei do efeito fotoelétrico.

Einstein explicou o efeito fotoelétrico supondo que a luz fosse constituída de partículas com energia discreta, denominadas fótons. A sua suposição era que a energia de um fóton com frequência f seria $h \cdot f$ e que essa energia seria transferida para o elétron no momento da colisão. Se essa energia fosse maior que um valor mínimo E_0 , denominado função de trabalho do material, então seria possível arrancar o elétron do metal e o restante da energia incidente seria dado a ele na forma de energia cinética tal que:

$$h \cdot f = E_0 + \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (11)$$

Se escrevermos a energia E_0 como sendo $h \cdot f_0$, então f_0 é a frequência mínima necessária para se arrancar o elétron, o que confere com a figura 10. Dessa forma, a equação (11) pode ser reescrita como:

$$h \cdot f = h \cdot f_0 + \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (12)$$

A equação (12) nos mostra que a energia cinética do elétron arrancado do metal varia linearmente com a frequência da luz incidente, a partir do valor f_0 , pois:

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = h(f - f_0) \quad (13)$$

Assim, o coeficiente angular da reta da figura 11 deve ser a própria constante de Planck. De fato, os resultados experimentais comprovaram essa afirmação.

O fato de o número de elétrons ejetados aumentar com a intensidade da luz incidente leva-nos a crer que a intensidade deve estar relacionada com o número de fótons incidentes que colidem com a superfície por unidade de tempo.

O sucesso da teoria corpuscular de Einstein foi imenso, mas agora fica a pergunta: *a luz é uma onda ou é constituída por partículas?*

A teoria ondulatória explica a reflexão, a refração, a difração, a interferência e o espalhamento da radiação, porém essa teoria não explica o efeito fotoelétrico, somente explicado pela teoria corpuscular.

De fato, os dois comportamentos são verificados na prática. O fato é que os trabalhos de Planck e Einstein possibilitaram a Niels Bohr uma explicação melhor do comportamento dos elétrons no átomo. Isso será melhor visto no próximo capítulo.

Exercício resolvido

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

- a) Verifique se ocorre emissão fotoelétrica quando sobre esse metal incide luz de comprimento de onda $\lambda = 6,0 \cdot 10^{-7}$ m. A constante de Planck é $h \approx 4,2 \cdot 10^{-15}$ e V·s e a velocidade da luz no vácuo é $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s.
- b) Qual é a frequência mais baixa da luz incidente capaz de arrancar elétrons do metal?

Resolução:

a) Para que ocorra emissão, devemos ter:

$$h\nu - E_0 \geq 0 \text{ ou, } \frac{hc}{\lambda} - E_0 \geq 0$$

Seja a energia cinética máxima dada por:

$$E_{c_{\text{máx}}} = h\nu - E_0$$

$$\text{Então, } \lambda \leq \frac{hc}{E_0} = \frac{4,2 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,5} \Rightarrow \lambda \leq 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m.}$$

Não ocorrerá emissão, já que a luz incidente tem

$$\lambda = 6,0 \cdot 10^{-7} \text{ m.}$$

b) A frequência mais baixa f_0 corresponde ao valor máximo de λ , isto é, $\lambda_m = 5,0 \cdot 10^{-7}$ m, portanto,

$$f_0 = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{5,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}} \approx 6,0 \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$

O efeito Compton

A comprovação experimental de que os fótons poderiam ser considerados como um pacote concentrado de energia foi dada por A. H. Compton, em 1923, o que lhe rendeu em 1927 o prêmio Nobel.

Compton fez incidir sobre um bloco de grafita um feixe monocromático de raios X, de comprimento λ bem-definido, medindo, em seguida, a intensidade dos raios X espalhados em função do comprimento de onda. A montagem experimental pode ser vista na figura 13.

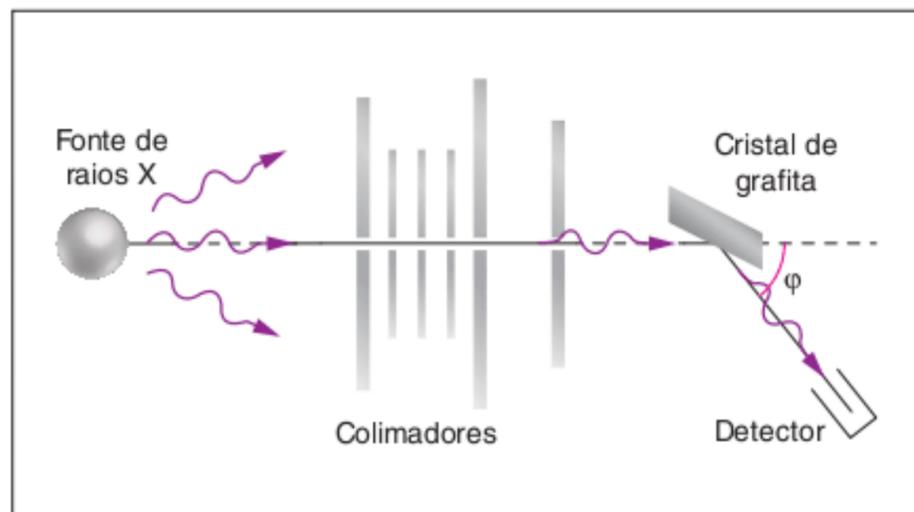


Fig. 13 Montagem experimental ilustrando o efeito Compton.

Na figura 14, pode-se observar os resultados experimentais para diversos ângulos de espalhamento.

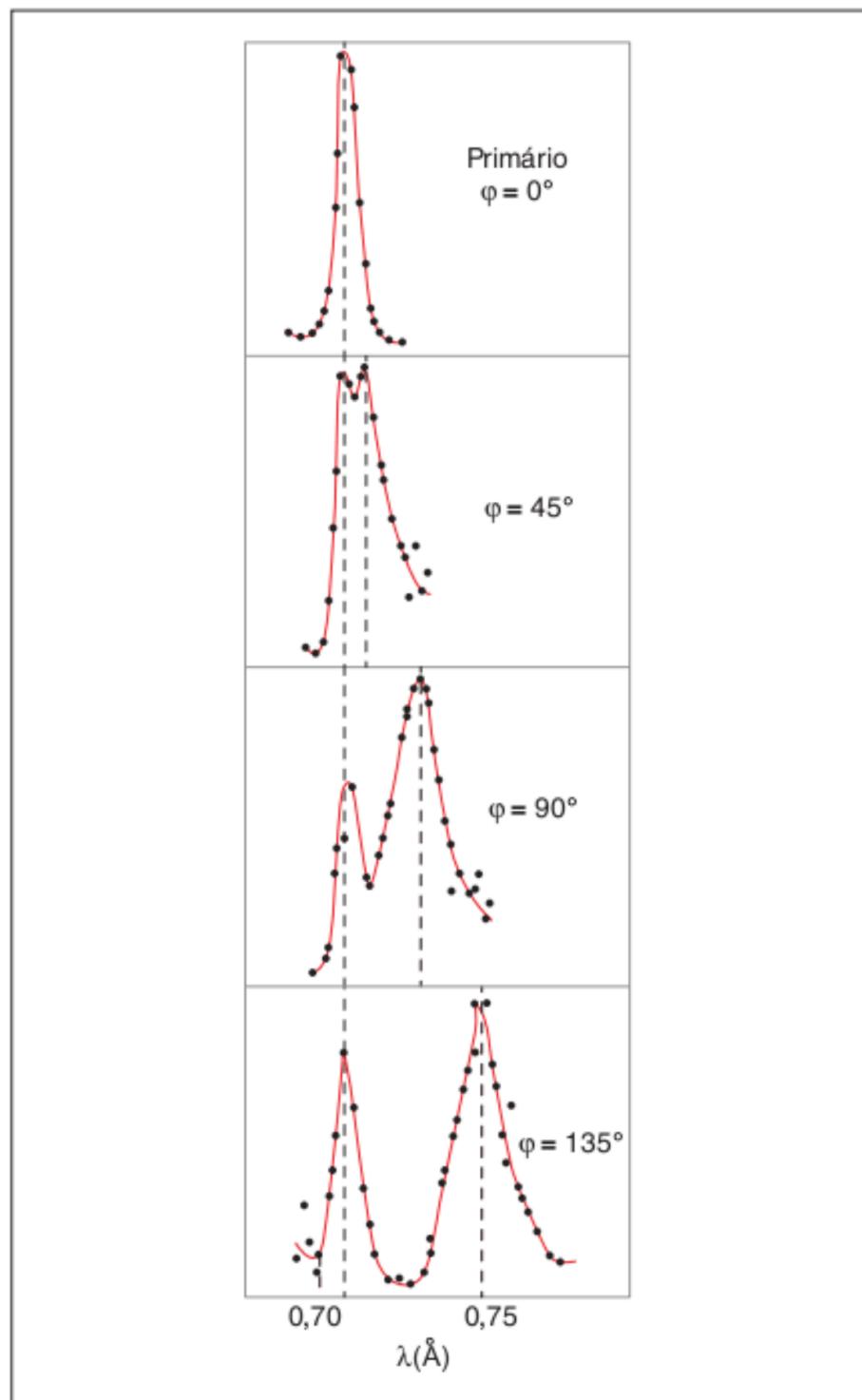


Fig. 14 Desvio Compton em função do ângulo ϕ .

Como pode ser visto na figura 14, apesar de o raio X incidente ser composto de um único comprimento de onda, os raios X espalhados pela grafita apresentam dois picos de intensidade, um no comprimento de onda incidente e um outro de valor λ' , maior que o primeiro. Essa diferença $\lambda' - \lambda$ é chamada **desvio Compton** ($\Delta\lambda$) e depende do ângulo de espalhamento dos raios X.

A explicação teórica dada por Compton foi feita supondo-se que o raio X incidente não se comportava como uma onda eletromagnética, mas como um conjunto de fótons de energia $h \cdot c / \lambda$. Esses fótons colidiam com os elétrons da grafita. Assim, na colisão, parte da energia era cedida aos elétrons. Era de se esperar, portanto, que os fótons espalhados apresentassem uma energia menor, conseqüentemente, um comprimento de onda λ' maior.

Aplicando-se o princípio da conservação da energia na colisão, temos:

$$h \cdot f = h \cdot f' + (m - m_0) \cdot c^2 \quad (14)$$

No qual, o primeiro termo representa a energia do fóton incidente e o segundo termo representa a energia do fóton espalhado e o último termo a expressão relativística da energia cinética do elétron. Sendo m_0 a massa do elétron em repouso e m a sua massa relativística, temos:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (15)$$

Dessa forma, a equação (14) fica:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + m_0 \cdot c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 \right] \quad (16)$$

O momento linear do fóton é dado pela expressão:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (17)$$

Pode-se demonstrar, a partir da aplicação da conservação do momento linear nas colisões e de considerações relativísticas, que o desvio Compton $\Delta\lambda$ independe do comprimento de onda incidente, dependendo somente do ângulo ϕ de espalhamento, tal que:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc_0} (1 - \cos\phi) \quad (18)$$

Revisando

1 Unifei 2009 A energia mínima requerida para ionizar um átomo de hidrogênio no seu estado fundamental é de 13,6 eV. Se um fóton com energia igual a 15,0 eV colide com o elétron deste átomo, responda:

Dados: 1,0 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J; $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s; $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s.

- com que energia cinética o elétron emerge do átomo?
- qual é o comprimento de onda do fóton incidente?

2 PUC-MG (Adapt.) Sobre o efeito fotoelétrico, pode-se dizer que a energia cinética de cada elétron extraído do metal depende:

- da intensidade da luz incidente.
- da frequência da luz incidente.
- do ângulo de incidência da luz.

Determine se as afirmativas I, II e III estão corretas. Justifique sua resposta.

3 A função trabalho, ou E_0 , para o alumínio vale 4,2 eV. Sobre o alumínio incide um feixe de ondas com $\lambda = 1.000 \text{ \AA}$.

Calcule:

- o comprimento de onda de corte.
- a energia cinética máxima dos elétrons emitidos pela superfície do alumínio.
- o potencial elétrico aplicado necessário para impedir que os elétrons atinjam o outro eletrodo.

Exercícios propostos

Corpo negro

1 PUC-RS (Adapt.) Leia o texto a seguir.

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 essa teoria, um corpo negro irradia energia de forma _____ em porções que são chamadas _____, 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

2 UFRGS Assinale a alternativa que preenche corretamente a lacuna do parágrafo a seguir. 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

3 Suponha que o Sol seja um corpo negro ou irradiador de cavidade ideal. Admitindo que a temperatura na superfície do Sol seja igual a 6.000 K, calcule a radiância total na superfície do Sol.

Efeito fotoelétrico e efeito Compton

4 UFRN Sendo a energia de um fóton de luz ultravioleta igual a $6,6 \cdot 10^{-19}$ J e a constante de Planck igual a $6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s, a frequência da luz ultravioleta, em Hz, é:

- (a) $6,6 \cdot 10^{-49}$
- (b) 10^{-34}
- (c) 10^{15}
- (d) $6,6 \cdot 10^{15}$
- (e) $6,6 \cdot 10^{-53}$

5 PUC-RS Um feixe de luz incide em uma lâmina de metal, provocando a emissão de alguns elétrons.

A respeito desse fenômeno, denominado efeito fotoelétrico, é correto afirmar que:

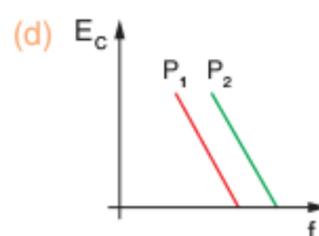
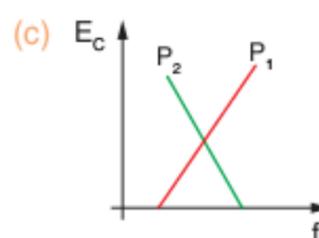
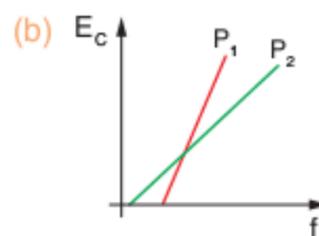
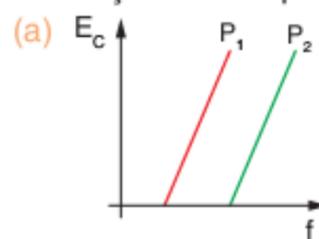
- (a) qualquer que seja a frequência da luz incidente, é possível que sejam arrancados elétrons do material.
- (b) quaisquer que sejam a frequência e a intensidade da luz, os elétrons são emitidos com a mesma energia cinética.

- (c) quanto maior a intensidade da luz de uma determinada frequência incidindo sobre o metal, maiores são as energias com que os elétrons abandonam o metal.
- (d) quanto maior a frequência da luz de uma determinada intensidade incidindo sobre o metal, maiores são as energias com que os elétrons abandonam o metal.
- (e) quanto maior a frequência da luz de uma determinada intensidade incidindo sobre o metal, mais elétrons abandonam o metal.

6 UFRN Quando a luz incide sobre a superfície de uma placa metálica, é possível que elétrons sejam arrancados dessa placa, processo conhecido como efeito fotoelétrico. Para que um elétron escape da superfície do metal, devido a esse efeito, a energia do fóton incidente deve ser, pelo menos, igual a uma energia mínima, chamada função trabalho (W_0), uma grandeza característica de cada material. A energia de cada fóton da luz incidente é igual ao produto $h \cdot f$, onde h é a constante de Planck e f é a frequência da luz incidente. Quando a energia do fóton incidente é maior que W_0 , a energia restante é transformada em energia cinética do elétron. Dessa forma, a energia cinética máxima (E_c) do elétron arrancado é dada por:

$$E_c = h \cdot f - W_0$$

Considere o experimento no qual um feixe de luz que contém fótons com energias associadas a um grande intervalo de frequências incide sobre duas placas P_1 e P_2 , constituídas de metais diferentes. Para esse experimento pode-se afirmar que o gráfico representando a energia cinética máxima dos elétrons emitidos, em função das frequências que compõem a luz incidente, é:



7 Uepa As afirmativas a seguir referem-se ao efeito fotoelétrico.

- I. Quando se aumenta apenas a intensidade da luz na superfície fotoelétrica, o número de elétrons emitidos por unidade de tempo aumenta.
- II. É necessária uma energia mínima dos fótons da luz incidente, para arrancar os elétrons do metal que constitui uma fotocélula.
- III. O efeito fotoelétrico parte do pressuposto de que a energia da luz é quantizada.
- IV. Quanto maior o comprimento de onda da luz, tanto menor a energia do fóton.

Pode-se afirmar que:

- (a) apenas I e IV são verdadeiras.
- (b) todas são verdadeiras.
- (c) apenas I e III são verdadeiras.
- (d) apenas III e IV são verdadeiras.
- (e) todas são falsas.

8 UFMT A porta automática de um *shopping center*, as calculadoras e relógios que funcionam com energia solar são recursos tecnológicos utilizados no dia a dia de uma cidade e que envolvem energia luminosa e cargas elétricas, constituindo o fenômeno físico conhecido como “efeito fotoelétrico”. Sobre esse tema, julgue as afirmativas.

- A energia luminosa constitui-se de “pacotes discretos” denominados fótons que podem ser considerados partículas.
- Quando um fóton incide sobre um pedaço de metal e interage com um elétron, este absorve a energia daquele e pode ser arrancado do metal.
- A velocidade dos elétrons que se desprendem do metal devido à incidência da luz depende da frequência e da intensidade da luz.
- A luz tem natureza dual (onda-partícula) sendo o efeito fotoelétrico uma manifestação do aspecto corpuscular.

9 PUC-RS O dualismo onda-partícula refere-se a características corpusculares presentes nas ondas luminosas e as 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 da luz.
- (c) difração de elétrons.
- (d) o rompimento de ligações entre átomos pela incidência da luz.
- (e) a propagação, no vácuo, de ondas de rádio de frequência média.

10 UFRGS Selecione a alternativa que apresenta as palavras que completam corretamente as lacunas, pela ordem, no seguinte texto relacionado com o efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico, isto é, a emissão de _____ por metais sob a ação da luz, é um experimento dentro de um contexto físico extremamente rico, incluindo a oportunidade de pensar sobre o funcionamento do equipamento que leva à evidência experimental relacionada com a emissão e a energia dessas partículas, bem como a oportunidade de entender a inadequacidade da visão clássica do fenômeno. Em 1905, ao analisar esse efeito, Einstein fez a suposição revolucionária de que a luz, até então considerada como um fenômeno ondulatório, poderia também ser concebida como constituída por conteúdos energéticos que obedecem a uma distribuição _____, os *quanta* de luz, mais tarde denominados _____.

- (a) fótons; contínua; fótons
- (b) fótons; contínua; elétrons
- (c) elétrons; contínua; fótons
- (d) elétrons; discreta; elétrons
- (e) elétrons; discreta; fótons

11 PUC-RS 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 propaga 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.

12 UFGO Para explicar o efeito fotoelétrico, Einstein, em 1905, apoiou-se na hipótese de que:

- (a) a energia das ondas eletromagnéticas é quantizada.
- (b) o tempo não é absoluto, mas depende do referencial em relação ao qual é medido.
- (c) os corpos contraem-se na direção de seu movimento.
- (d) os elétrons em um átomo somente podem ocupar determinados níveis discretos de energia.
- (e) a velocidade da luz no vácuo corresponde à máxima velocidade com que se pode transmitir informações.

13 UFRGS No efeito fotoelétrico, ocorre a variação da quantidade de elétrons emitidos por unidade de tempo e da sua energia quando há variação de certas grandezas características da luz incidente na fotocélula.

Associe as variações descritas na coluna da direita com as grandezas da luz incidente, mencionadas na coluna da esquerda.

- | | | |
|----------------|----------------------|---|
| 1. Frequência | <input type="text"/> | variação da energia dos elétrons emitidos. |
| 2. Velocidade | <input type="text"/> | variação do número de elétrons emitidos por unidade de tempo. |
| 3. Intensidade | | |

A relação numérica, de cima para baixo, da coluna da direita, que estabelece a sequência de associações corretas é:

- (a) 1; 2
- (b) 1; 3
- (c) 2; 1
- (d) 2; 3
- (e) 3; 1

14 PUC-RS Analise as afirmações a seguir e escolha a opção correta.

- I. Robert Andrews Millikan determinou, com grande precisão, a carga dos elétrons.
 - II. O efeito Compton demonstra que a radiação tem comportamento corpuscular.
 - III. Uma descarga elétrica num gás é capaz de ionizá-lo, tornando-o condutor de eletricidade.
- (a) Somente a afirmação I é correta.
 - (b) Somente as afirmações I e II são corretas.
 - (c) Somente as afirmações II e III são corretas.
 - (d) Somente as afirmações I e III são corretas.
 - (e) Todas as afirmações são corretas.

15 UFSC Assinale a(s) proposição(ões) correta(s).

- 01 A luz, em certas interações com a matéria, comporta-se como uma onda eletromagnética; em outras interações ela se comporta como partícula, como os fótons no efeito fotoelétrico.
- 02 A difração e a interferência são fenômenos que somente podem ser explicados satisfatoriamente por meio do comportamento ondulatório da luz.
- 04 O efeito fotoelétrico somente pode ser explicado satisfatoriamente quando consideramos a luz formada por partículas, os fótons.
- 08 O efeito fotoelétrico é consequência do comportamento ondulatório da luz.
- 16 Devido à alta frequência da luz violeta, o “fóton violeta” é mais energético do que o “fóton vermelho”.

Soma =

16 UFMG Dois feixes de raios X, I e II, incidem sobre uma placa de chumbo e são totalmente absorvidos por ela. O comprimento de onda do feixe II é três vezes maior que o comprimento de onda do feixe I.

Ao serem absorvidos, um fóton do feixe I transfere uma energia E_1 e um fóton do feixe II, uma energia E_2 .

Considerando-se essas informações, é correto afirmar que:

- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| (a) $E_2 = \frac{E_1}{3}$ | (c) $E_2 = 3 \cdot E_1$ |
| (b) $E_2 = E_1$ | (d) $E_2 = 9 \cdot E_1$ |

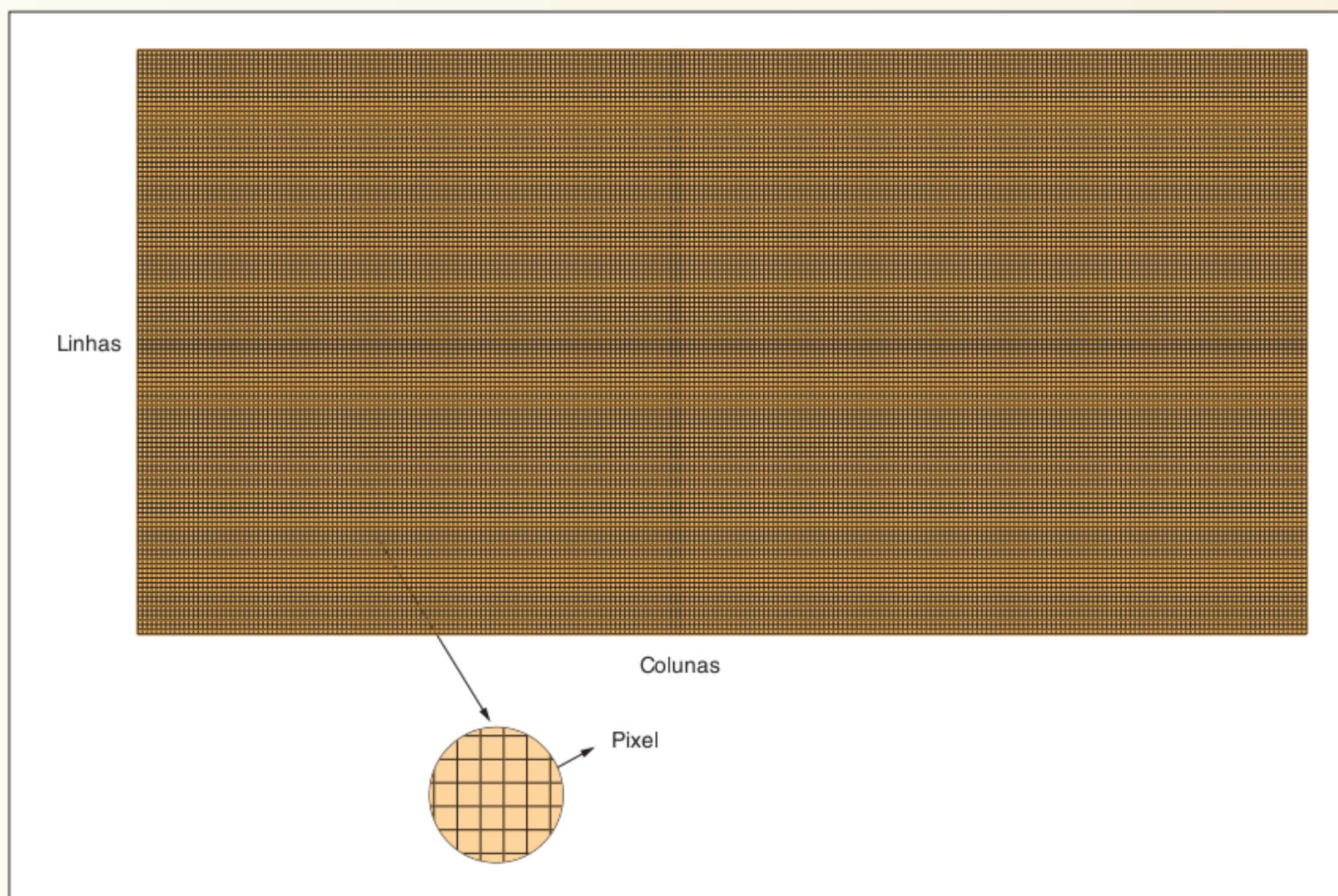
17 UFMG Assinale a alternativa correta.

- (a) Para ocorrer o efeito fotoelétrico, é necessário que a frequência da radiação incidente esteja acima de um valor limite, não importando a intensidade da radiação.
- (b) Para ocorrer o efeito fotoelétrico, é necessário que a intensidade da radiação incidente esteja acima de um valor limite, não importando a frequência da radiação.
- (c) Em um processo de fissão nuclear, em que ocorre a quebra do urânio, a soma das massas dos elementos resultantes da fissão é igual a massa inicial do urânio.
- (d) Um processo radioativo produz aumento do número atômico do elemento.

TEXTOS COMPLEMENTARES

O efeito fotoelétrico e a imagem digital

Muito comum no dia a dia, as câmeras digitais – sejam elas de vídeo ou fotografia – substituíram as câmeras analógicas. Qualquer que seja a imagem digital ela é formada por pixels, cada pixel é um elemento de uma matriz de sensores colocados em linhas e colunas. Por exemplo, uma câmera de 480 kpixels é formada por um arranjo de 800 linhas e 600 colunas perfazendo o total de 480.000 pixels. Esse arranjo é melhor visto na figura a seguir



Cada um dos elementos desta matriz, ou pixel, é na verdade, um sensor fotoelétrico. A luz, com os seus fótons, ao incidir sobre um dos pixels, libera elétrons. O número de elétrons liberados é proporcional à intensidade de luz incidente. Um sistema controla a posição de onde os elétrons são liberados, bem como a quantidade deles. Assim, é possível formar a imagem digital.

Este tipo de sensor é chamado CCD, do inglês *Charge-coupled device*, ou dispositivo de carga acoplada. As características positivas desses dispositivos são a sua sensibilidade, fazendo com que seja possível a sua utilização em astronomia, por exemplo, possibilitando o registro de objetos muito distantes da Terra, em situações em que a intensidade luminosa é muito baixa.

Einstein no Brasil

Criada pelo Museu Americano de História Natural, em Nova York, a exposição Einstein ganhou uma versão brasileira [...].

Apresentando objetos pessoais, fotos, cópias de cartas e manuscritos de Albert Einstein (1879-1955), a exposição aposta na interatividade e na tecnologia para explicar conceitos científicos relacionados às inúmeras contribuições do físico. Trazida pela primeira vez ao hemisfério Sul, a mostra foi inaugurada em Nova York em 2002 e já recebeu mais de 2 milhões de pessoas nos Estados Unidos, Turquia e Israel.

O espaço da exposição também abrigará, nos fins de semana, um amplo ciclo de palestras relacionadas ao tema, com organização da revista *Pesquisa Fapesp*. A mostra, instalada em uma área de 2 mil metros quadrados, foi trazida ao Brasil por intermédio do Instituto Sangari, com apoio de diversas empresas e instituições, incluindo a Fapesp. O orçamento, segundo os organizadores, ficou entre R\$ 4,5 milhões e R\$ 5 milhões.

O coordenador-geral da exposição é Marcelo Knobel, professor do Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual

de Campinas (Unicamp) e diretor científico do Instituto Sangari. Segundo ele, a versão norte-americana da exposição recebeu adaptações e acréscimos.

“Os painéis interativos foram elaborados pela equipe brasileira. Além disso, praticamente todos os textos foram recriados e ainda foram acrescentadas duas instalações que não existiam originalmente: a seção “Átomo” e a seção “Einstein no Brasil”, disse Knobel à Agência Fapesp.

A comissão científica foi formada por Carmen Prado, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP), Nelson Studart, do Departamento de Física na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), e Alfredo Tomalsquim, diretor do Museu de Astronomia e Ciências Afins (Mast), no Rio de Janeiro.

Uma exposição realizada pelo Mast também teve elementos integrados à mostra. “Incluimos diversos aspectos relacionados ao Brasil e melhoramos bastante também a parte relacionada ao legado de Einstein. O texto foi sintetizado, já que a versão original era bastante prolixa. Havia aspectos que interessavam mais ao público

norte-americano e que foram atenuados, como a perseguição de Einstein pelo movimento anticomunista do macartismo”, explicou Knobel.

A mostra não se restringe à compreensão das teorias desenvolvidas pelo físico alemão, mas apresenta também diversas dimensões de sua vida, como as viagens, os casamentos, a atuação pacifista durante a Segunda Guerra Mundial e a luta contra o racismo.

“A exposição é voltada não só para quem gosta de física, mas também para quem se interessa por saber mais sobre o mundo em que vivemos. A ideia não é que o visitante saia dominando conceitos da física, mas que saia com número ainda maior de perguntas, estimulado a saber mais”, destacou Knobel.

O professor da Unicamp ressaltou que a física desenvolvida depois da revolução desencadeada pelas descobertas de Einstein ainda não é ensinada nas escolas. Segundo ele, o conteúdo oferecido no Ensino Médio parou na física de Isaac Newton.

“Não se aprende nada de física quântica ou de relatividade no Ensino Médio. No entanto, ainda que pareça incrível, a matemática utilizada para entender a relatividade não é tão complexa – ela pode ser toda demonstrada apenas com o teorema de Pitágoras. O que provoca um nó na cabeça são as consequências extraídas dessa teoria. Isso fica claro na exposição”, afirmou.

Eclipse em Sobral

O percurso da exposição é dividido em dez blocos temáticos, nos quais se entrelaçam aspectos biográficos e científicos relacionados a Einstein: “Vida e tempo”, “Luz”, “Tempo”, “Átomos”, “Energia”, “Gravidade”, “Guerra e paz”, “Cidadão global”, “Legado” e “Einstein no Brasil”.

Escolas e grupos de estudantes poderão agendar visitas monitoradas por educadores especializados. A exposição oferece um curso gratuito para os educadores, no qual são fornecidos subsídios teóricos para a preparação das visitas com os alunos e para o trabalho em sala de aula. No percurso da mostra foram montados dois Laboratórios do Aprendizado, nos quais os estudantes poderão participar de atividades que abordam alguns dos conceitos apresentados.

Um dos laboratórios permite ver, com o auxílio de microscópios, o movimento browniano descrito por Einstein em 1905. No outro laboratório, são exploradas as propriedades da luz, por meio de experimentos de espectroscopia óptica.

Uma das curiosidades da exposição é a relação do Brasil com o episódio que tornou Einstein uma celebridade mundial. Em 29 de maio de 1919, a observação de um eclipse feita em Sobral, no Ceará, e na ilha de Príncipe, na África, mostrou que a gravidade do Sol age como uma lente, desviando a luz das estrelas distantes que apareciam no céu em posições diferentes das originais. Era a confirmação de uma previsão feita por Einstein em 1916, corroborando a Teoria da Relatividade Geral.

De acordo com as informações da exposição, em 7 de novembro de 1919 o jornal Times, de Londres, anunciava: “Revolução na ciência. Nova teoria do Universo. Ideias de Newton derrubadas”. E Einstein, do dia para a noite, tornava-se mundialmente conhecido.

A mostra inclui objetos do acervo pessoal do físico, como fotos em momentos de lazer, ou recebendo o prêmio Nobel, além de reproduções das cartas trocadas com Sigmund Freud – nas quais

Einstein exortava o psicanalista a juntar esforços e usar a influência política de ambos para lutar contra a guerra. Outra correspondência célebre foi com o também físico Niels Bohr, que em uma das cartas troca farpas com Einstein, referindo-se à célebre frase desse último: “Deus não joga dados”.

Trechos dos diários de Einstein são apresentados, incluindo anotações sobre sua visita ao Rio de Janeiro: “Deliciosa mistura étnica nas ruas. Portugueses, índios e negros em todos os cruzamentos. Espontâneos como plantas, subjugados pelo calor. Experiência fantástica. Uma indescritível abundância de impressões em poucas horas”, escreveu.

Estão presentes na exposição painéis explicativos e interativos sobre os conceitos relacionados a buracos negros, efeito fotoelétrico, reflexões sobre a luz e o tempo, gravidade, curvatura do espaço-tempo e a Teoria da Relatividade.

A instalação “Teia de luz” propõe ao visitante o desafio de atravessar uma sala cortada por feixes de luz sem tocá-los. Uma obra do artista Guto Lacaz demonstra que o ritmo com que flui o tempo depende do referencial e da velocidade do observador.

A instalação interativa “Máquina do tempo” exhibe a variação da passagem do tempo proporcional à velocidade relativa do visitante que, ao fornecer a data de nascimento, pode observar em vários relógios que idade teria se estivesse viajando em diferentes frações da velocidade da luz.

Outro destaque, na seção “Legado”, é a instalação OP_ERA: Sonic Dimension, das artistas Rejane Cantoni e Daniela Kutschat, uma “harpa de luz” que remete às inspirações artísticas provenientes das teorias de Einstein. A mostra apresenta também um painel com cartas escritas ao cientista por crianças de sua época.

Museu nacional de ciências

De acordo com o presidente do Instituto Sangari, Ben Sangari, a instituição planeja criar no Brasil um museu de história natural de classe mundial, nos moldes do existente em Nova York.

“O Brasil é um país que cresce rapidamente e já é um dos mais importantes do planeta. No entanto, é a única das grandes economias do mundo que ainda não tem um museu nacional de ciências. Estamos trabalhando para a criação do primeiro”, destacou.

Segundo Sangari, o museu, que deverá ser criado em São Paulo, seria não apenas um polo de pesquisa e conhecimento, mas também uma importante fonte geradora de trabalho e de renda para a cidade.

“O impacto sobre o turismo seria considerável. O Museu Americano de História Natural é o terceiro local de maior visitação nos Estados Unidos, depois de dois parques da Disney. Em São Paulo, um museu desses poderia ser um ímã para o turismo na América Latina, já que seria o maior museu do continente”, afirmou Sangari.

Segundo Sangari, já há empresas interessadas em financiar o projeto. “A parte mais difícil é criar uma ponte para parcerias institucionais e internacionais que viabilizem o projeto, o que caberia a nós. Acreditamos que há condições para a criação de um museu monumental em São Paulo, que atrairia de 3 a 4 milhões de visitantes anualmente”, disse.

Fábio de Castro. “Einstein no Brasil”. Agência Fapesp, 24 set. 2008. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/9473>>. Acesso em: 6 jul. 2012.

RESUMINDO

Este capítulo é fundamental para a compreensão da Física moderna, pois estabelece os fundamentos da Física quântica.

Inicialmente estudou-se o problema do corpo negro, que consiste em determinar um modelo teórico que explique a distribuição de energia em função do comprimento de onda de um corpo negro – um corpo que absorve tudo o que nele incide (absorbância unitária) emitindo somente o que lhe é próprio (emitância unitária), a uma dada temperatura.

Mostrou-se que este problema foi estudado pelo físico alemão Max Planck, que no início do século XX propôs que a energia fosse uma quantidade discreta, composta de um número finito de partes iguais, conhecidas hoje como quanta. Planck propôs também que a energia fosse dependente da frequência (f), obedecendo a seguinte relação:

$$E = n \cdot h \cdot f$$

Na equação anterior, n é o número quântico (número natural) e h é a constante de Planck, que é igual a $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s.

O trabalho de Planck propiciou uma série de outras descobertas, dentre elas a explicação do efeito fotoelétrico em 1905 por Albert Einstein.

O efeito fotoelétrico constitui-se na emissão de elétrons por um material quando radiação eletromagnética, acima de uma determinada frequência denominada frequência de corte, incide sobre ele.

Einstein propõe que a luz seja constituída por pacotes de energia, denominados fótons, tal que a energia de cada um desses fótons é determinada pela sua frequência, de acordo com a expressão:

$$E = h \cdot f$$

Assim, se a energia da radiação é superior a um determinado valor que depende do material, denominado função trabalho (E_0), ocorre a emissão fotoelétrica, e o restante da energia é convertida em energia cinética do elétron (E_c), tal que:

$$E_{inc} = E_0 + E_c$$

A comprovação da teoria de Einstein veio com a experiência realizada por Compton, na qual um feixe de raios X espalhado por um gás a baixa pressão tem frequência menor do que o feixe de raios X incidente.

■ QUER SABER MAIS?



SITES

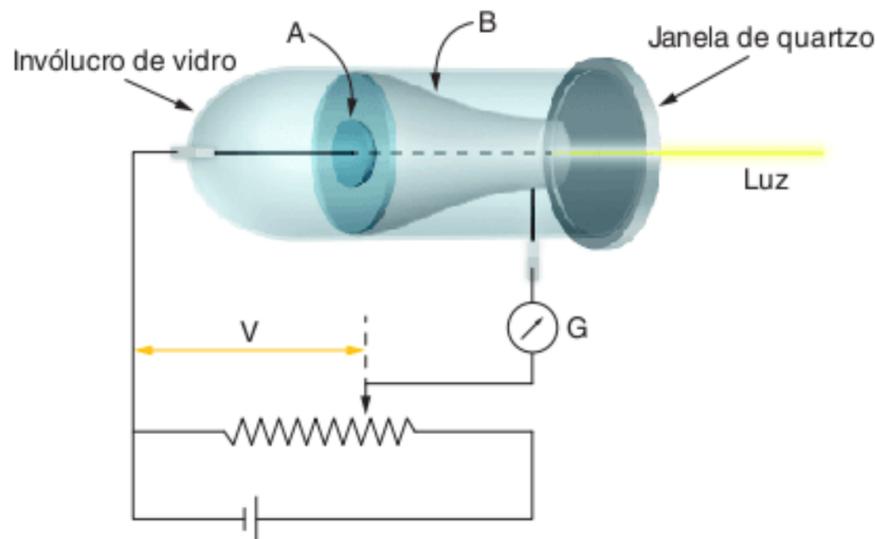
- Associação Nobel, com todos os laureados, respectivos discursos de recebimento dos prêmios e pesquisas feitas, incluindo os trabalhos de Planck, Einstein e Compton.
www.nobelprize.org
- Universidade Federal do Rio Grande do Sul com a explicação do problema do corpo negro.
www.if.ufrgs.br/~betz/iq_XX_A/radTerm/aRadTermFrame.htm
- Simulador autoexplicativo do efeito fotoelétrico.
www.fisica.ufs.br/CorpoDocente/egsantana/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm

Exercícios complementares

Questões gerais

- 1** A potência total de uma lâmpada de incandescência é de 200 W. A lâmpada possui um filamento de tungstênio de comprimento igual a 20 cm e diâmetro igual a 0,8 mm. Considere a emissividade do tungstênio igual a 0,258. Determine:
 - a) a radiância total do filamento.
 - b) a temperatura na superfície do filamento.
- 2** A radiação solar incide sobre a Terra a uma taxa em relação ao tempo de $2 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$. A quantos fótons por cm^2 por minuto corresponde a citada taxa, supondo-se um comprimento de onda média de 5.000 \AA ?
- 3** Um átomo absorve um fóton com comprimento de onda de 3.750 \AA e imediatamente emite outro fóton com comprimento de onda de 5.800 \AA . Quanta energia foi absorvida pelo átomo nesse processo?
- 4** A energia necessária para se remover um elétron do átomo de sódio é de 2,3 eV. Esse metal admitirá o efeito fotoelétrico, ao ser iluminado por um feixe de luz alaranjada com $\lambda = 6.850 \text{ \AA}$?
- 5** Fótons incidentes atingem uma superfície de sódio com $E_0 = 2,2 \text{ eV}$, dando lugar à emissão fotoelétrica.

Ao se impor um potencial reverso na montagem da figura a seguir, de 4,5 V, deixa de haver fotocorrente. Qual é o comprimento de onda dos fótons incidentes?



6 Uma luz de comprimento de onda igual a 5.890 \AA incide sobre uma superfície metálica. O potencial que freia os elétrons e os impede de atingir a outra placa é igual a $0,36 \text{ V}$. Calcule:

- a energia máxima dos elétrons emitidos.
- a energia mínima E_0 necessária para se retirar elétrons do metal.
- o comprimento de onda máximo, ou de corte.

7 Um feixe de ondas paralelas com $\lambda = 1.000 \text{ \AA}$ incide ortogonalmente sobre a superfície de uma placa de alumínio. A função trabalho (E_0) para o alumínio é igual a $4,2 \text{ eV}$

- Se a intensidade do feixe valer $0,5 \text{ W/m}^2$, qual será a energia cinética máxima dos elétrons emitidos pela placa de alumínio?
- Se a intensidade do feixe for igual a 2 W/m^2 , qual será a energia cinética máxima dos elétrons emitidos pela placa de alumínio?

8 A função trabalho do sódio vale $2,3 \text{ eV}$ ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Sabendo que o valor da constante de Planck é $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ e que a carga do elétron vale $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, calcule:

- o maior valor do comprimento de onda capaz de produzir o efeito fotoelétrico.
- a energia cinética máxima dos elétrons quando a luz incidente tem comprimento de onda $\lambda = 2.000 \text{ \AA}$.
- o potencial de corte.

9 Para romper uma ligação química da pele humana, causando queimadura solar, é necessária uma irradiação de fótons de cerca de $3,5 \text{ eV}$ de energia.

A que comprimento de onda isso corresponde?

10 Que diferença de potencial deve ser aplicada para parar os mais rápidos fotoelétrons emitidos por uma superfície de níquel sob a ação de luz ultravioleta de comprimento de onda 2.000 \AA (A função trabalho do níquel é de $5,01 \text{ eV}$)?

11 Com que velocidade os mais rápidos fotoelétrons serão emitidos de uma superfície cujo comprimento de onda limite (ou limiar) é 600 nm , quando a superfície é iluminada com luz de comprimento de onda de 400 nm ?

12 Elétrons, com energia cinética máxima de 3 eV , são emitidos de uma superfície metálica por uma radiação ultravioleta de comprimento de onda de 1.500 \AA . Determine a função trabalho do metal, seu comprimento de onda limite e a diferença de potencial retardador necessária para parar a emissão de elétrons.

13 Raios X, com $\lambda = 1,00 \text{ \AA}$, são espalhados por um bloco de carbono. A radiação espalhada é detectada a um ângulo de 90° com a direção do feixe incidente.

- Qual é o desvio Compton $\Delta\lambda$?
- Qual é a energia cinética adquirida pelo elétron de recuo?

14 Fótons de comprimento de onda igual a $0,024 \text{ \AA}$ incidem sobre elétrons livres.

- Determinar o comprimento de onda do fóton que é espalhado de 30° a partir da direção incidente.
- Determinar o comprimento de onda do fóton que é espalhado de 120° a partir da direção incidente.

15 Um fóton de raios X, de comprimento de onda $\lambda = 0,10 \text{ \AA}$, atinge um elétron frontalmente ($\phi = 180^\circ$). Determinar:

- a variação no comprimento de onda do fóton.
- a variação da energia do fóton.
- a energia cinética final do elétron.

16 Um fóton ($\lambda = 0,400 \text{ nm}$) atinge um elétron em repouso e é desviado de um ângulo de 150° de sua direção inicial. Calcule a velocidade e comprimento de onda do fóton após a colisão.

17 Um feixe de raios X, de comprimento de onda exatamente igual a $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}$, atinge um próton que está em repouso ($m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$). Se os raios X são espalhados de um ângulo de 110° , qual é o comprimento de onda destes raios?

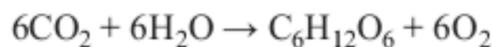
18 Unicamp 2011 Em 1905, Albert Einstein propôs que a luz é formada por partículas denominadas fótons. Cada fóton de luz transporta uma quantidade de energia $E = h \nu$ e possui momento linear $p = \frac{h}{\lambda}$, em que $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ é a constante de Planck e ν e λ são, respectivamente, a frequência e o comprimento de onda da luz.

- A aurora boreal é um fenômeno natural que acontece no polo Norte, no qual efeitos luminosos são produzidos por colisões entre partículas carregadas e os átomos dos gases da alta atmosfera terrestre. De modo geral, o efeito luminoso é dominado pelas colorações verde e vermelha, por causa das colisões das partículas carregadas com átomos de oxigênio e nitrogênio, respectivamente.

Calcule a razão $R = \frac{E_{\text{verde}}}{E_{\text{vermelho}}}$, em que E_{verde} é a energia transportada por um fóton de luz verde com 500 nm , $\lambda_{\text{verde}} = 500 \text{ nm}$, e E_{vermelho} é a energia transportada por um fóton de luz vermelha com $\lambda_{\text{vermelho}} = 650 \text{ nm}$.

b) Os átomos dos gases da alta atmosfera estão constantemente absorvendo e emitindo fótons em várias frequências. Um átomo, ao absorver um fóton, sofre uma mudança em seu momento linear, que é igual, em módulo, direção e sentido, ao momento linear do fóton absorvido. Calcule o módulo da variação de velocidade de um átomo de massa $m = 5,0 \cdot 10^{-26}$ kg que absorve um fóton de comprimento de onda $\lambda = 660$ nm.

19 ITA 2010 No processo de fotossíntese, as moléculas de clorofila do tipo “a” nas plantas verdes apresentam um pico de absorção da radiação eletromagnética no comprimento de onda $\lambda = 6,80 \cdot 10^{-7}$ m. Considere que a formação de glicose ($C_6H_{12}O_6$) por esse processo de fotossíntese seja descrita, de forma simplificada, pela reação:



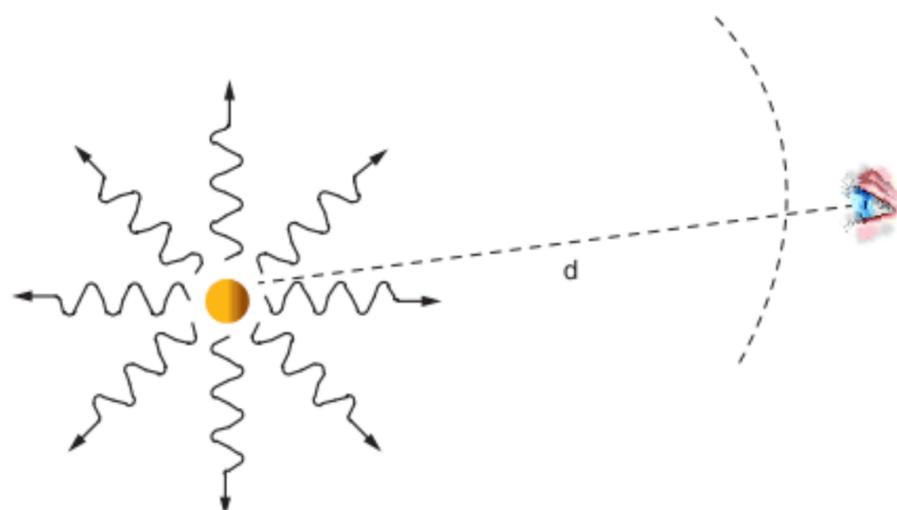
Sabendo-se que a energia total necessária para que uma molécula de CO_2 reaja é de $2,34 \cdot 10^{-18}$ J, o número de fótons que deve ser absorvido para formar 1 mol de glicose é:

- (a) 8
- (b) 24
- (c) 48
- (d) 120
- (e) 240

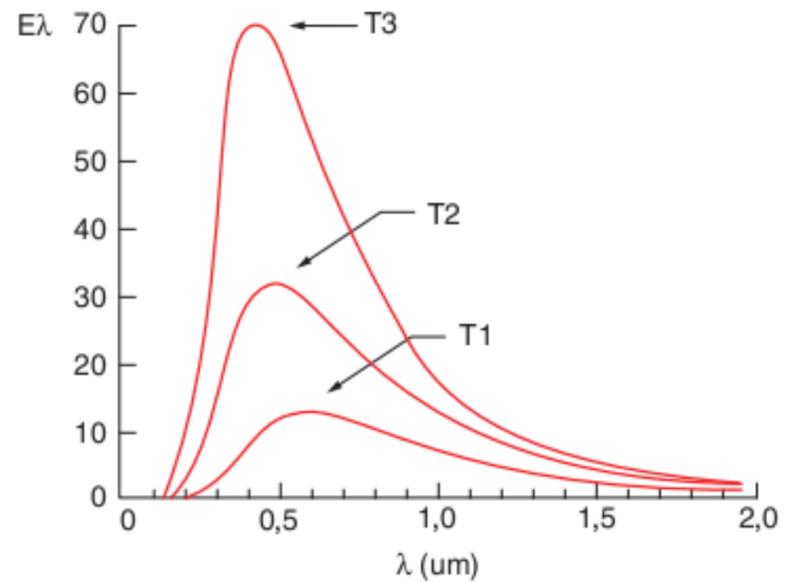
20 ITA 2010 O olho humano é uma câmara com um pequeno diafragma de entrada (pupila), uma lente (cristalino) e uma superfície fotossensível (retina). Chegando à retina, os fótons produzem impulsos elétricos que são conduzidos pelo nervo ótico até o cérebro, onde são decodificados.

Quando devidamente acostumada à obscuridade, a pupila se dilata até um raio de 3 mm e o olho pode ser sensibilizado por apenas 400 fótons por segundo. Numa noite muito escura, duas fontes monocromáticas, ambas com potência de $6 \cdot 10^{-5}$ W, emitem, respectivamente, luz azul ($\lambda = 475$ nm) e vermelha ($\lambda = 650$ nm) isotropicamente, isto é, em todas as direções. Desprezando a absorção de luz pelo ar e considerando a área da pupila circular, qual das duas fontes pode ser vista a uma maior distância?

Justifique com cálculos.



21 Udesc 2010 A figura a seguir mostra o gráfico da intensidade de radiação por comprimento de onda emitida por um corpo negro para diferentes temperaturas.



Com base nas informações do gráfico, analise as afirmativas a seguir.

- I. A temperatura T1 é maior que a temperatura T3.
- II. A intensidade total de radiação emitida é maior para temperatura T3.
- III. O comprimento de onda para o qual a radiação é máxima é maior para temperatura T3.
- IV. As temperaturas T1, T2 e T3 são iguais.
- V. As intensidades totais de radiação emitida são iguais para T1, T2 e T3.

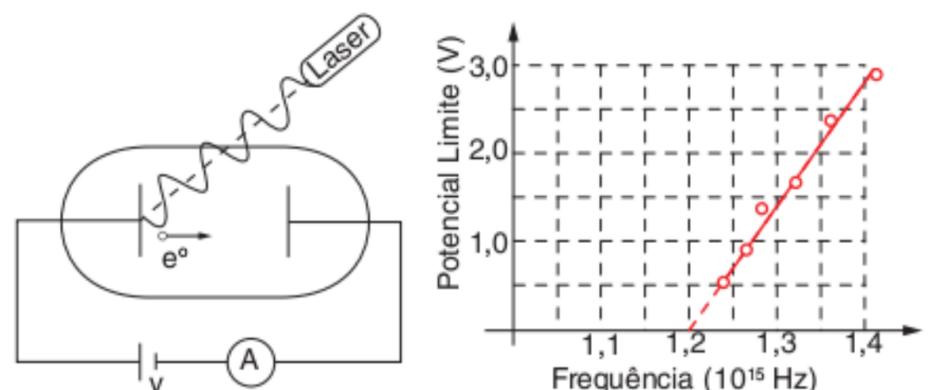
Assinale a alternativa correta.

- (a) Somente as afirmativas I, II e V são verdadeiras.
- (b) Somente as afirmativas II e IV são verdadeiras.
- (c) Somente a afirmativa I é verdadeira.
- (d) Somente as afirmativas III e IV são verdadeiras.
- (e) Somente a afirmativa II é verdadeira.

22 UFG 2009 As portas automáticas, geralmente usadas para dividir ambientes, com climatização, do meio externo, usam células fotoelétricas, cujo princípio de funcionamento baseia-se no efeito fotoelétrico, que rendeu ao físico Albert Einstein o Prêmio Nobel de 1921, por sua explicação de 1905. No experimento para observação desse efeito, incide-se um feixe de luz sobre uma superfície metálica polida, localizada em uma região sob uma diferença de potencial V, conforme a figura, e mede-se o potencial freador que faz cessar a corrente entre os eletrodos, sendo este o Potencial Limite. O gráfico representa a dependência entre o Potencial Limite e a frequência da luz incidente sobre a superfície de uma amostra de níquel.

Tendo em vista o exposto, responda:

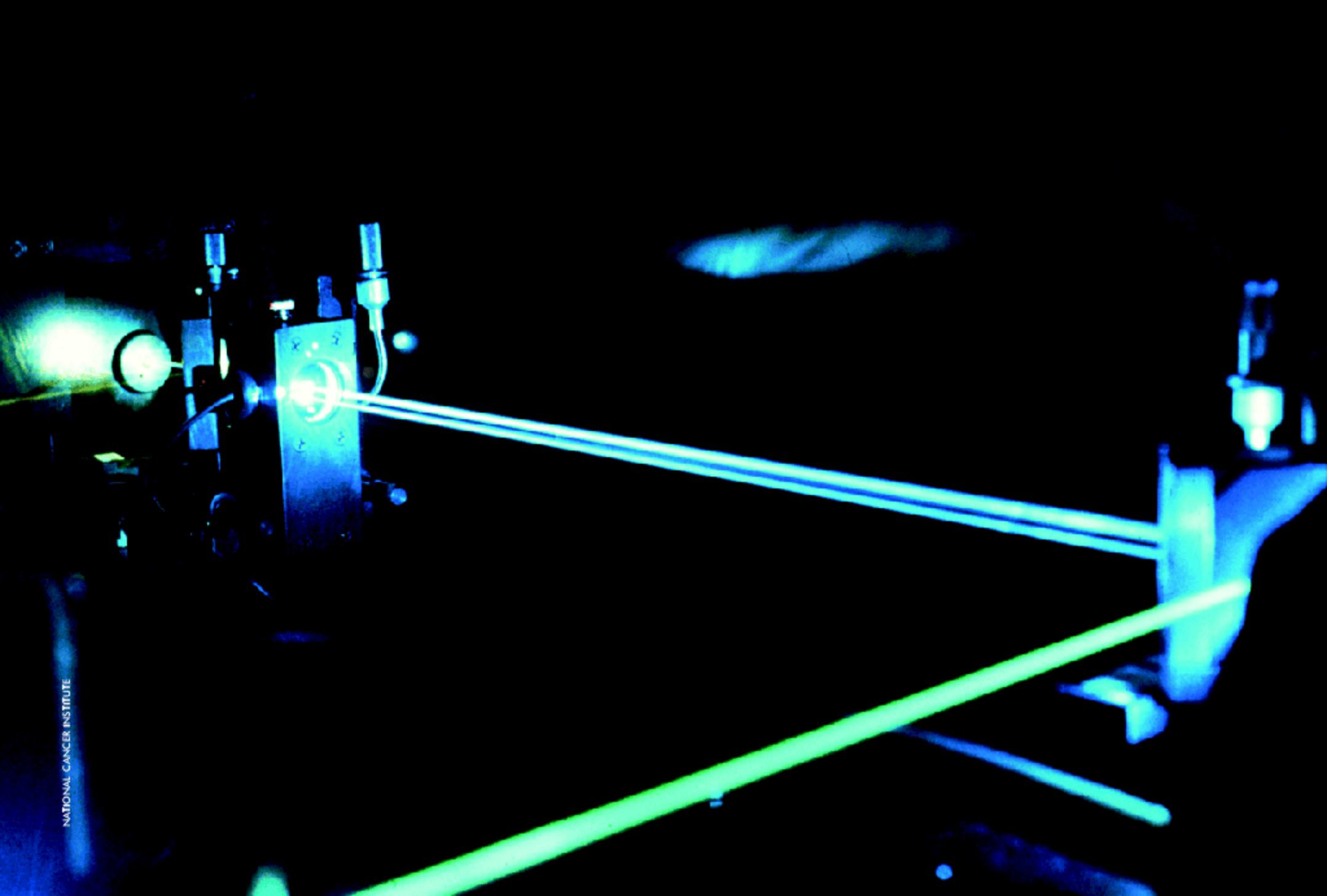
- a) Qual é a menor frequência da luz, em Hertz, que consegue arrancar elétrons da superfície do metal?
- b) Para o potencial de 1,5 V, qual é a energia cinética (em Joules) do elétron ejetado da superfície do metal?



2

Átomo de Bohr

O *laser*, originalmente uma sigla para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que esteve por muito tempo na imaginação dos amantes de ficção científica, hoje tem papel importante em nosso dia a dia, com aplicações em leitores de mídias, como o *DVD* e o *Blu-ray*, fibras ópticas para transferência de dados e tratamentos cirúrgicos. O *laser* não encontra explicação plena na teoria eletromagnética clássica. O conceito de emissão estimulada de luz, princípio básico de funcionamento do *laser*, foi sugerido por Albert Einstein, considerando o trabalho de Niels Bohr sobre o átomo de hidrogênio.



O átomo e o espectro de raias



Fig. 1 Niels Bohr (1885-1962), físico dinamarquês, Prêmio Nobel de Física, em 1922, pela investigação da estrutura dos átomos e da radiação por eles emitida.

No trabalho de Bohr, foi aplicada pela primeira vez a hipótese quântica com sucesso razoável. Apesar de algumas partes da teoria de Bohr estarem erradas, como veremos mais tarde, ela foi capaz de explicar porque átomos excitados emitiam luz somente com certas frequências e, para alguns casos, capaz de prever o valor numérico dessas frequências.

O primeiro sucesso da teoria de Bohr foi a explicação do espectro de emissão dos átomos. O que se faz para obter esse espectro é ocasionar uma descarga elétrica em um gás a ser investigado. Para o hidrogênio, por exemplo, a teoria de Bohr é capaz de determinar com precisão a magnitude do espectro de raias, conforme se vê na figura 2.

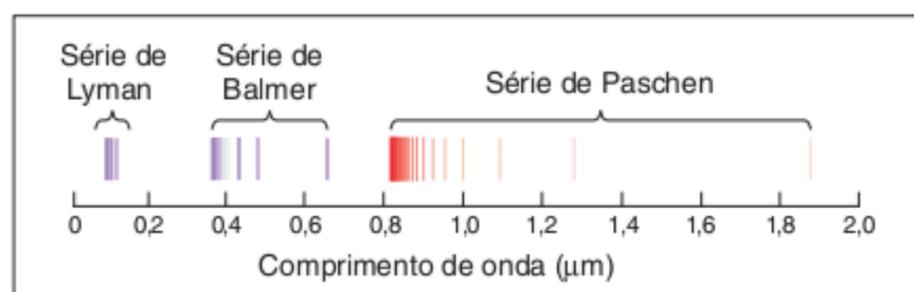


Fig. 2 Raias espectrais do átomo de hidrogênio.

As séries de raias espectrais recebem nomes especiais, como Balmer, Paschen e Lyman.

Balmer, por exemplo, por volta de 1885, foi quem determinou uma fórmula empírica para uma série de frequências emitidas pelo átomo de hidrogênio:

$$f = \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right) \cdot 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Hz} \quad (1)$$

Onde n é um número natural maior do que dois.

Essa série de frequências ficou conhecida como série de Balmer.

O empirismo e a precisão da fórmula intrigou aos cientistas da época, até que Bohr, por meio de sua teoria atômica, foi capaz de explicar o fato.

Observação: A emissão de luz, em frequências discretas, por gases percorridos por corrente elétrica já era conhecida no século XIX.

O átomo de Bohr

O modelo do átomo de Ernest Rutherford de órbitas circulares contrariava a mecânica clássica, pois cargas elétricas aceleradas emitem onda eletromagnética, perdendo energia e,

consequentemente, de acordo com o modelo, todos os elétrons do átomo deveriam se chocar com o núcleo, como se observa na figura 3.

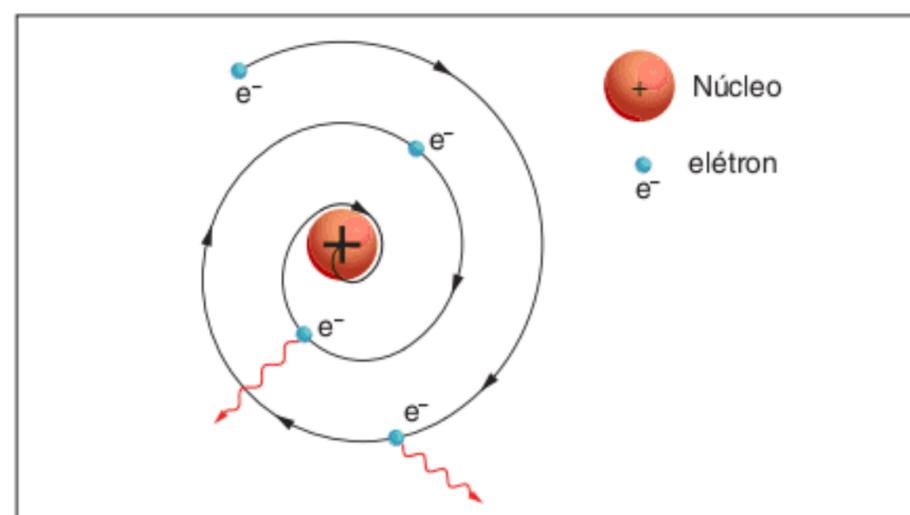


Fig. 3 Modelo de Rutherford e a mecânica clássica.

Em seu modelo, Bohr solucionou esse problema, bem como explicou a emissão em espectro de raias. O modelo do átomo de hidrogênio de Bohr foi fundamentado em quatro postulados:

- 1º No átomo, somente é permitido ao elétron estar em certos estados estacionários, sendo que cada um dos elétrons possui uma energia fixa e definida.
- 2º Quando um átomo estiver em um estado estacionário, ele não pode emitir luz. No entanto, quando o átomo passar de um estado de maior energia para um estado de menor energia, haverá emissão de um *quantum* de radiação, cuja energia $h \cdot f$ será igual à diferença de energia entre os dois estados.
- 3º Se o átomo estiver em qualquer um dos estados estacionários, o elétron se movimenta descrevendo uma órbita circular em volta do núcleo.
- 4º Os estados eletrônicos permitidos são aqueles nos quais o momento angular do elétron é quantizado e vale $L = n \cdot \frac{h}{2\pi}$, com $n \in \mathbb{N}^*$.

Vamos, agora, deduzir expressões simples para o cálculo da energia dos estados permitidos, bem como da frequência emitida.

Observação: O primeiro e o segundo postulados de Bohr estão corretos, o quarto é parcialmente correto, ou seja, o momento angular do elétron é definido, mas não como Bohr o fez. O terceiro postulado não faz parte da atual Física quântica.

Determinação matemática da energia nos níveis permitidos e das frequências emitidas pelo átomo

Conforme dito anteriormente, utilizaremos alguns conceitos de eletrostática básica, da mecânica clássica e dos postulados de Bohr a fim de determinar a energia nos níveis permitidos e das séries de frequências emitidas pelo átomo, em especial o de hidrogênio. Veremos também que as séries de Balmer, Paschen e Lyman são apenas casos especiais da fórmula básica a que chegou Bohr.

Inicialmente, já que o elétron, de acordo com o terceiro postulado de Bohr, descreve uma trajetória circular, podemos dizer então que a força de atração coulombiana é a resultante centrípeta.

Assim:

$$\frac{Z \cdot e^2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (2)$$

Onde m e v são a massa e a velocidade do elétron, Z é o número de cargas elementares do núcleo e r é a distância do elétron ao núcleo. Percebamos aqui o fato de o átomo só possuir um elétron, pois assim essa teoria é válida (ver observação). A equação (2) pode ser simplificada, tal que:

$$\frac{Z \cdot e^2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} = mv^2 \quad (3)$$

Utilizando-se o quarto postulado de Bohr, temos:

$$L = mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (4)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$

Dessa forma, a equação (3) fica:

$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m Z e^2} \quad (5)$$

Com a equação (5), podemos ver que a distância do elétron ao núcleo não pode assumir um valor qualquer, somente valores bem-definidos. Simplifiquemos a expressão substituindo-se as constantes conhecidas por uma única constante física denominada **raio de Bohr** (a_0). Definida como:

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 0,52918 \text{ \AA}$$

Então, a equação (5) fica:

$$r = \frac{n^2}{Z} a_0 \quad (6)$$

Podemos afirmar que a energia total do elétron é a soma de sua energia cinética e da sua energia potencial. Como a força coulombiana existente entre próton e elétron é uma força atrativa, a energia potencial do elétron é negativa. Assim, a energia total do elétron é dada por:

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (7)$$

Substituindo-se a equação (3) em (7), teremos:

$$E = \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (8)$$

Esse resultado é bastante consistente com o esperado, já que, sendo a matéria estável e constituída por átomos, a energia total do elétron na sua órbita deveria ser negativa. De fato o é, sendo a metade da energia potencial.

Substituindo-se a equação (6) na equação (8), temos:

$$E = -\frac{Z^2}{2n^2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a_0} \quad (9)$$

Para o átomo de hidrogênio, $Z = 1$ e, se substituirmos as constantes e expressarmos a energia em eV (elétron volts), reescrevemos a equação (9) como:

$$E = -\frac{1}{2 \cdot n^2} \cdot 27,2485 \text{ eV} \quad (10)$$

Para um átomo, n é o número quântico principal.

A figura 4 mostra os níveis de energia com os seus valores expressos em eV.

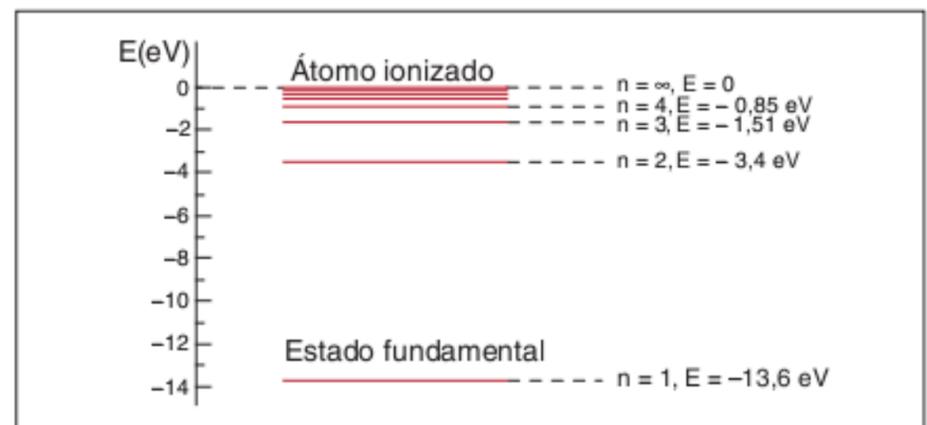


Fig. 4 Níveis de energia do átomo de hidrogênio.

Quando o elétron salta de um estado estacionário inferior para outro superior, há absorção de luz (energia); quando ele salta de um nível superior para um inferior, ocorre emissão de luz, através de um fóton com energia $h \cdot f$ igual à diferença de energia entre os dois níveis. Assim, podemos escrever:

$$E_i - E_f = h \cdot f = \frac{Z^2}{2} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a_0} \quad (11)$$

Portanto, a expressão final para a frequência do fóton emitido pelo átomo fica:

$$f = \frac{Z^2}{2} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \cdot \frac{e^2}{4h\pi\epsilon_0 a_0} \quad (12)$$

Essa expressão engloba as séries de Lyman, Balmer e Paschen. O que Balmer fez foi considerar o $n_f = 2$ e $Z = 1$ (átomo de hidrogênio).

Se tomarmos a equação (12) e substituirmos os seus valores pelos atualmente aceitos, para $Z = 1$ e $n_f = 2$, temos:

$$f = \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n_i^2} \right) \cdot 3,289842 \cdot 10^{15} \text{ Hz} \quad (13)$$

Observe a concordância entre os valores da fórmula empírica de Balmer (equação 1) e o valor obtido pela expressão geral de Bohr.

Na figura 5, tem-se a representação gráfica das séries de Lyman, Balmer e Paschen para o átomo de hidrogênio.

Essas séries têm n_f iguais a 1, 2 e 3, respectivamente.

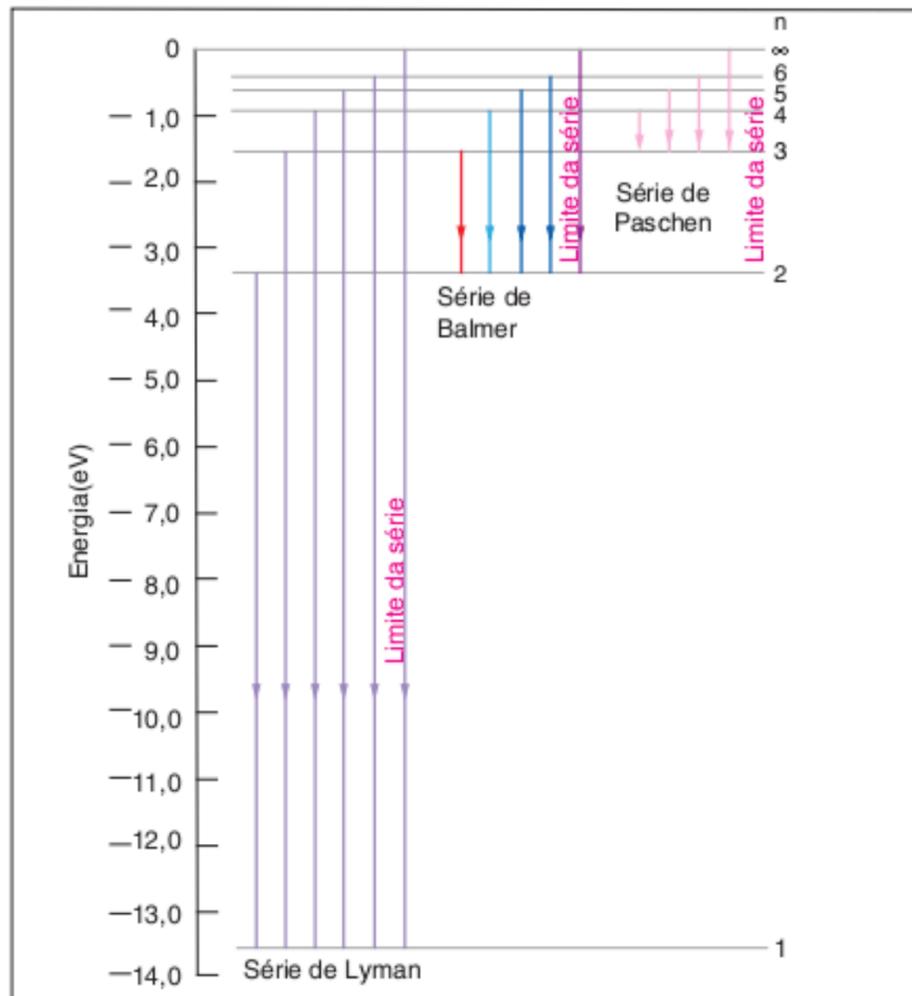


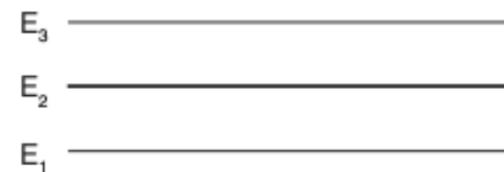
Fig. 5 Séries de emissão do átomo de hidrogênio.

Bohr também é autor do princípio da correspondência. Esse princípio nos diz que, quando o número quântico n tende a ∞ , a Física quântica se reduz à Física clássica, ou seja, para números quânticos grandes (aqueles encontrados no mundo macroscópico), pode-se tratar problemas quânticos com abordagem clássica sem se cometer grandes erros. Porém, quando se tende a números quânticos pequenos, os erros obtidos ao se usar a abordagem clássica e não a quântica são consideráveis.

Observação: Os níveis de Bohr são consistentes para átomos monoelétrônicos e, com correção, podem ser utilizados em átomos multieletrônicos. Porém, os níveis de energia não explicam a tabela periódica, pois a tabela periódica é coerente com os octetos eletrônicos e o modelo de Bohr não é. Com o avanço das pesquisas, ficou claro que a mecânica clássica usada por Bohr não poderia explicar as propriedades dos elétrons nos átomos, levando ao surgimento da mecânica quântica.

Exercício resolvido

1 O diagrama a seguir mostra os estados de energia que podem ser ocupados por um determinado elétron. A diferença de energia entre os estados 1 e 2, $E_2 - E_1$, é o dobro da diferença de energia $E_3 - E_2$, entre os estados 2 e 3. Em uma transição do estado 3 para o estado 2, o elétron emite um fóton de comprimento de onda $\lambda = 600 \text{ nm}$.



Determine os comprimentos de onda das outras transições possíveis.

Resolução:

Chamemos $E_3 - E_2 = \Delta E$. Assim, $E_2 - E_1 = 2 \Delta E$ e $E_3 - E_1 = 3 \Delta E$.

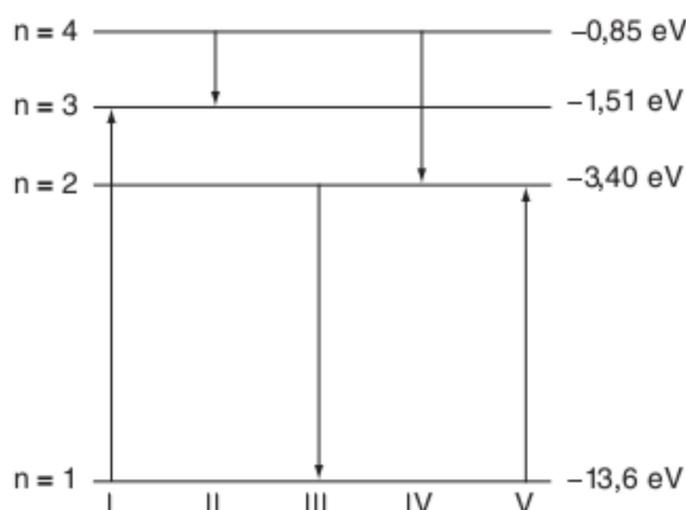
Como $\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$ ou $\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$, teremos:

$$\lambda_{2 \rightarrow 1} = \frac{hc}{2 \Delta E} = \frac{\lambda}{2} = 300 \text{ nm} \text{ e } \lambda_{3 \rightarrow 1} = \frac{hc}{3 \Delta E} = \frac{\lambda}{3} = 200 \text{ nm}$$

Revisando

1 O diagrama seguinte mostra alguns níveis de energia (n) de um elétron no átomo de hidrogênio e também algumas transições.

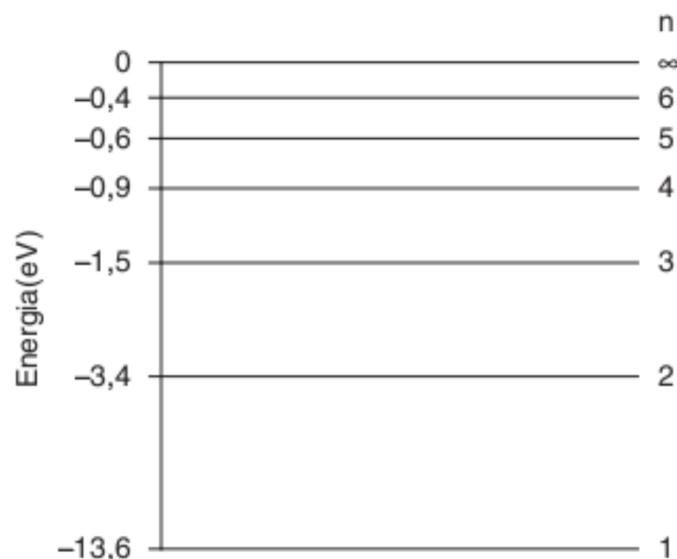
Dados: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ e $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.



Com base nos dados, responda às questões seguintes.

- Os intervalos entre os níveis de energia são constantes?
- Quais transições correspondem à absorção de energia e quais correspondem à emissão de um fóton?
- Qual é a frequência do fóton da transição IV? Essa radiação é visível?

2 UFMG A figura a seguir mostra os níveis de energia do átomo de hidrogênio. Se inicialmente o elétron está no estado quântico fundamental (de menor energia), qual a sua energia cinética após o átomo ter sido ionizado por um fóton de energia 20 eV?



Exercícios propostos

O átomo de Bohr

1 ITA A tabela mostra os níveis de energia de um átomo do elemento X que se encontra no estado gasoso.

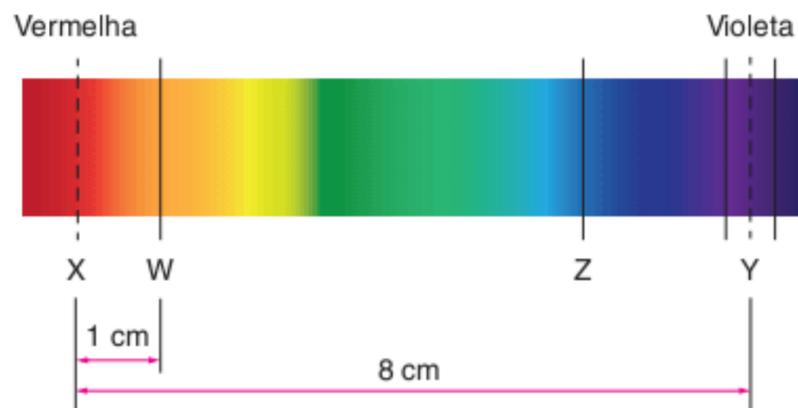
E_0	0
E_1	7,0 eV
E_2	13,0 eV
E_3	17,4 eV
Ionização	21,4 eV

Dentro das possibilidades a seguir, a energia que poderia restar a um elétron com energia de 15 eV, após colidir com um átomo de X, seria de:

- (a) 0 eV.
- (b) 4,4 eV.
- (c) 16,0 eV.
- (d) 2,0 eV.
- (e) 14,0 eV.

2 Uerj A luz emitida ou absorvida por um átomo, quando projetada em um anteparo, dá origem ao que se chama espectro atômico, uma espécie de “cédula de identidade” do átomo.

A figura a seguir mostra o espectro de raias da luz emitida pelo átomo de hidrogênio.



Cada raia na figura corresponde a uma frequência da luz emitida. Considere que os comprimentos de onda da luz, capazes de impressionar o olho humano, variam entre 6.900 \AA e 4.300 \AA . Estes comprimentos de onda são, respectivamente, os das cores vermelha e violeta e estão assinalados na figura pelas linhas tracejadas X e Y. Na escala da figura, a distância entre X e Y é igual a 8 cm e a raia luminosa W encontra-se a 1 cm de X. Sabendo ainda que a raia Z corresponde à luz de frequência $6,2 \cdot 10^{14} \text{ GHz}$ e que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo é $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, calcule os comprimentos de onda da:

- a) raia Z
- b) raia W

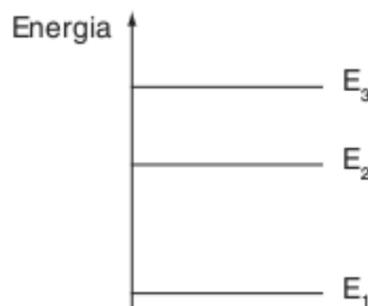
3 PUC-MG O modelo planetário de Rutherford foi aceito apenas parcialmente porque:

- I. os elétrons deveriam perder energia orbitando em torno dos prótons.
- II. os elétrons não têm massa suficiente para orbitar em torno dos prótons.
- III. os elétrons colidiram entre si ao orbitar em torno dos prótons.

Assinale:

- (a) se apenas as afirmativas I e II forem falsas.
- (b) se apenas as afirmativas II e III forem falsas.
- (c) se apenas as afirmativas I e III forem falsas.
- (d) se todas forem verdadeiras.
- (e) se todas forem falsas.

4 UFMG A figura mostra, esquematicamente, os níveis de energia permitidos para elétrons de um certo elemento químico. Quando esse elemento emite radiação, são observados três comprimentos de onda diferentes λ_a , λ_b e λ_c .

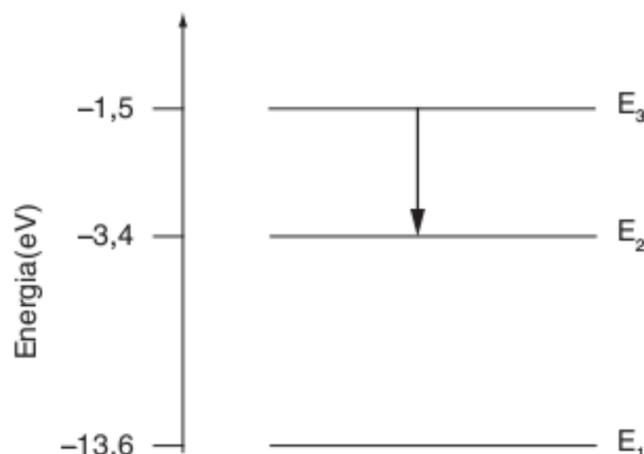


- a) Com base na figura, explique a origem da radiação correspondente aos comprimentos de onda λ_a , λ_b e λ_c .
- b) Considere que $\lambda_a < \lambda_b < \lambda_c$. Sendo h a constante de Planck e c a velocidade da luz, determine uma expressão para o comprimento de onda λ_a .

5 ITA Um átomo de hidrogênio tem níveis de energia discretos dados pela equação $E_n = \frac{-13,6}{n^2}$ (eV), em que $\{n \in \mathbb{Z} / n \geq 1\}$.

Sabendo que um fóton de energia 10,19 eV excitou o átomo do estado fundamental ($n = 1$) até o estado p , qual deve ser o valor de p ? Justifique.

6 UFGO Transições eletrônicas, em que fótons são absorvidos ou emitidos, são responsáveis por muitas das cores que percebemos. Na figura a seguir, vê-se parte do diagrama de energias do átomo de hidrogênio.



Na transição indicada ($E_3 \rightarrow E_2$), um fóton de energia:

- (a) 1,9 eV é emitido.
- (b) 1,9 eV é absorvido.
- (c) 4,9 eV é emitido.
- (d) 4,9 eV é absorvido.
- (e) 3,4 eV é emitido.

7 PUC-RS Um átomo excitado emite energia, muitas vezes na forma de luz visível, porque:

- (a) um de seus elétrons foi arrancado do átomo.
- (b) um dos elétrons desloca-se para níveis mais baixos, aproximando-se do núcleo.
- (c) um dos elétrons desloca-se para níveis de energia mais altos, afastando-se do núcleo.
- (d) os elétrons permanecem estacionários em seus níveis de energia.
- (e) os elétrons se transformam em luz, segundo Einstein.

8 UFMG No modelo de Bohr do átomo de hidrogênio, a energia do átomo:

- (a) pode ter qualquer valor.
- (b) tem um único valor fixo.
- (c) independe da órbita do elétron.
- (d) tem alguns valores possíveis.

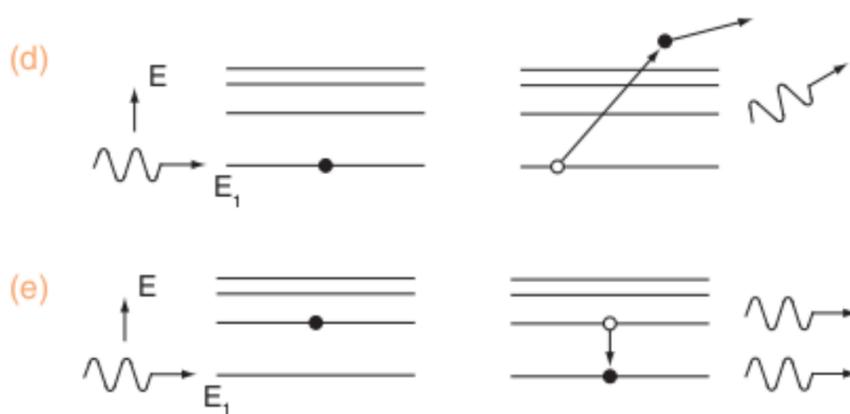
9 PUC-MG Escolha, entre os modelos atômicos citados nas opções, aquele (aqueles) que, na sua descrição, inclui (incluam) o conceito de fóton.

- (a) Modelo atômico de Thomson.
- (b) Modelo atômico de Rutherford.
- (c) Modelo atômico de Bohr.
- (d) Modelos atômicos de Rutherford e de Bohr.
- (e) Modelos atômicos de Thomson e de Rutherford.

10 UFC Quando um fóton (γ) incide sobre um átomo ou molécula no estado fundamental ou em estados próximos ao estado fundamental modestamente excitados, vários fenômenos físicos de emissão ocorrem.

As alternativas a seguir apresentam figuras de níveis quânticos de energia de alguns destes fenômenos. Assinale a alternativa que representa, corretamente, a emissão estimulada.

- (a)
- (b)
- (c)



11 Unifei 2009 Niels Bohr, no início do século XX, fundamentou-se em quatro postulados para a proposição de seu modelo atômico. Esses postulados são apresentados abaixo.

- I. Um elétron em um átomo se move em uma órbita circular em torno do núcleo sob a influência da atração coulombiana entre o elétron e o núcleo, obedecendo às leis da mecânica clássica.
- II. Um elétron só pode se mover em uma órbita na qual o módulo do seu momento angular orbital L é um múltiplo inteiro de $h/2\pi$, sendo h a constante de Planck.
- III. Apesar de estar constantemente acelerado, um elétron que se move em uma dessas órbitas possíveis, não emite radiação eletromagnética e sua energia total E permanece constante.
- IV. É emitida radiação eletromagnética se um elétron, que se move inicialmente sobre uma órbita de energia tal E_i , muda seu movimento descontinuamente de forma a se mover em uma órbita de energia total E_f . A frequência da radiação emitida é dada por $f = (E_i - E_f)/h$.

Em relação a esses postulados, uma das seguintes afirmações é falsa.

- (a) O segundo postulado corresponde à quantização do momento angular e conduz, com utilização do primeiro postulado, à quantização da energia do sistema.
- (b) A aceleração a que se refere o terceiro postulado, corresponde à aceleração angular, já que o movimento é circular.
- (c) A emissão de radiação, mencionada no quarto postulado, corresponde a um fóton de energia exatamente igual a $E = hf = (E_i - E_f)$.
- (d) Diz-se que uma grandeza física é quantizada quando os valores numéricos que ela pode assumir fazem parte de um conjunto discreto de valores, isto é, tal grandeza física não pode variar continuamente desde um dado valor até outro.

12 Unicamp 2008 Com um pouco de capacidade de interpretação do enunciado, é possível entender um problema de Física moderna, como o exposto a seguir, com base nos conhecimentos de Ensino Médio.

O Positrônio é um átomo formado por um elétron e sua antipartícula, o pósitron, que possui carga oposta e massa igual à do

elétron. Ele é semelhante ao átomo de Hidrogênio, que possui um elétron e um próton. A energia do nível fundamental desses

átomos é dada por $E_1 = \frac{-13,6}{\left(1 + \frac{m_e}{m_p}\right)} \text{ eV}$, onde m_e é a massa do

elétron e m_p é a massa do pósitron, no caso do Positrônio, ou a massa do próton, no caso do átomo de Hidrogênio. Para o átomo de Hidrogênio, como a massa do próton é muito maior que a massa do elétron, $E_1 = -13,6 \text{ eV}$.

- a) Calcule a energia do nível fundamental do Positrônio.
- b) Ao contrário do átomo de Hidrogênio, o Positrônio é muito instável, pois o elétron pode se aniquilar rapidamente com a sua antipartícula, produzindo fótons de alta energia, chamados raios gama. Considerando que as massas do elétron e do pósitron são $m_e = m_p = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, e que, ao se aniquilarem, toda a sua energia, dada pela relação de Einstein $E_p + E_e = m_e c^2 + m_p c^2$, é convertida na energia de dois fótons gama, calcule a energia de cada fóton produzido. A velocidade da luz é $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

13 Unifei 2008 O físico dinamarquês Niels Bohr aperfeiçoou o modelo atômico do físico inglês Ernest Rutherford introduzindo as ideias de quantização propostas por Max Planck (físico alemão). A principal novidade dessas ideias está no fato de que os estados nos quais os sistemas físicos podem ser encontrados não podem ter quaisquer valores de energia, e os estados possíveis são aqueles cujos valores de suas energias fazem parte de determinados conjuntos de valores discretos. Por exemplo, para o caso do átomo de hidrogênio, Bohr propôs, em 1913, que as energias que o elétron pode ter em relação ao núcleo são dadas pela fórmula:

$$E_n = \frac{-m_e e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2 n^2}; \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots;$$

n é denominado número quântico principal e sempre um número inteiro, m_e é a massa do elétron, e é a carga do elétron, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, onde h é a constante de Planck.

Assim, todos os valores das energias do átomo de hidrogênio são negativos e proporcionais a $\frac{1}{n^2}$.

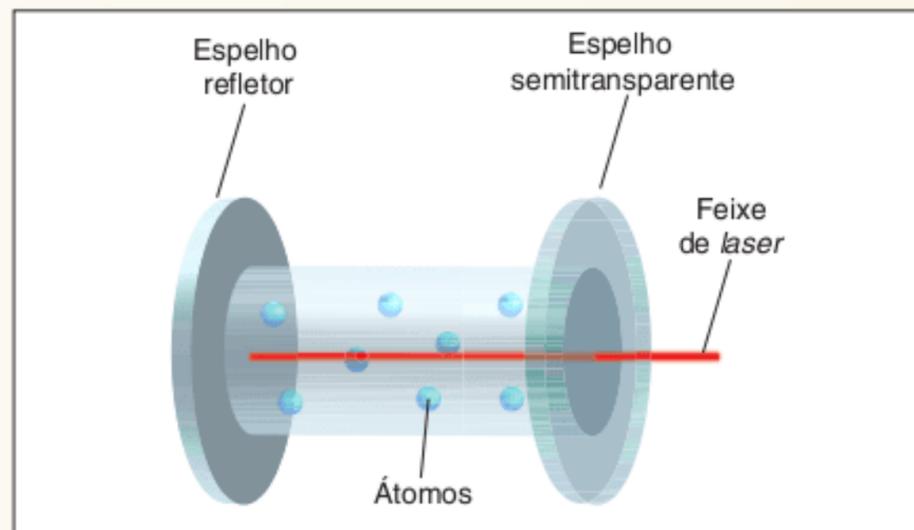
Quando $n = 1$, dizemos que o átomo encontra-se no estado fundamental, o de menor energia e $E_1 = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J}$.

- a) Qual é energia requerida para que um átomo de hidrogênio, no estado fundamental, possa passar para o estado correspondente a $n = 2$? Como essa energia pode ser fornecida a esse átomo?
- b) O que representa o estado onde $n = \infty$? O elétron pode ter energias positivas em relação ao núcleo? O que significaria isso?

TEXTO COMPLEMENTAR

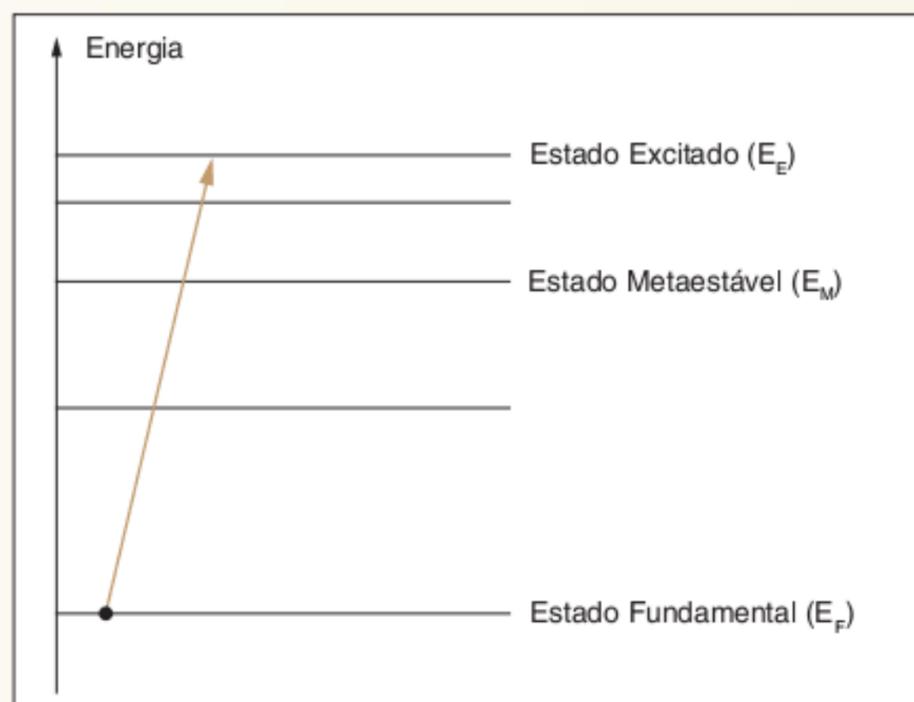
O entendimento do espectro de radiação do átomo de hidrogênio através dos postulados de Bohr, nos permite compreender uma das maiores invenções do homem no século XX, o laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), ou amplificação da luz por emissão estimulada.

Alguns materiais têm a propriedade de possuírem estados metaestáveis, eles demoram mais do que outros estados para decair estando em um nível de energia acima do nível fundamental. Essa propriedade é importante para a geração de laser e será explicada a seguir.



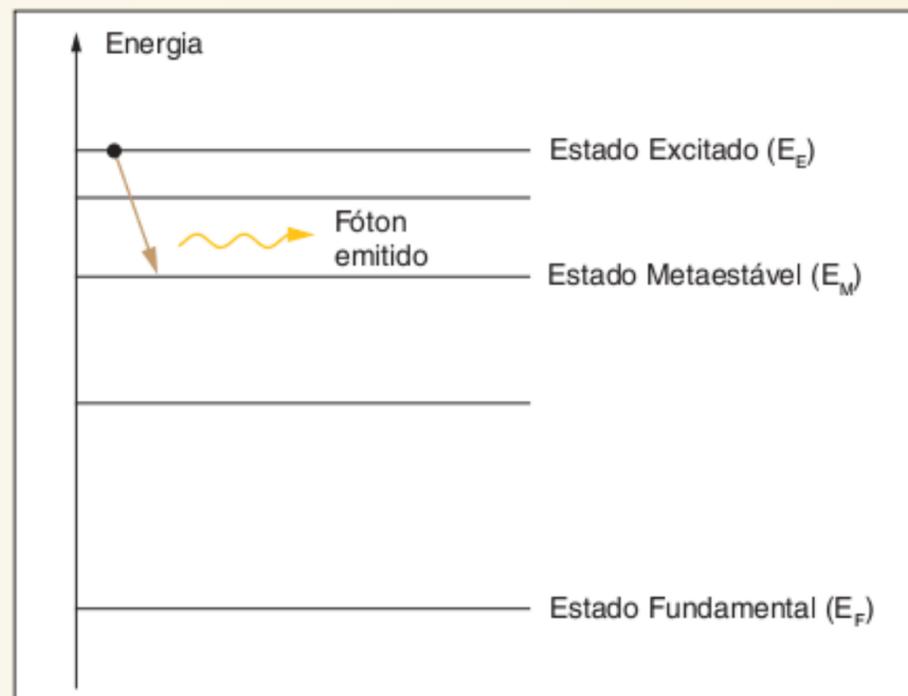
Cavidade para geração do laser.

Na figura anterior, observa-se um cilindro onde, em uma extremidade, há um espelho refletor e, na outra, um espelho semitransparente. Energia é bombeada para dentro do cilindro fazendo com que alguns elétrons abandonem o estado fundamental e atinjam um estado excitado. Naturalmente, os elétrons decaem para um nível metaestável, liberando energia e excitando mais elétrons. Assim, tem-se vários elétrons em um nível de energia metaestável e, em um dado momento, todos decaem ao mesmo tempo, liberando uma onda eletromagnética de frequência única, coerente (em fase), e bem-direcionada. Os fótons liberados não se perdem, pois eles são refletidos nas paredes do cilindro e uma parte passa através do espelho semitransparente, gerando um feixe de laser.



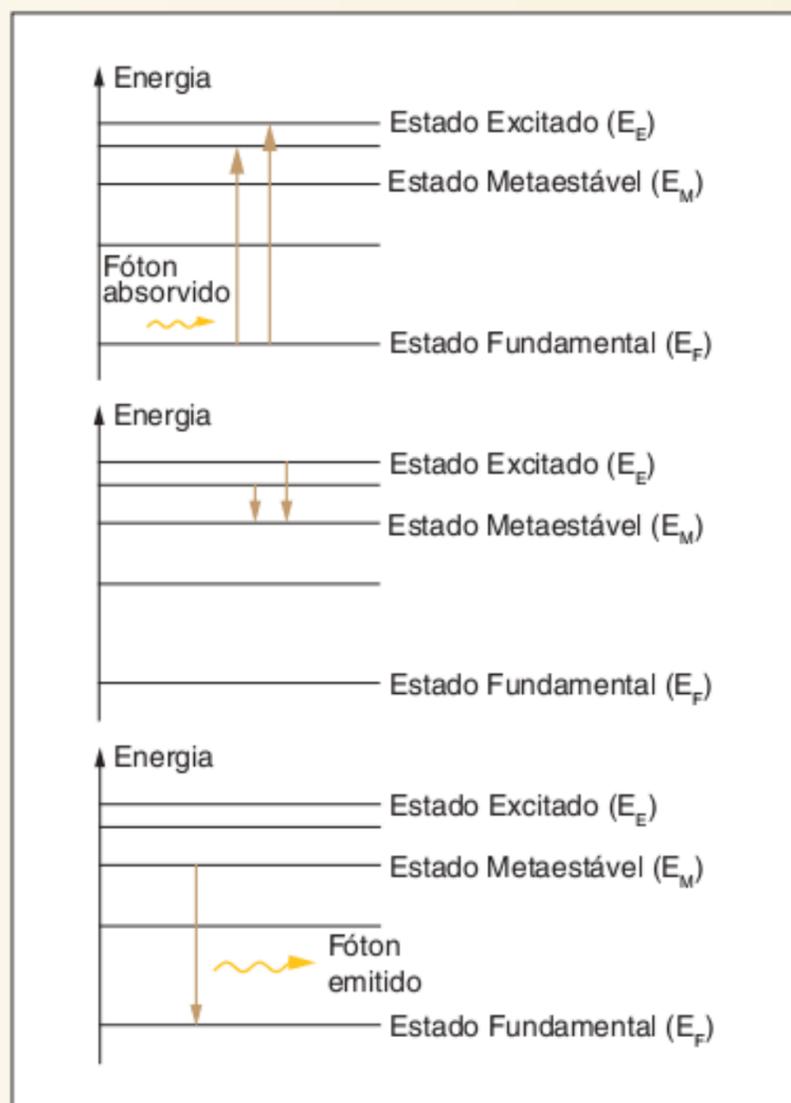
Níveis de energia do átomo para um material metaestável.

1. Bombeamento externo de energia leva elétrons do estado fundamental para um estado excitado no qual eles permanecem pouquíssimo tempo indo para o estado metaestável.



Emissão de um fóton.

2. Ao decaírem do estado excitado para o metaestável, fótons são liberados com uma frequência dada por $f = \frac{E_{\text{excitado}} - E_{\text{metaestável}}}{h}$ e como o bombeamento de energia externa é constante, vários elétrons são levados para o estado metaestável, ocorrendo o que se chama inversão de população, ou seja, muitos elétrons encontram-se no estado metaestável, ao invés de se encontrarem no estado fundamental.



3. Vários átomos no estado metaestável decaem simultaneamente emitindo um feixe de luz com mesma frequência e em fase, os fótons emitidos, sendo refletidos nos espelhos e transmitido parcialmente em um deles, fazem com que outros decaiam,

por causa do fenômeno de que fótons e elétrons tendem a andar juntos.

O *laser* é utilizado em aplicações cirúrgicas, militares e em nossas casas em sistemas de processamento óptico, tais como CDs e DVDs. Cada material utilizado para a produção de *laser* emite em uma única frequência. Esses meios podem ser gasosos (*laser*

de Hélio-Neônio), líquidos ou sólidos (*laser* de diodo semicondutor baseado em silício ou germânio).

O uso do *laser* será cada vez mais frequente em nossas vidas, seja em nossa casa assistindo a filmes com alta qualidade de áudio e vídeo, seja na cadeira de um dentista para a realização de um tratamento odontológico.

RESUMINDO

Neste capítulo estudou-se o átomo de Bohr. No início do século XX, o modelo do átomo de Thomson não era capaz de explicar o espectro de emissão do átomo de hidrogênio nem a radioatividade. Em 1911, Ernest Rutherford, baseando-se na célebre experiência da lâmina de ouro, chegou a um modelo atômico no qual o núcleo, em torno do qual elétrons descreviam um movimento circular, tinha características de partículas carregadas e continha a maior parte da massa atômica. Esse modelo não foi bem aceito, pois, de acordo com a Física clássica, cargas aceleradas deveriam emitir radiação e acabariam por se chocar com o núcleo.

Em 1913, Niels Bohr propôs um modelo atômico a partir do qual foi possível determinar o espectro de emissão de qualquer átomo monoelétrônico. Alguns postulados do modelo de Bohr são:

- I. O elétron não pode estar em qualquer estado de energia, somente em estados estacionários, com energia bem definida.
- II. Nesses estados estacionários, o elétron não emite nem absorve energia. A absorção ou emissão de energia ocorre somente quando o elétron muda de estado.
- III. O elétron executa um movimento circular uniforme em torno do núcleo.
- IV. O momento angular do elétron é quantizado e igual a $n \cdot \frac{h}{2\pi}$.

Com esses postulados, Bohr foi capaz de determinar os níveis de energia do elétron e as frequências possíveis de serem absorvidas ou emitidas.

■ QUER SABER MAIS?



SITES

- Simulador sobre o átomo de Bohr.
www.fisica.ufs.br/CorpoDocente/egsantana/electromagnet/movimiento/bohr/bohr.htm
- Átomo de hidrogênio – simulação.
http://astro.unl.edu/naap/hydrogen/animations/hydrogen_atom.html
- Artigo sobre a descoberta do *laser*.
www.partes.com.br/emquestao/invecaodolaser.asp
- A história do modelo de Bohr.
www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s04.html
- Teoria de Bohr para o átomo de hidrogênio
www.walter-fendt.de/ph14pt/bohrh_pt.htm

Exercícios complementares

O átomo de Bohr

1 Quando um átomo de hidrogênio é bombardeado, seus elétrons são excitados aos seus estados de energia mais altos. Quando ele volta aos níveis de energia mais baixos, luz é emitida. Quais são as três linhas espectrais de maiores comprimentos de onda emitidas pelo átomo de hidrogênio quando o elétron volta dos estados de maior energia para o estado $n = 1$?

2 O comprimento de onda limite da série de Balmer é emitido quando o elétron do átomo de hidrogênio cai de $n = \infty$ para $n = 2$. Qual o comprimento de onda desta linha?

3 Qual é a radiação de maior comprimento de onda capaz de ionizar átomos de hidrogênio não excitados?

4 Os níveis de energia dos átomos de hélio parcialmente ionizados (átomos em que apenas um dos elétrons foi removido) são dados por $E_n = (-54,4 / n^2)$ eV. Construa o diagrama dos níveis de energia deste sistema.

5 O espectro do mercúrio contém uma linha de 435,8 nm no azul. Qual é a diferença entre os níveis de energia do átomo que dá origem a esta linha espectral?

6 Uma certa molécula tem um diagrama dos níveis de energia de sua energia de vibração, em que dos níveis estão distantes 0,0141 eV. Ache o comprimento de onda da linha emitida pela molécula quando ela cai de um desses níveis para o outro.

7 Raios X são emitidos quando elétrons das camadas mais profundas de átomos com muitos elétrons caem a estados de energia mais baixos. Qual é a diferença de energia entre dois níveis se uma transição entre eles dá origem a raios X de 0,5 Å?

8 Um elétron é disparado em um tubo de raios X. Sua energia imediatamente antes de atingir o alvo do tubo é 30 KeV. Se ele perde toda essa energia em uma única colisão com um átomo muito massivo, qual o comprimento de onda do único fóton de raios X que é emitido?

9 A série de Balmer das linhas espectrais é emitida em transições dos níveis mais altos para o nível $n = 2$, no átomo de hidrogênio. Quais são as duas linhas de maiores comprimentos de onda desta série?

10 Utilizando-se do gráfico construído no exercício 4, determine quanta energia é necessária para remover o segundo elétron do átomo? Qual é o comprimento de onda máximo de um fóton incidente capaz de arrancar este elétron do íon?

11 Dê os três maiores comprimentos de onda que átomos de hélio, parcialmente ionizados (em seu estado fundamental), absorverão fortemente.

12 Luz de comprimento de onda de 4.863 Å é emitida por um átomo de hidrogênio.

- a) Qual é a transição do átomo de hidrogênio que é responsável por essa radiação?
- b) A que série pertence essa radiação?

13 Dado que o momento linear do fóton pode ser escrito como $p = h/\lambda$, determine a energia, o momento linear e o comprimento de onda do fóton emitido quando um átomo de hidrogênio sofre uma transição do estado de $n = 3$ para $n = 1$.

14 Encontre a relação entre a velocidade do elétron na órbita estacionária de número quântico n e a velocidade do elétron na órbita fundamental do átomo de hidrogênio?

15 No estado fundamental do átomo de hidrogênio e de acordo com a Teoria de Bohr, quanto vale:

- a) o número quântico.
- b) o raio da órbita.
- c) o momento angular.
- d) o momento linear.
- e) a velocidade angular.

- f) a velocidade tangencial.
- g) a força que age sobre o elétron.
- h) a aceleração do elétron.
- i) a energia cinética.
- j) a energia potencial.
- k) a energia total.

16 UFBA 2011 Quando um feixe luminoso passa através de um prisma, ele se decompõe em um espectro de cores que correspondem às luzes de diversos comprimentos de onda que compõem o feixe.

Um gás monoatômico rarefeito, contido em uma ampola de vidro, é submetido a uma descarga elétrica e produz uma luz que, ao passar através de um prisma, decompõe-se em um espectro de raios coloridas, cujo padrão é característico do gás.

A primeira explicação teórica para esse espectro, com base na teoria atômica, foi dada, em 1913, por Niels Bohr que, partindo do modelo atômico de Rutherford, estabeleceu um conjunto de postulados a partir dos quais era possível explicar, dentre outras coisas, o espectro observado.

Esses postulados estabelecem que os elétrons giram ao redor do núcleo, em órbitas circulares estáveis, nas quais eles podem permanecer sem perder energia; que as órbitas são quantizadas, possuindo, cada uma, um valor discreto de energia, e que o elétron, quando é forçado a mudar de uma órbita para outra, absorve ou libera uma determinada quantidade de energia.

Com base nos postulados de Bohr, explique a produção das linhas espectrais observadas.



Raios espectrais emitidas pelo hidrogênio

17 Udesc 2010 A figura 1 mostra um diagrama com cinco níveis de energia do átomo de hidrogênio. A figura 2 mostra o espectro de emissão do átomo de hidrogênio na faixa do visível e do ultravioleta próximo.

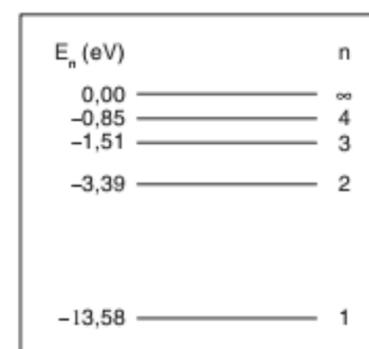


Figura 1

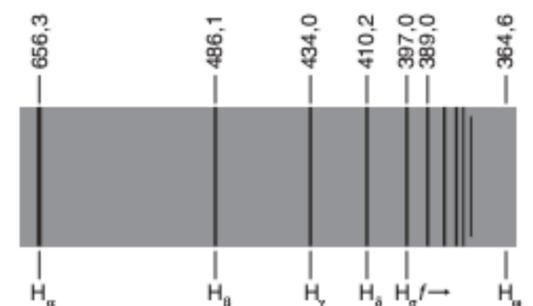


Figura 2

A linha H_α (comprimento de onda de $656,3 \cdot 10^{-9}$ m) do espectro de emissão do átomo de hidrogênio (figura 2) corresponde a uma transição entre os níveis:

- (a) n_2 e n_1
- (b) n_4 e n_2
- (c) n_∞ e n_3
- (d) n_3 e n_2
- (e) n_3 e n_1

18 UFPE 2011 Sobre os modelos atômicos de Thomson, Rutherford e Bohr, podemos fazer as seguintes afirmações.

- A partir do resultado do espalhamento de partículas α por folhas metálicas finas, Rutherford concluiu que a densidade de carga positiva do modelo atômico de Thomson era muito maior que a real.
- A estabilidade do átomo de Bohr era garantida por um postulado, pois, de acordo com a física clássica, um elétron em movimento circular teria perdas de energia por irradiação devido a sua aceleração centrípeta.
- De acordo com o modelo de Rutherford, os elétrons se distribuem em órbitas quantizadas na região ao redor do núcleo denominada eletrosfera.
- A razão entre as energias quantizadas de duas órbitas no modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio é igual a razão entre os números quânticos associados a estas órbitas.
- No modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio, o produto da velocidade do elétron pelo raio da órbita é quantizado.

19 PUC-MG 2006 No modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio, o elétron gira em órbita circular em volta do próton central. Supõe-se que o próton esteja em repouso em um referencial inercial. Essa hipótese da imobilidade do próton pode ser justificada porque o próton tem:

- (a) carga elétrica de sinal oposto à do elétron.
- (b) carga elétrica infinitamente maior que a do elétron.
- (c) massa igual à do elétron.
- (d) massa muito maior que a do elétron.

20 ITA 2003 Utilizando o modelo de Bohr para o átomo, calcule o número aproximado de revoluções efetuadas por um elétron no primeiro estado excitado do átomo de hidrogênio, se o tempo de vida do elétron, nesse estado excitado, é de 10^{-8} s. São dados: o raio da órbita do estado fundamental é de $5,3 \cdot 10^{-11}$ m e a velocidade do elétron nesta órbita é de $2,2 \cdot 10^6$ m/s.

- (a) $1 \cdot 10^6$ revoluções.
- (b) $4 \cdot 10^7$ revoluções.
- (c) $5 \cdot 10^7$ revoluções.
- (d) $8 \cdot 10^6$ revoluções.
- (e) $9 \cdot 10^6$ revoluções.

21 UFRN 2002 Dentre as criações da mente humana, a Física Moderna assegurou um lugar de destaque, constituindo-se em um dos grandes suportes teóricos no processo de criação tecnológica e tendo repercussão cultural na sociedade. Uma análise histórica revela que um dos pilares do desenvolvimento dessa área da Física foi o cientista dinamarquês Niels Bohr, o qual, em 1913, apresentou um modelo atômico que estava em concordância qualitativa com vários dos experimentos associados ao espectro do átomo de hidrogênio. Uma característica de seu modelo é que alguns conceitos clássicos são mantidos, outros rejeitados e, em adição, novos postulados são estabelecidos, apontando, assim, para o surgimento de um novo panorama na Física. No modelo proposto por Bohr para o átomo de hidrogênio, o átomo é formado por um núcleo central e por uma carga negativa (elétron) que se move em órbita circular em torno do núcleo devido à ação de uma força elétrica (força de Coulomb).

O núcleo, parte mais massiva, é constituído pela carga positiva (próton). Esse modelo garante a estabilidade do átomo de hidrogênio e explica parte significativa dos dados experimentais do seu espectro de emissão e absorção. A estrutura de átomo proposta por Niels Bohr apresenta níveis discretos de energia, estando o elétron com movimento restrito a certas órbitas compatíveis com uma regra de quantização do momento angular orbital, L , ($L = n \cdot \frac{h}{2\pi}$, em que n é um número inteiro e h é a constante de Planck).

No entendimento de Bohr, quando o elétron sai de um nível de maior energia para outro menos energético, a diferença de energia é emitida na forma de fótons (partícula cujo momento linear, P , pode ser calculado pela expressão $P = \frac{E}{c}$, em que E é a energia do fóton e c é a velocidade da luz no vácuo). A análise de tal emissão de fótons constitui parte relevante na verificação da confiabilidade do modelo atômico proposto.

Considerando o texto acima como um dos elementos para suas conclusões:

- a) complete a tabela, apresentada a seguir, registrando dois aspectos da Física Clássica que foram mantidos no modelo de Bohr e dois aspectos inovadores que foram introduzidos por Bohr.

Aspectos da Física Clássica mantidos no modelo de Bohr	Aspectos inovadores introduzidos no modelo de Bohr

- b) obtenha uma expressão analítica para a velocidade de recuo, V_r , de um átomo de hidrogênio livre, quando um fóton é emitido por ele após a transição de um elétron do primeiro nível excitado (energia E_1) para o estado fundamental (energia E_0). Expresse o resultado em função de: E_0 , E_1 , c e M_H , em que M_H é a massa do átomo de hidrogênio após a liberação do fóton.

22 UFRGS 2002 Os modelos atômicos anteriores ao modelo de Bohr, baseados em conceitos da física clássica, não explicavam o espectro de raios observado na análise espectroscópica dos elementos químicos. Por exemplo, o espectro visível do átomo de hidrogênio – que possui apenas um elétron – consiste de quatro raios distintas, de frequências bem definidas.

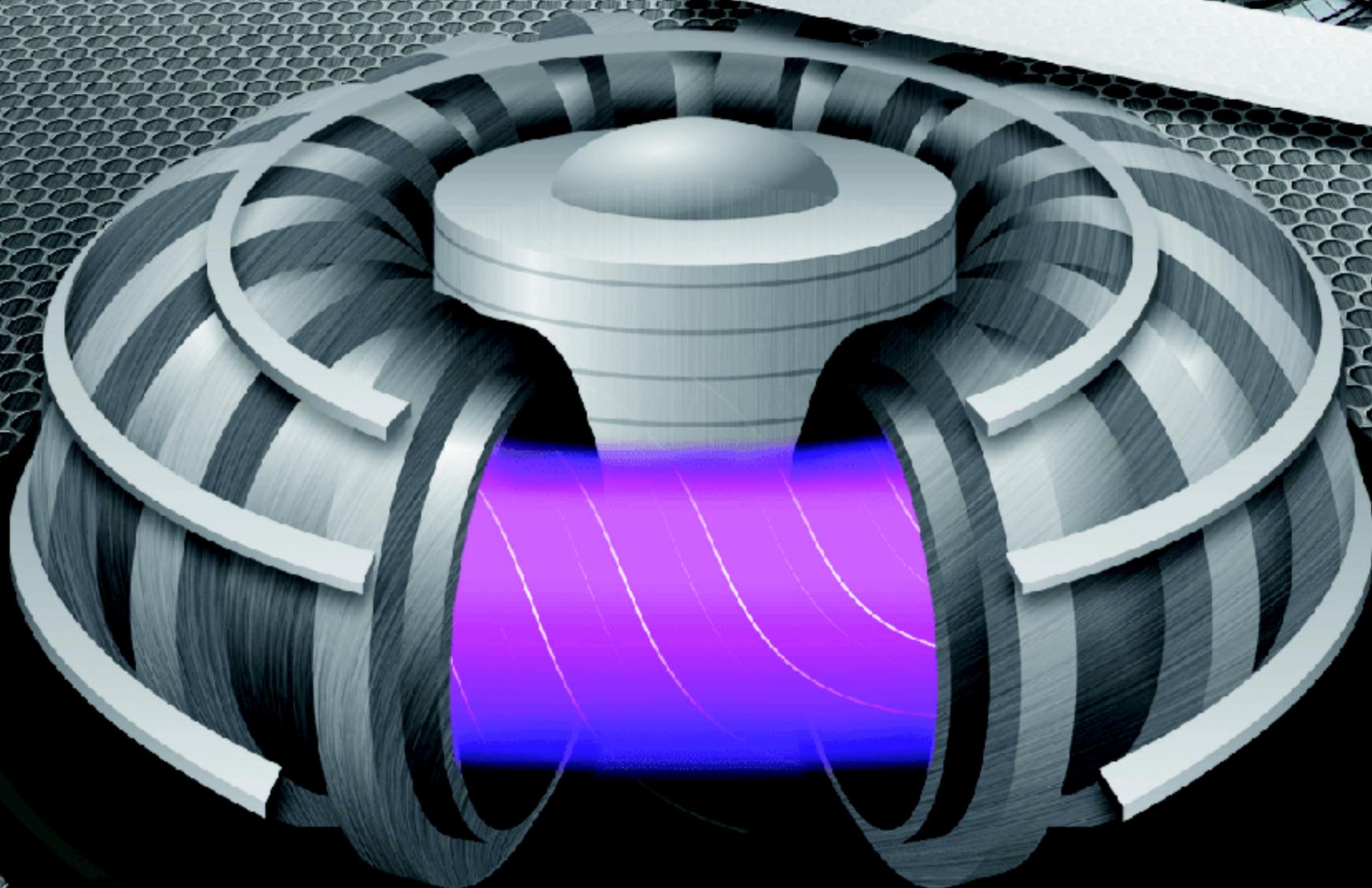
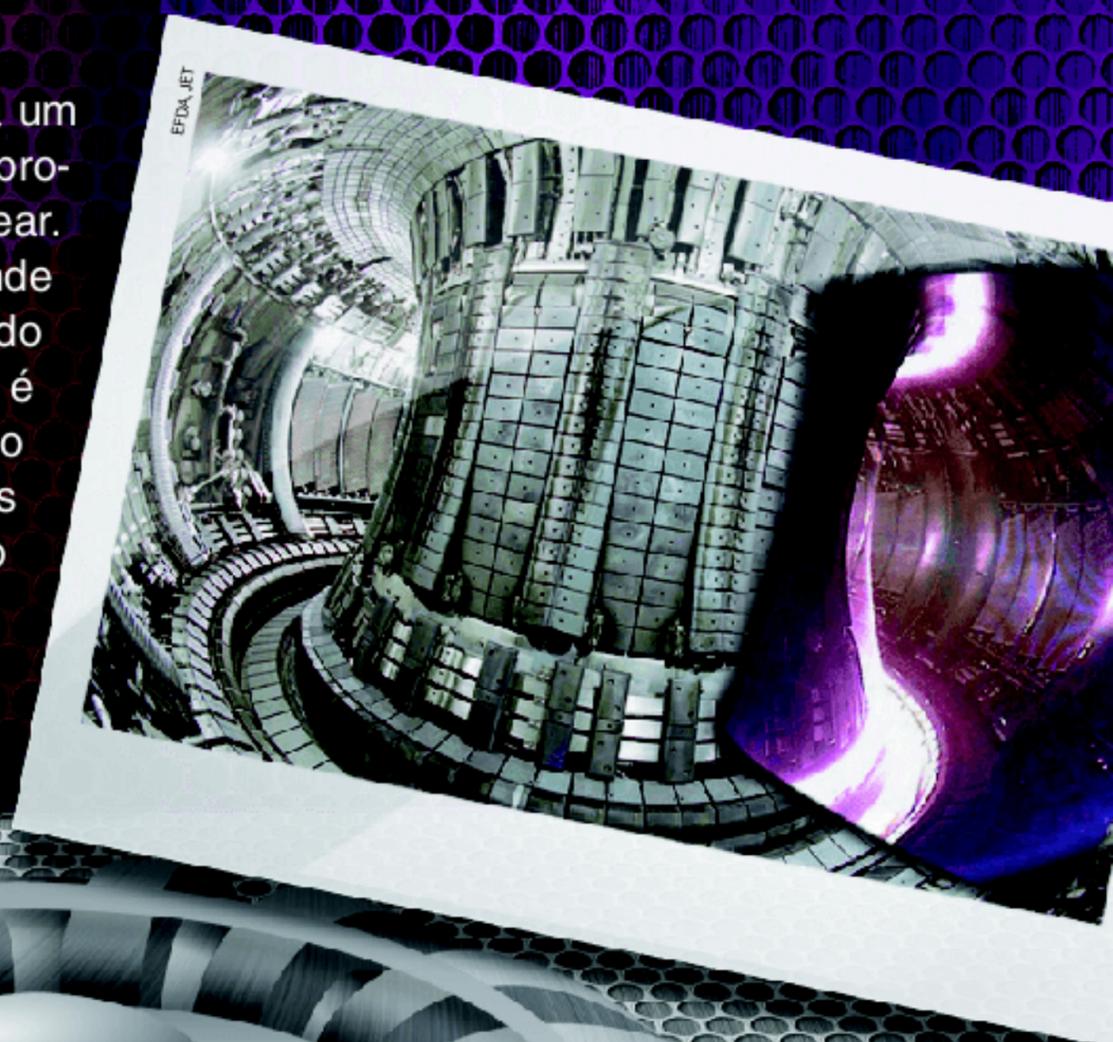
No modelo que Bohr propôs para o átomo de hidrogênio, o espectro de raios de diferentes frequências é explicado:

- (a) pelo caráter contínuo dos níveis de energia do átomo de hidrogênio.
- (b) pelo caráter discreto dos níveis de energia do átomo de hidrogênio.
- (c) pela captura de três outros elétrons pelo átomo de hidrogênio.
- (d) pela presença de quatro isótopos diferentes numa amostra comum de hidrogênio.
- (e) pelo movimento em espiral do elétron em direção ao núcleo do átomo de hidrogênio.

Física nuclear e radioatividade

3

Tokamak é o nome de origem russa para um aparelho de confinamento magnético para a produção controlada de energia por fusão nuclear. Reatores de fusão nuclear são uma grande promessa para o problema energético do mundo no século XXI, pois a reação de fusão nuclear é mais energética por nucleon do que a reação de fissão nuclear e, ao contrário dos reatores de fissão nuclear, os reatores de fusão não geram subprodutos perigosos; Em caso de rompimento do reator, por exemplo, a reação simplesmente se extingue.



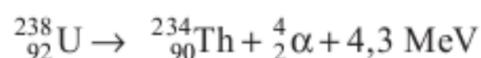
Introdução

Em seu curso de Química, você certamente estudou reações químicas do tipo:



Observe que, à esquerda, temos os reagentes, no caso soda cáustica e ácido clorídrico, e, à direita, os produtos da reação, sal de cozinha e água. É importante notar que apesar de termos compostos químicos diferentes nos reagentes e nos produtos, os elementos químicos são exatamente os mesmos, ou seja, não houve alteração nos núcleos dos átomos que participaram da reação química. O que houve foi uma mudança nas suas eletrosferas e que resultou em uma mudança nas moléculas das quais os átomos fazem parte.

O estudo das reações químicas é um tema muito importante, pois elas fazem parte do nosso dia a dia. Porém, existem reações que causam uma mudança muito mais profunda no átomo, fazendo com que um elemento químico se transforme em outro, através de um processo denominado transmutação. A seguir, um exemplo de transmutação:



Na reação nuclear anterior, o urânio decai para o tório emitindo uma partícula alfa e energia. Esse processo ocorre devido ao fato de, apesar de a maioria dos elementos químicos ser estável, ou seja, não sofrer processo de transmutação espontaneamente, existir em alguns átomos que são instáveis, emitindo partículas oriundas do interior do seu núcleo e, dessa forma, transformando-se em outros elementos químicos.

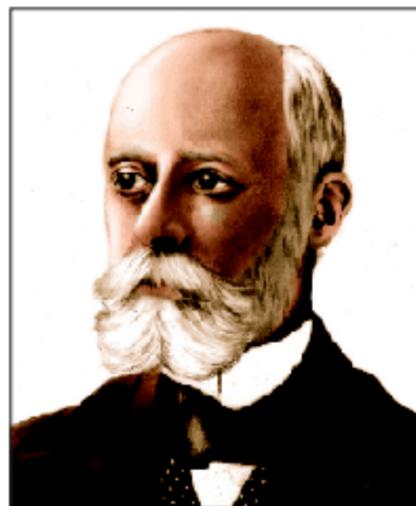


Fig. 1 Henri Becquerel (1852-1908), engenheiro francês, Prêmio Nobel de Física, em 1903, pelo descobrimento da radioatividade natural.

A descoberta da radioatividade deve-se a Henri Becquerel, que estudava a fotoluminescência em sais de urânio. Becquerel imaginava que a emissão observada no sal de urânio, sulfato de potássio e urânio, devia-se ao fato de ele ser exposto ao sol. Porém, em um dia de 1896, Becquerel deixou o sal de urânio em uma gaveta escura, junto a chapas fotográficas que foram posteriormente reveladas, mostrando o contorno do pacote que continha o referido sal. Dessa forma, Becquerel concluiu que a exposição ao sol era desnecessária e que o composto emitia radiação, a qual podia penetrar no grosso papel que envolvia a chapa fotográfica.



Fig. 2 Marie Curie (1867-1934), cientista polonesa que ganhou o Prêmio Nobel de Física, em 1903, pelo seu trabalho em radioatividade e o Prêmio Nobel de Química, em 1911, pela descoberta de dois novos elementos químicos.

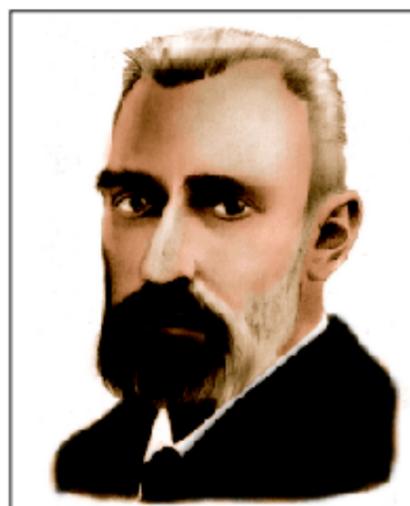


Fig. 3 Pierre Curie (1859-1906), físico francês que ganhou o Prêmio Nobel de Física, em 1903, por suas pesquisas em conjunto com sua esposa, Marie Curie, sobre o fenômeno da radiação descoberto pelo professor Henri Becquerel.

O nome “radioatividade” deve-se a Marie Curie, que, juntamente com o seu marido, descobriu o elemento rádio e um elemento 400 vezes mais radioativo que o urânio: o polônio. O motivo pelo qual a emissão de radiação acontecia ainda era desconhecido, bem como sua relação com o núcleo atômico. A radioatividade revolucionou a maneira de pensar sobre a estrutura atômica.

Radiações alfa, beta e gama



Fig. 4 Ernest Rutherford (1871-1937), físico e químico neozelandês, ganhou o Prêmio Nobel de Química em 1908, por suas investigações sobre a desintegração dos elementos e propriedades de substâncias radioativas.

Na época da descoberta da radioatividade, os raios emitidos eram denominados “raios de Becquerel”. No Cavendish Laboratory, em Cambridge, Ernest Rutherford estudou dois tipos de radiação, os quais denominou alfa e beta. Em 1908, Rutherford afirmou que as partículas alfa eram núcleos do átomo de hélio, possuindo assim dois prótons e dois nêutrons, sendo representadas por ${}^4_2\alpha$.

A figura a seguir ilustra a emissão de partículas alfa por um núcleo de plutônio.

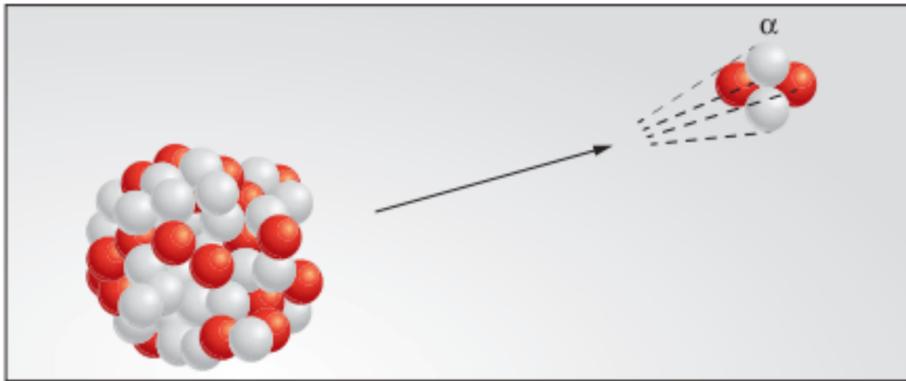
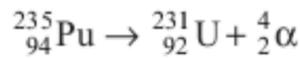


Fig. 5 Emissão de partícula α .



Em outros laboratórios da Europa, chegou-se à conclusão, no início do século XX, de que as partículas beta eram elétrons, representadas por β^- . Hoje sabe-se que as partículas beta são elétrons ou pósitrons de alta energia.

A figura a seguir ilustra a emissão de partículas beta por um núcleo instável. Observe na figura que as partículas beta podem ser positivas, denominadas pósitrons, ou negativas, elétrons.

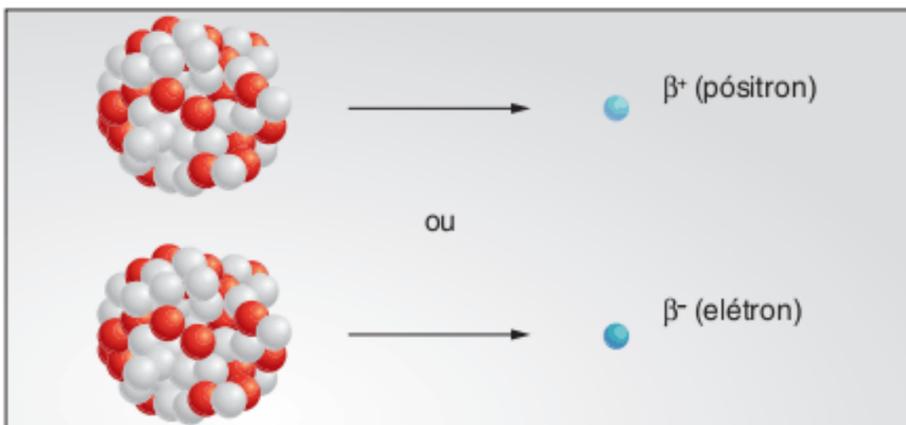


Fig. 6 Emissão de partículas β .

Em 1900, P. Villard, estudando as emissões do átomo de rádio, reportou à comunidade científica a existência de raios extremamente penetrantes. Esses raios não eram defletidos por campos magnéticos, sugerindo que eram ondas eletromagnéticas de frequência mais elevada do que os raios X. Essa radiação recebeu o nome de raios gama, representados pela letra grega γ .

A figura a seguir ilustra o processo de decaimento radioativo, quando um núcleo instável se transmuta em outro elemento químico, liberando partículas radioativas.

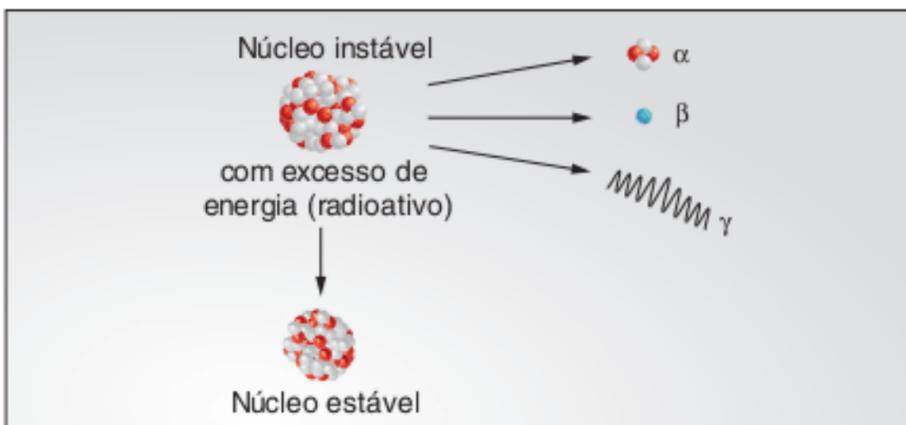


Fig. 7 Processo de decaimento radioativo.

Partículas liberadas no processo de decaimento radioativo podem ser extremamente prejudiciais à saúde, embora compostos radioativos sejam utilizados no tratamento de várias doenças, bem como no diagnóstico de outras.

A radiação gama é extremamente penetrante e pode ser absorvida mesmo após passar por vários metros de concreto ou até

mesmo alguns centímetros de chumbo. Esse tipo de radiação pode penetrar vários centímetros nos tecidos e pode alcançar energia suficiente para atravessar o corpo humano, sendo potencial causadora de câncer por gerar danos pela ionização das moléculas que estão em sua trajetória. Anos após a explosão da bomba atômica no Japão, em 1945, ainda eram vários os casos de sobreviventes acometidos de câncer em virtude da exposição à radiação.

As partículas beta têm um poder de penetração menor, sendo totalmente bloqueadas por uma folha de alumínio de alguns milímetros de espessura; podem penetrar até 2 cm no corpo humano antes que as interações eletrostáticas com os elétrons e os núcleos das moléculas interrompam seu curso.

As partículas alfa, bem mais pesadas, têm poder de penetração menor ainda, mas, em compensação, são muito mais ionizantes (até 1.000 vezes mais do que partículas beta) e podem ser letais se inaladas ou ingeridas.

No processo de decaimento radioativo, duas grandezas são de suma importância, a atividade (A) e o tempo de meia-vida (T_f).

A atividade (A) de uma amostra de um elemento ou composto radioativo é igual ao número de desintegrações por unidade de tempo. A unidade utilizada no SI (Sistema Internacional de Unidades) é o **becquerel (Bq)**, porém, utiliza-se muito o **curie (Ci)**, que corresponde ao número de desintegrações iniciais do átomo de rádio purificado em um segundo, igual a $3,7 \cdot 10^{10}$ desintegrações. Assim:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Através de observação experimental, verificou-se que a atividade tem decaimento exponencial e pode ser escrita matematicamente como:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Na equação, A_0 é a atividade inicial, t é o tempo e λ é a chamada constante de desintegração, que representa fisicamente a probabilidade de desintegração do núcleo instável por unidade de tempo.

A curva de decaimento radioativo do rádio-226 pode ser observada na figura a seguir. Observa-se que a atividade radioativa diminui com o tempo.

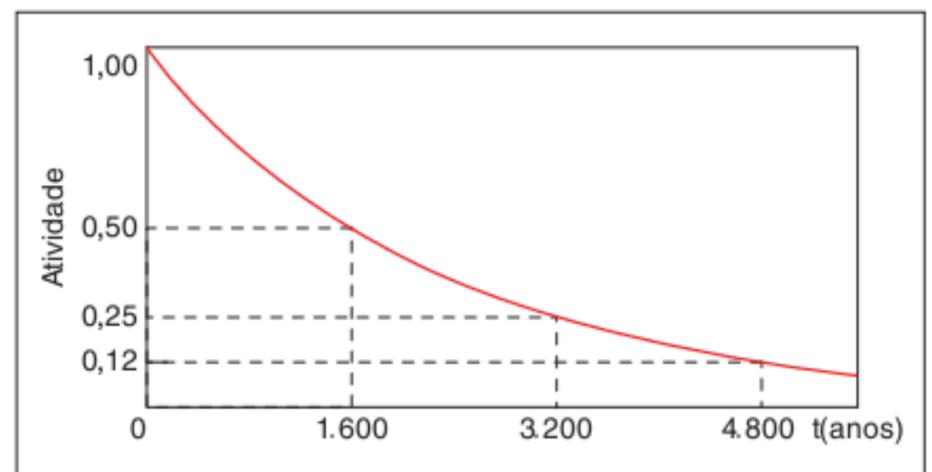


Fig. 8 Curva de desintegração do rádio-226.

É importante ressaltar que o decaimento radioativo tem característica estatística; não se sabe exatamente quando ocorrerá, porém, sabe-se que dentro de certo período de tempo há a probabilidade de que um número de decaimentos ocorra. Como explicado anteriormente, é a constante λ que relaciona essa probabilidade com o decaimento.

O tempo de meia-vida (t_f) corresponde ao tempo necessário para que metade de uma amostra de um elemento ou composto radioativo sofra desintegração. O átomo de carbono-14, por exemplo, tem um tempo de meia-vida de 5.730 anos. Isso significa que em 5.730 anos uma amostra de carbono-14 decai à metade. Decorridos um múltiplo n de meias-vidas, a quantidade de carbono-14, indicada pela letra N , é dada por:

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$

Onde N_0 é a quantidade inicial da amostra.

O número de átomos da amostra que se desintegram por unidade de tempo é proporcional à atividade, tal que:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Decorrido um tempo de meia-vida ($n = 1$), a quantidade da amostra cai pela metade, logo:

$$N = \frac{N_0}{2} \Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t_f} \Rightarrow e^{\lambda t_f} = 2$$

Aplicando o logaritmo natural em ambos os lados, tem-se:

$$\lambda \cdot t_f = \ln 2$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_f} = \frac{0,693}{t_f}$$

O átomo

Desde o início do século XIX, quando John Dalton retomou, após séculos de esquecimento, a teoria dos atomistas gregos, o átomo não foi de fato uma unanimidade. Com as novas descobertas oriundas dessa teoria, as dúvidas sobre a sua existência foram se dissipando. No início do século XIX, quando John Dalton retomou a teoria dos atomistas gregos, suas ideias não tiveram aceitação imediata, as dúvidas sobre a existência do átomo persistiam e só foram se dissipando com as novas descobertas oriundas da teoria de Dalton. No entanto, a natureza elétrica da matéria não era explicada por aquela teoria do átomo, que, pelo próprio nome, pensava-se ser indivisível.

J. J. Thomson propôs, no final do século XIX, que o elétron, descoberto por ele próprio, era um fragmento do próprio átomo. Thomson foi capaz de determinar a relação carga-massa do elétron e percebeu que ela era cerca de 1.000 vezes maior do que a mesma relação para o hidrogênio. Atualmente, o valor aceito para a relação carga-massa do elétron é dado por:

$$\frac{e}{m_e} \cong 1,7588 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Porém, como pode-se perceber da expressão anteriormente dada, não é possível determinar nem a carga do elétron nem a sua massa, somente a relação entre elas. Em 1909, foi determinada pela primeira vez com elevada precisão a carga do elétron, com o famoso experimento das gotas de óleo de Millikan. O valor encontrado por Millikan foi de $1,592 \cdot 10^{-19} C$, bem próximo do valor atual igual a:

$$e \cong 1,60218 \cdot 10^{-19} C$$

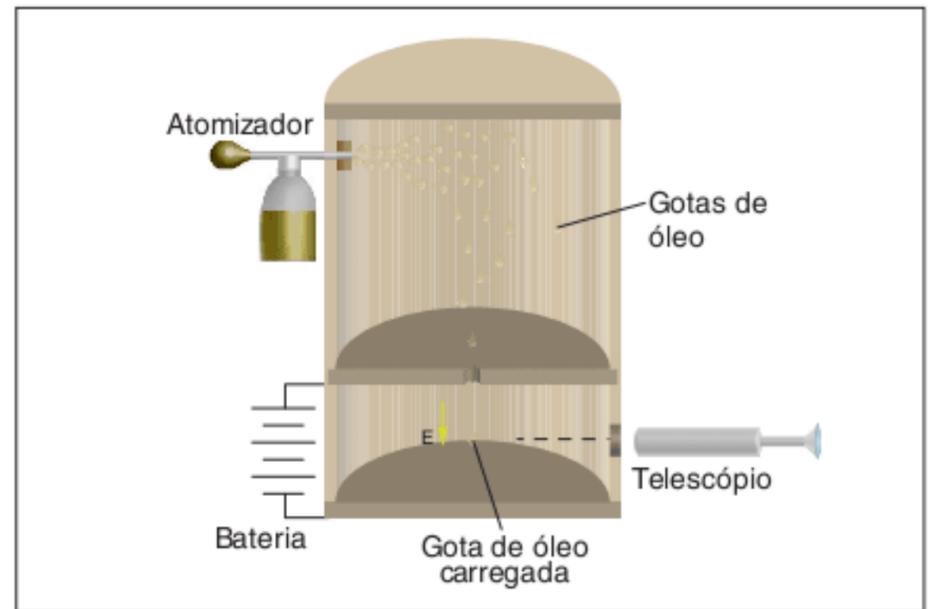


Fig. 9 Experimento de Millikan.

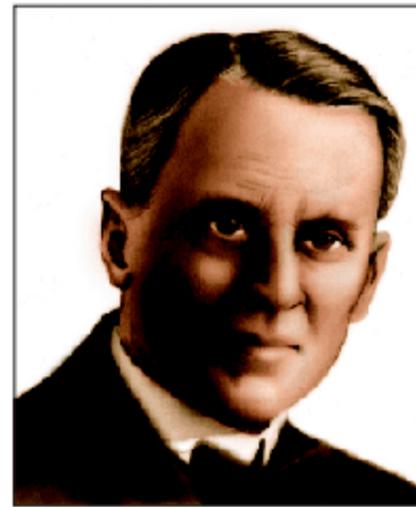


Fig. 10 Robert Andrews Millikan (1868-1953), físico estadunidense que determinou a carga elementar. Recebeu o Prêmio Nobel de Física, em 1923, por seu trabalho sobre a carga elétrica elementar e sobre o efeito fotoelétrico.

Sabendo-se a relação carga-massa do elétron e conhecendo-se a sua carga elétrica, foi possível então determinar a massa do elétron. Esses experimentos e seus resultados foram grandes conquistas científicas. O homem começava a desvendar os segredos do mundo quântico, da natureza íntima da matéria.

Após a descoberta do elétron, Thomson propôs um modelo de átomo denominado “pudim de passas”. Nesse modelo, os elétrons eram como passas, colocadas em um pudim carregado positivamente.

Esse modelo foi amplamente aceito até que Rutherford, por meio de experimentos com partículas alfa, demonstrou que o átomo era constituído por um pequeno núcleo positivo, onde se concentra praticamente toda a massa do átomo, cercado por elétrons negativos.

Rutherford concluiu pelos seus experimentos que o núcleo era cerca de 10 mil vezes menor que o átomo.

A figura a seguir ilustra a célebre experiência de Rutherford.

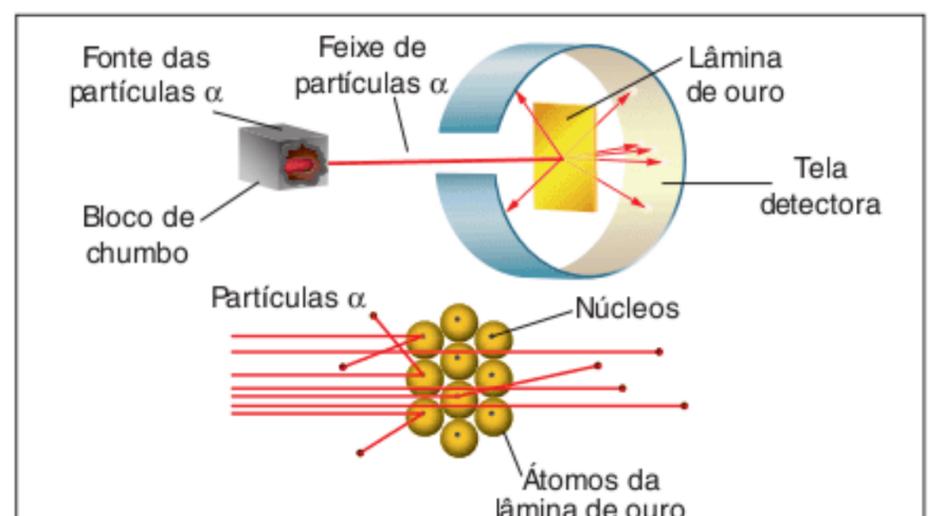
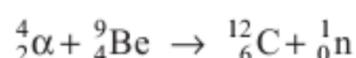


Fig. 11 Experimento de Rutherford.

O modelo do átomo de Rutherford apresentava problemas de estabilidade, problemas em explicar o espectro atômico e dificuldades na compreensão da tabela periódica do ponto de vista de estrutura atômica. Como visto no capítulo anterior, Bohr explicou satisfatoriamente esses problemas para átomos monoelétrônicos.

Inicialmente, pensou-se que havia somente a necessidade de partículas positivas no núcleo, denominadas prótons, e partículas negativas em volta dele, denominados elétrons, para que houvesse a neutralidade elétrica e a estabilidade da matéria. Contudo, o que se observou, em medidas posteriores, foi que o número de massa, que atualmente sabemos ser a soma do número de prótons com o número de nêutrons e que é, em última instância, a massa do núcleo, não era igual ao número atômico (número de prótons). Rutherford propôs que havia no núcleo uma partícula neutra, a qual ele denominou nêutron. Começava uma caçada à partícula prevista por Rutherford, que se encerrou em 1932, quando o berílio foi bombardeado com partículas alfa, conforme a reação nuclear a seguir:



Essa equação nos diz que, ao absorver uma partícula alfa, o berílio se transforma em carbono e emite um nêutron.

Os átomos e seus isótopos

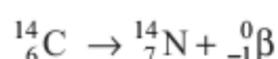
Apesar de todos os átomos de um mesmo elemento químico possuírem o mesmo número de prótons, é fato que esse mesmo elemento químico pode possuir diferentes números de massa, ou seja, o número de prótons é o mesmo, mas o número de nêutrons é diferente. Os diferentes átomos do mesmo elemento químico recebem o nome de isótopos.

Observe, por exemplo, o cloro, cuja massa atômica é de 35,5 g. O que isso significa? Para responder a essa pergunta, há a necessidade de conhecermos o elemento químico cloro e qual o método de determinação da massa atômica. O cloro ocorre na natureza com dois isótopos principais, o cloro cuja massa atômica é de 35 g e o cloro cuja massa atômica é de 37 g. A ocorrência desses dois isótopos é na proporção de 3:1 aproximadamente. Logo, a massa atômica é a média aritmética ponderada dos isótopos existentes na natureza, tal que:

$$M_{\text{Cl}} \approx \frac{0,75 \cdot 35 + 0,25 \cdot 37}{1} = 35,5 \text{ g}$$

Alguns isótopos são mais estáveis do que outros, alguns são radioativos, outros não. Um outro exemplo importante é o hidrogênio ${}^1_1\text{H}$ (1 próton e 0 nêutron) e seus dois isótopos, o deutério ${}^2_1\text{H}$ (D) (1 próton e 1 nêutron) e o trítio ${}^3_1\text{H}$ (T) (1 próton e 2 nêutrons). O deutério é parte da composição da água pesada, utilizada em reatores nucleares para o controle do processo de fissão nuclear.

Um interessante exemplo, utilizado na Arqueologia, na datação de resíduos orgânicos é o do carbono-14. O carbono-14 (${}^{14}_6\text{C}$) é um isótopo instável do carbono-12 (${}^{12}_6\text{C}$), com um tempo de meia-vida de 5.730 anos e que apresenta o seguinte decaimento radioativo:



As proporções de carbono-14 na natureza são ínfimas, porém detectáveis por instrumentos adequados. Enquanto vivos, todos os seres estão sujeitos a um fluxo constante de carbono que mantém a taxa de carbono-14 praticamente constante. Ao morrer, cessa-se o fluxo de carbono e, portanto, o decaimento do carbono-14 faz com que a sua proporção na amostra diminua. Sabendo-se a porcentagem de carbono-14 em um ser vivo e na amostra arqueológica, é possível estimar a idade do achado arqueológico. Radioisótopos são isótopos radioativos tais como o carbono-14 e são usados na biologia para obtenção de mapeamentos de diversos órgãos e como traçadores em caminhos do metabolismo e na química para acompanhar mecanismos de reações.

Raios X e radiações ionizantes

No final do século XIX, Wilhelm Conrad Roentgen percebeu que elétrons em alta velocidade emitiam radiação de alta frequência quando bruscamente desacelerados. Essa radiação está em uma faixa de frequência fora do visível e é capaz de sensibilizar chapas fotográficas, sendo hoje largamente aplicada em exames médicos.

Porém, os raios X se enquadram em uma perigosa classificação das radiações: as radiações ionizantes. Essas radiações têm a capacidade de ionizar o meio pelo qual passam, podendo danificar tecidos e causar câncer. Portanto, ao se manusear equipamentos de raios X, devem ser observados vários cuidados. As pessoas que lidam diariamente com esses equipamentos possuem várias leis trabalhistas específicas para protegê-las dos danos das radiações ionizantes.

As radiações gama (γ) também são radiações ionizantes e apresentam um grau de periculosidade muito maior do que os raios X. Vários cientistas morreram no início das pesquisas sobre radioatividade por desconhecerem os seus efeitos nocivos. Apesar disso, a radiação gama também pode ser utilizada no tratamento de alguns tipos de câncer. A técnica denominada radioterapia utiliza-se do fato de as células saudáveis recuperem-se mais facilmente à incidência de radiação gama do que as células cancerosas. Assim, as células doentes são mortas pela radiação. Nessa aplicação, são utilizados principalmente o césio-137 e o cobalto-60.

Em alguns níveis de potência, as radiações na frequência de micro-ondas têm potencial ionizante, por esse motivo não se deve ficar exposto a radiações de radares. Há uma controvérsia muito grande sobre o risco de telefones celulares. Apesar de a radiação emitida por eles não ser ionizante, muitas pesquisas vêm sendo feitas sobre o impacto do uso constante de telefones celulares na saúde das pessoas.

Fissão nuclear e Fusão nuclear

Além das forças gravitacional e elétrica, existem mais duas forças fundamentais na natureza: as forças nucleares forte e fraca. Essas forças ocorrem entre os núcleons (prótons e nêutrons) do núcleo do átomo.

A força nuclear forte é responsável pela estabilidade nuclear, pois como as distâncias são extremamente pequenas dentro do núcleo, a repulsão coulombiana entre os prótons é enorme. Como as forças envolvidas no núcleo são muito intensas, a energia liberada em reações envolvendo o núcleo é enorme, sendo de uma grandeza superior à envolvida em reações químicas comuns.

Como regra geral, pode-se afirmar que um núcleo é estável quando o número de nêutrons é aproximadamente igual ao número de prótons. Se há poucos nêutrons, os prótons ficam muito próximos, aumentando a repulsão eletromagnética. Se houver muitos nêutrons, os prótons ficarão mais afastados, diminuindo a ação da força nuclear forte, que age somente a pequenas distâncias, e dessa forma desestabilizando o núcleo.

Dá-se o nome de **fissão nuclear** ao processo de decaimento radioativo, no qual um núcleo instável se transmuta em outros núcleos mais estáveis ao ser atingido por um nêutron, liberando grande quantidade de energia. Nesse processo, outros nêutrons são gerados, bem como o chamado lixo radioativo, pois os novos núcleos gerados no processo também podem ser radioativos.

Dá-se o nome de **fusão nuclear** quando dois ou mais núcleos fundem-se, formando um núcleo mais estável. Nesse processo, não há a produção de lixo radioativo e a quantidade de energia liberada é bem maior que no processo de fissão nuclear. Porém, as condições para se realizar a fusão nuclear são bem mais exigentes do que as da fissão nuclear.

Nesses processos, diferentemente do que acontece nas reações químicas, observa-se que a massa não se conserva, ou seja, a massa antes dos processos de fissão e fusão nucleares é menor do que a massa depois deles ocorrerem. Isso é explicado pela relação de Einstein:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Através da equação acima, observa-se a relação entre a massa e a energia. Conclui-se que a massa perdida converte-se em energia em uma relação muito maior do que para qualquer reação química. Por exemplo, um grama de massa perdida converte-se em $9 \cdot 10^{13}$ J, energia suficiente para derreter aproximadamente 270 mil toneladas de gelo a 0°C .

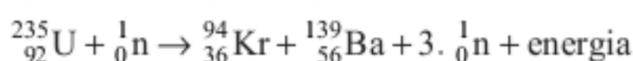
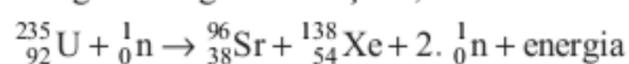
Na tabela a seguir, tem-se a relação de massa e energia para os principais constituintes do átomo. A massa é dada em unidades de massa atômica (uma) e a energia, em milhões de elétrons volt (MeV).

Partícula	Massa(uma)	Energia(MeV)
Próton	1,007276	938,3
Nêutron	1,008665	939,6
Elétron	0,000548	0,511

Tab. 1 Massa e energia associada de algumas partículas atômicas. $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $1 \text{ uma} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Fissão Nuclear

O processo de fissão nuclear é o processo atualmente utilizado em usinas nucleares para produção de energia. Nesse processo, o urânio-235 é bombardeado com um nêutron, transmutando-se segundo algumas reações, como:



Dessa forma, os novos nêutrons gerados vão colidindo com outros átomos de urânio-235, produzindo uma reação em cadeia, que pode ser controlada em um reator nuclear. Se essa reação não é controlada, tem-se a bomba atômica. O esquema de um reator nuclear é visto na figura a seguir.

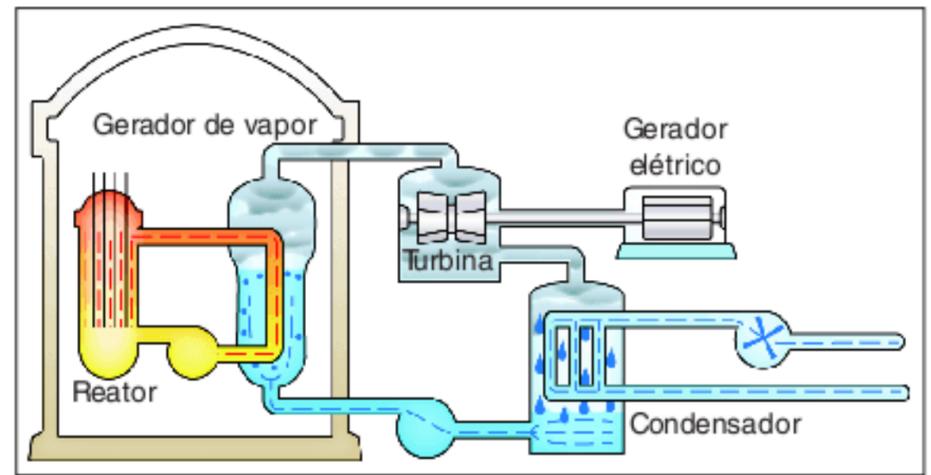


Fig. 12 Reator de fissão nuclear.

No reator, estão as barras de combustível, o urânio-235.

Observação: Na natureza, o isótopo de urânio mais comum é o urânio-238, que não pode ser usado diretamente como combustível nuclear.

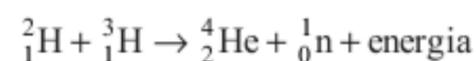
Em uma amostra de urânio natural, a concentração do urânio-235 é em torno de 0,7%. Dessa forma, é necessário aumentar a concentração de urânio-235, processo este denominado “enriquecimento de urânio”, tecnologia já disponível no Brasil.

Dentro do reator encontramos barras de grafite, as quais moderam a reação, evitando que todos os nêutrons colidam com novos núcleos de urânio-235, e água, utilizada como refrigerante. O calor produzido gera vapor, que passa, então, por turbinas que fornecem a energia elétrica necessária. Há a necessidade de um estrito controle de pressão a fim de que não haja falhas no reator, o que pode provocar vazamentos com consequências desastrosas.

Fusão nuclear

Processo mais energético que a fissão nuclear, porém mais difícil de ser produzido de forma estável. Isso porque necessita de grandes quantidades iniciais de energia para a sua realização, pois, como as forças nucleares agem a pequenas distâncias, para que os núcleos possam se fundir, eles devem vencer as intensas forças elétricas de repulsão.

É exatamente esse tipo de reação que ocorre no Sol, fato demonstrado em 1938, pelo cientista Hans Albrecht Bethe. O Sol, formado basicamente de hélio e hidrogênio, apresenta em seu núcleo uma temperatura da ordem de 15 milhões de graus Celsius, condição suficiente para produzir a reação de fusão na qual átomos de hidrogênio fundem-se para formar átomos de hélio. De forma simplificada, tem-se:



Calculando-se a energia liberada por núcleon, ou seja, a quantidade de energia liberada pela soma de prótons e nêutrons envolvidos na reação, tem-se que a energia liberada na fusão nuclear é cerca de quatro vezes maior do que a energia liberada na fissão nuclear.

Como afirmado anteriormente, a energia necessária para a realização dessas reações é extremamente elevada. Para se ter uma ideia, para se detonar uma bomba de hidrogênio, que é uma bomba de fusão nuclear, é necessário detonar, inicialmente, uma bomba atômica para gerar a energia suficiente para a explosão da

bomba de H. Atualmente, o homem ainda não consegue utilizar a fusão nuclear para a produção de energia. Isso seria muito interessante, tendo em vista que a fusão nuclear não gera lixo radioativo.

Muitos cientistas têm tentado desenvolver sistemas eficientes que consigam promover a fusão controlada de átomos leves. Os reatores nucleares de fusão serão os sistemas mais limpos para a geração de energia elétrica, já que não produzirão lixo nuclear.

A física do processo de produção de energia por fusão nuclear é bastante complexa; devido às altas temperaturas, tem-se a formação de plasma, no qual há íons e elétrons livres. Algumas exigências devem ser observadas para que o reator possa funcionar corretamente, como elevada densidade das partículas envolvidas na reação, elevada temperatura do plasma e tempo de confinamento das partículas dilatado. Isto constitui um problema, pois não há como um recipiente manter a temperatura de milhões de graus celsius e com elevada densidade das partículas por muito tempo.

Os russos conseguiram desenvolver um reator de fusão chamado *tokamak*, que ainda gasta mais energia do que gera, porém é uma esperança para a produção de energia por fusão nuclear. Essa máquina, com um conjunto de ímãs, é capaz de confinar as partículas do plasma quente, por meio de campos magnéticos, sustentando assim uma reação de fusão nuclear controlada.

Os *tokamaks* foram concebidos ainda na década de 1950. O primeiro reator experimental de fissão foi criado em 1945 e vinte anos depois começaram a surgir as usinas comerciais. A primeira produção controlada de energia por fusão foi conseguida somente em 1991, cerca de 40 anos depois do início da concepção dos *tokamaks*, pelo maior e mais importante *tokamak* em operação, o do laboratório de pesquisas JET (Joint European

Torus), em Abingdon, Inglaterra. A potência conseguida pelo *tokamak* inglês foi de 1,7 MW durante 2 s. Essa experiência mostrou que o processo de fusão nuclear controlado era possível.

A fusão nuclear apresenta também a vantagem do controle. Não se consegue manter uma reação de fusão sem as três exigências anteriores, sendo portanto impossível que ela saia do controle e ocasione acidentes nucleares.

Na figura a seguir observa-se o esquema de um *tokamak*.

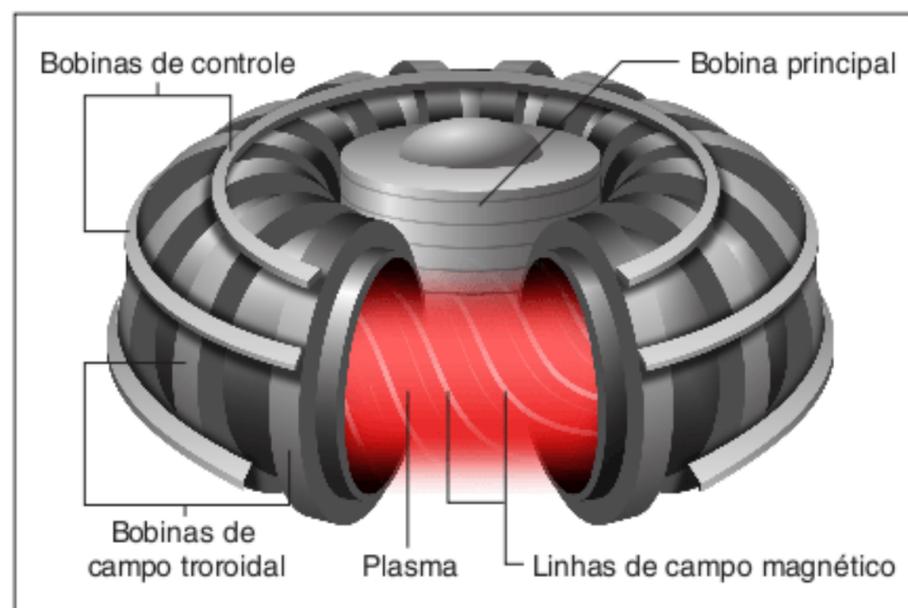


Fig. 13 Esquema de um *tokamak*.

No Brasil também existem grupos de pesquisas que estudam a produção de energia através da reação de fusão nuclear que ocorre no interior do Tokamak. Existem atualmente no país pelo menos onze Tokamak de pequeno porte encontrados no departamento de Física da USP e Unicamp e no laboratório Associado de Plasma no INPE, em São José dos Campos.

Revisando

1 UFRGS (Adapt.) As seguintes afirmações sobre a estrutura do átomo são verdadeiras ou falsas? Justifique.

- I. A energia de um elétron ligado a um átomo não pode assumir qualquer valor.
- II. Para separar um elétron de um átomo é necessária uma energia bem maior do que para arrancar um próton do núcleo.
- III. O volume do núcleo de um átomo é aproximadamente igual à metade do volume do átomo todo.

2 UFRGS Partículas alfa, partículas beta e raios gama podem ser emitidos por átomos radioativos. As partículas alfa são íons de hélio carregados positivamente. As partículas beta são elétrons. Os raios gama são ondas eletromagnéticas de frequência muito alta. Na desintegração de ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ resultando na formação de um núcleo ${}^{222}_{86}\text{Ra}$, pode-se inferir que houve a emissão de quais partículas?

Exercícios propostos

Física nuclear

1 UFRGS Considere as duas colunas a seguir, colocando no espaço indicado o número enunciado da primeira coluna que mais relação tem com o da segunda coluna.

- Existência do núcleo atômico.
- Determinação da carga dos elétrons.
- Caráter corpuscular da luz.
- Caráter ondulatório das partículas.

- Hipótese de De Broglie
 Efeito fotoelétrico
 Experimento de Millikan
 Experimento de Rutherford

A relação numérica correta, de cima para baixo, na coluna da direita, que estabelece a associação proposta, é:

- (a) 4; 3; 2; 1
(b) 1; 3; 2; 4
(c) 4; 2; 3; 1
(d) 4; 3; 1; 2
(e) 4; 1; 2; 3

2 UFRGS Considere as seguintes afirmações sobre a estrutura nuclear do átomo.

- O núcleo de um átomo qualquer tem sempre carga elétrica positiva.
- A massa do núcleo de um átomo é aproximadamente igual à metade da massa de todo o átomo.
- Na desintegração de um núcleo radioativo, ele altera sua estrutura para alcançar uma configuração mais estável.

quais são corretas?

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

3 UFRGS Num reator, núcleos de U^{235} capturam nêutrons e então sofrem um processo de fragmentação em núcleos mais leves, liberando energia e emitindo nêutrons.

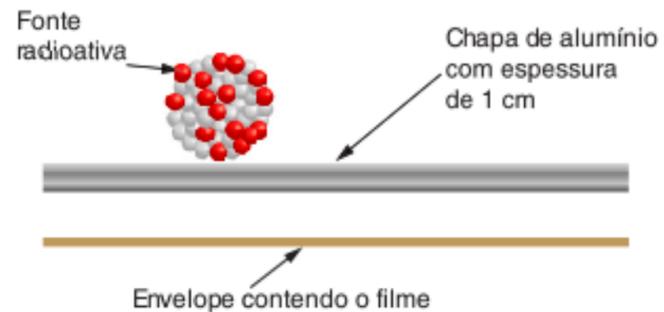
Este processo é conhecido como:

- (a) fusão.
(b) fissão.
(c) espalhamento.
(d) reação termonuclear.
(e) aniquilação.

4 UFRGS Em 1989, os noticiários destacaram por um certo período a realização de pesquisas sobre maneiras alternativas de obter a fusão nuclear. Tais alternativas, contudo, não se confirmaram. O que se sabe comprovadamente hoje é o que já se sabia até aquela época: A fusão nuclear é obtida a temperaturas tão altas quanto as existentes _____ e, ao contrário da fissão nuclear utilizada nas centrais nucleares, _____ dejetos nucleares.

- (a) na superfície da Terra; produz
(b) na superfície da Lua; produz
(c) na superfície da Lua; não produz
(d) no centro do Sol; não produz
(e) no centro do Sol; produz

5 Faap Numa mesma experiência, um filme fotográfico dentro de um envelope escuro foi manchado pela radiação emitida por uma fonte separada no mesmo por uma chapa de alumínio (figura a seguir).



Podemos afirmar que:

- o filme recebeu grande quantidade de radiações α , β e γ devido à grande proximidade com a fonte radioativa.
- como a chapa de alumínio é suficiente para segurar as radiações α e β , o filme recebeu radiação γ , que possui maior poder de penetração.
- como a chapa de alumínio é suficiente para segurar a radiação γ , o filme recebeu radiações α e β , que possuem maior poder de penetração.

Dessas afirmativas, somente:

- (a) I é verdadeira. (d) I e II são verdadeiras.
(b) II é verdadeira. (e) II e III são verdadeiras.
(c) III é verdadeira.

6 UFU Leia atentamente o seguinte texto e responda à questão proposta.

Quando o físico francês Antoine Henri Becquerel (1852-1908) descobriu, em 1896, que o urânio emitia espontaneamente uma radiação que ele denominou "raios urânicos", seguiu-se uma grande revolução no conhecimento científico. Sua descoberta contribuiu para a hipótese de que o átomo não era o constituinte último da matéria e abriu caminho para a área da Física nuclear. O próprio Becquerel identificou que os "raios urânicos" eram constituídos de três partículas distintas. Mais tarde, estas partes foram denominadas radiação alfa (núcleo do átomo de hélio), radiação beta (elétrons altamente energéticos) e radiação gama (de natureza eletromagnética). Marie Curie (1867-1934) e seu marido Pierre Curie (1859-1906) verificaram esse mesmo fenômeno em dois novos elementos, rádio e polônio, por eles descobertos.

Podemos afirmar que o texto:

- (a) trata da descoberta da radioatividade.
(b) trata da descoberta do efeito fotoelétrico.
(c) mostra a origem da radiação eletromagnética.
(d) apresenta a origem do conceito de átomo.

7 PUC-RS Responder à questão com base nas afirmativas a seguir.

- I. A força que mantém os prótons no núcleo de um átomo é de natureza eletrostática.
 - II. No Sol, como em outras estrelas, ocorrem reações de fusão nuclear.
 - III. Na fusão nuclear, núcleos fundem-se com grande absorção de energia.
 - IV. Na fissão nuclear, núcleos são divididos, liberando energia.
- Estão corretas somente:
- (a) I e II.
 - (b) I e III.
 - (c) I, III e IV.
 - (d) II e III.
 - (e) II e IV.

8 UEL A usina nuclear de Angra dos Reis – Angra II – está projetada para uma potência de 1.309 MW. Apesar de sua complexidade tecnológica, é relativamente simples compreender o princípio de funcionamento de uma usina nuclear, pois ele é

similar ao de uma usina térmica convencional. Sobre o assunto, considere as afirmativas apresentadas a seguir.

- I. Na usina térmica, o calor gerado pela combustão do carvão, do óleo ou do gás vaporiza a água em uma caldeira. Esse vapor aciona uma turbina acoplada a um gerador e este produz eletricidade.
- II. O processo de fusão nuclear utilizado em algumas usinas nucleares é semelhante ao processo da fissão nuclear. A diferença entre os dois está na elevada temperatura para fundir o átomo de urânio-235.
- III. Na usina nuclear, o calor é produzido pela fissão do átomo do urânio-235 por um nêutron no núcleo do reator.
- IV. Na usina nuclear, o calor é produzido pela reação em cadeia da fusão do átomo do urânio-235 com um nêutron.

São corretas apenas as afirmativas:

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

TEXTO COMPLEMENTAR

Afinal de contas, o que são esses tão falados *quarks*?

Quando Sir Isaac Newton postulou as três leis da mecânica clássica no século XVII, a força foi conceituada como aquilo que altera a quantidade de movimento de um corpo. Porém, apesar de correta no mundo macroscópico, essa definição carece de algo a mais que explique exatamente porque ela aparece entre dois corpos com massa ou entre dois corpos carregados. Atualmente, considera-se que na natureza existam quatro forças fundamentais, as quais surgem pela troca de partículas mediadoras, que serão estudadas no restante do texto, são elas:

1. A força gravitacional – sempre atrativa
2. A força eletromagnética – que pode ser atrativa ou repulsiva
3. A força nuclear forte – sempre atrativa
4. A força nuclear fraca – sempre atrativa

A força gravitacional é a mais fraca de todas, porém o seu poder é sentido quando observamos a organização do universo, ou seja, somente há a possibilidade de existirem sistemas solares e galáxias organizadas por causa da ação da força gravitacional, que é sempre atrativa. O tratamento da força gravitacional é dado pela Teoria da Relatividade geral de Einstein, sendo portanto um tratamento não quântico. A partícula mediadora da força gravitacional é o gráviton, ainda não detectado experimentalmente.

A força eletromagnética é aquela que interage com partículas eletricamente carregadas, tais como os elétrons. É uma força bem mais intensa do que a força gravitacional e é a responsável pela estabilidade do átomo, mantendo os elétrons presos ao núcleo atômico, constituídos por prótons. A força eletromagnética também pode ser repulsiva, o que a diferencia da força gravitacional. A teoria quântica já é capaz de tratar a força eletromagnética adequadamente, considerando a troca de partículas denominadas fótons virtuais entre cargas elétricas.

A força nuclear forte é a mais intensa de todas e é aquela que mantém unida a maior parte das coisas que vemos. Ela é responsável por ligar os *quarks* dentro do núcleo e por manter os prótons e os nêutrons ligados entre si. Considerando que os prótons possuem cargas de mesmo sinal, caso ela não existisse não seria possível a existência dos átomos, pois os prótons não poderiam ficar unidos. Para a força nuclear forte, há um tratamento quântico que envolve a troca de partículas chamadas glúons e píons, que serão estudados no decorrer do texto.

A última delas é a força nuclear fraca. Ela não é usualmente vista no dia a dia, mas está relacionada com a radioatividade. Ela foi compreendida em 1967, quando dois cientistas: Abdus Salam, do Colégio Imperial de Londres, e Steven Weinberg, da Universidade de Harvard (Estados Unidos), propuseram uma teoria que unificasse a teoria eletromagnética e a força nuclear fraca. Para a força nuclear fraca também há um tratamento quântico, sendo as partículas mediadoras os bósons W e Z.

A unificação de todas as teorias em uma única não é tão simples. Enquanto as forças eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca possuem um tratamento quântico, a força gravitacional possui um tratamento relativístico, o qual não se baseia no princípio da incerteza, base da teoria quântica e que estudaremos no próximo capítulo. Várias tentativas vêm sendo feitas para unificar teoricamente essas forças, um modelo proposto é a Teoria das Supercordas.

Primórdios da física de partículas

Até o início dos anos 30 do século XX, acreditava-se que o átomo era composto de um núcleo, contendo prótons de carga positiva, e de elétrons, de carga negativa, girando ao redor do núcleo.

Porém, não havia como explicar o fato de que o núcleo, sendo composto de cargas positivas, poderia existir de forma estável por causa da repulsão elétrica entre os prótons. Em 1932, o físico inglês James Chadwick conseguiu prever e detectar o nêutron. Havia, então, mais um "personagem" no interior do núcleo.



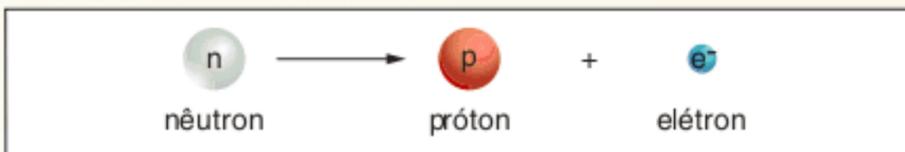
James Chadwick (1891-1974), físico inglês ganhador do Prêmio Nobel de Física, em 1935, pela descoberta do nêutron.

Ainda nos anos 1930, Hideki Yukawa começou a estudar a força nuclear forte e Enrico Fermi descobria a força nuclear fraca.



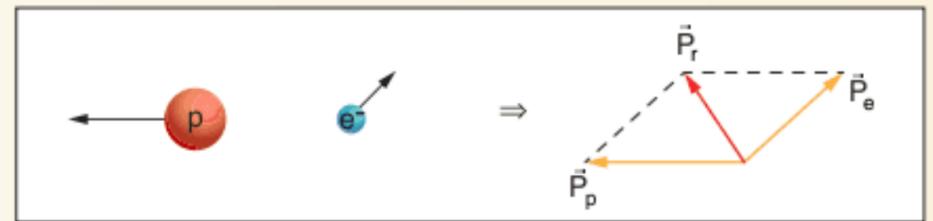
Hideki Yukawa (1907-1981), físico japonês ganhador do Prêmio Nobel de Física, em 1949, por suas predições sobre a existência de mésons com base em trabalhos teóricos sobre as forças nucleares.

O problema ficou ainda mais interessante na análise do decaimento beta. O decaimento beta é aquele que ocorre quando um nêutron decai em um próton e emite um elétron. A interação pode ser vista na figura a seguir.



Decaimento beta do nêutron.

Observou-se que o elétron, ao ser ejetado, acarretava um recuo do próton. Isso não seria problema se houvesse a conservação da quantidade de movimento e a conservação de energia, já que a conservação de carga era respeitada. Porém, o elétron tomava uma direção diferente daquela tomada pelo próton, violando a conservação de quantidade de movimento.

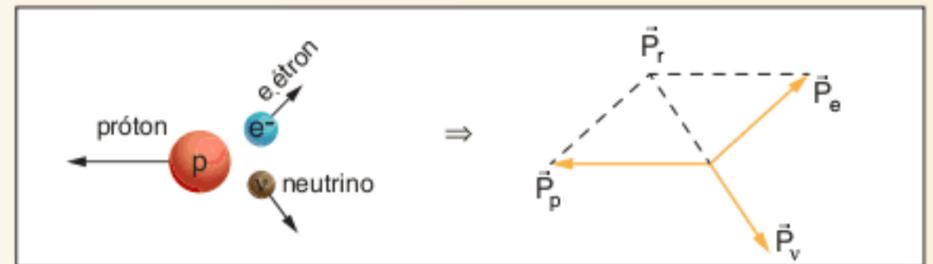


\vec{P}_p e \vec{P}_e após decaimento beta do nêutron.

Observações ainda na década de 1920 verificaram que a conservação de energia era também violada.

Na figura acima, os vetores \vec{P}_p e \vec{P}_e são, respectivamente, os vetores quantidade de movimento do próton e do elétron após o decaimento. Supondo o nêutron em repouso antes do decaimento, isso obviamente viola o princípio da conservação da quantidade de movimento.

Para contornar esse problema, o físico austríaco Wolfgang Pauli propôs a existência do neutrino (o nome se deve a Enrico Fermi). Essa partícula seria então gerada no decaimento beta e, desta forma, a conservação da quantidade de movimento e da energia seriam respeitadas. Isso pode ser visto na figura a seguir.



Aparecimento do neutrino para garantir a conservação da quantidade de movimento.

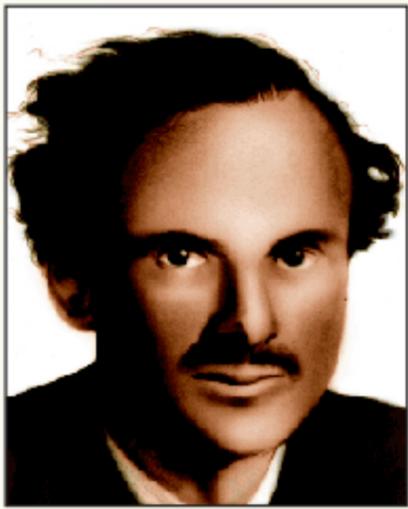


Wolfgang Pauli (1900-1958) – físico austríaco, ganhou o Prêmio Nobel, em 1945, pela descoberta do princípio da exclusão, também chamado princípio de Pauli.

Em 1956, os cientistas Frederick Reines e Clyde Cowan detectaram o neutrino, mostrando que talvez houvesse mais do que somente prótons e elétrons no átomo.

Mais partículas no interior do átomo

Em 1928, o físico inglês Paul Dirac propôs uma teoria relativística do elétron, em que previu a existência da antipartícula do elétron. Essa partícula seria idêntica ao elétron, mas de sinal positivo. A descoberta experimental do antielétron, também chamado pósitron, foi feita em 1932 pelo cientista Carl Anderson, ao trabalhar em um experimento com radiações cósmicas; sua existência foi provada por Blackett e Occhialini em 1933.



Paul Dirac (1902-1984) cientista inglês, ganhador do Prêmio Nobel, em 1933, pela contribuição para o avanço da teoria atômica.

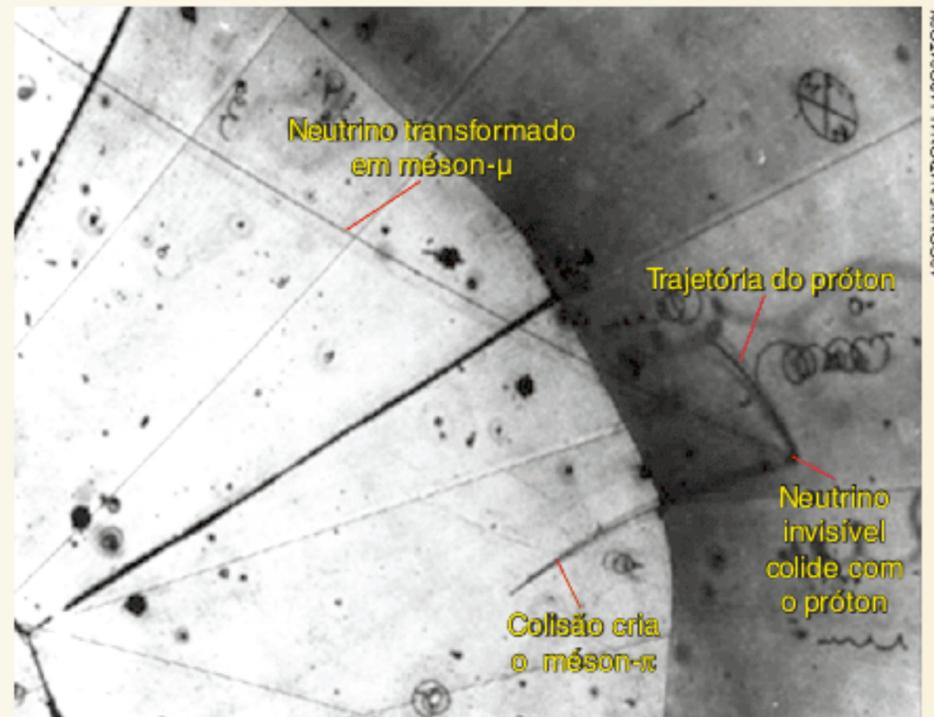


Carl Anderson (1905-1991) cientista americano, ganhador do Prêmio Nobel, em 1936, pela descoberta do pósitron.

Por considerações de simetria, a comunidade científica foi levada a acreditar que haveria a possibilidade de haver antipartículas para todas as partículas existentes. A observação da existência do antipróton e do antineutrão ocorreu com o desenvolvimento de aceleradores de partículas mais potentes em meados da década de 1950.

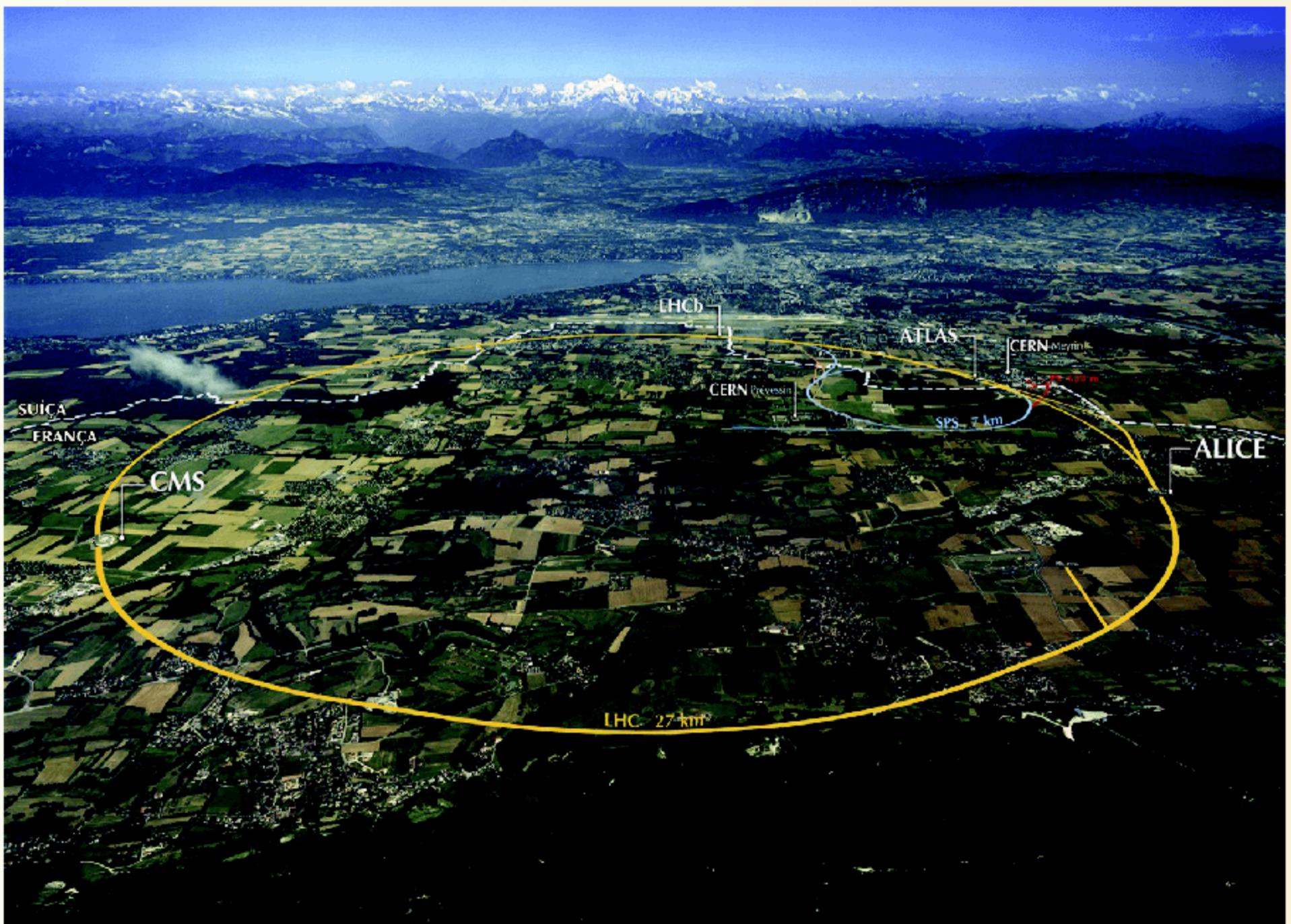
Os aceleradores de partículas são muito importantes para o ganhador do estudo da estrutura da matéria, eles aceleram

partículas a altas velocidades fazendo-as colidir com o núcleo, a trajetória das partículas que emergem a partir dessa colisão é estudada em câmaras de bolhas. Sabendo-se as condições nas quais as colisões são feitas, é possível identificar a massa e a carga de cada uma das partículas estabelecendo as suas características.



Primeira observação do neutrino em uma câmara de bolhas.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY



Vista aérea do LHC, maior acelerador de partículas do mundo, e alguns de seus experimentos, na fronteira franco-suíça.

MAXIMILIEN BRICE/CERN

As antipartículas são denotadas por uma barra superior. Para as partículas mencionadas até agora, podemos utilizar a seguinte representação.

Partícula	Símbolo	Antipartícula	Símbolo
próton	p	Antipróton	\bar{p}
elétron	e	Antielétron (pósitron)	\bar{e}
nêutron	n	Antinêutron	\bar{n}
neutrino	v	Antineutrino	\bar{v}

É possível que exista matéria organizada com antipartículas constituindo a antimatéria, porém há indícios de que no *big bang* o universo tenha optado pela existência de mais matéria do que de antimatéria. De qualquer forma, se matéria e antimatéria entrarem em contato, elas devem se aniquilar, havendo transformação de massa em energia segundo a famosa equação de Einstein $E = m \cdot c^2$.

Finalmente os quarks

O conceito de partícula elementar é bem simples e pode ser assim colocado:

Uma partícula é elementar se ela não possui estrutura interna, ou seja, não é feita de entidades menores do que ela.

Ao longo da história, o que era considerado como partícula elementar – ou como a estrutura básica da matéria – passou por várias mudanças. Desde o átomo de Demócrito, na Grécia Antiga, passando pelos quatro elementos de Aristóteles, chegando ao átomo de Dalton e finalmente às descobertas do final do século XIX e início do século XX quando se achou que finalmente prótons e elétrons eram as partículas elementares.

Todavia, como mostrado anteriormente, comprovações experimentais mostraram que havia mais do que prótons no interior do núcleo. O primeiro a aparecer foi o nêutron, seguido pelo neutrino e a partir daí por uma sucessão de partículas que foram sendo identificadas e que mostram que existe uma verdadeira diversidade de partículas no interior do átomo.

Em 1935, Hideki Yukawa previu a existência de partículas com massa intermediária entre o próton e o elétron, que seriam responsáveis pela interação forte entre os constituintes do núcleo.

A existência dessas partículas, denominada mésons, foi observada em 1937 com o estudo das radiações cósmicas penetrantes.

Podemos, então, afirmar que:

- as partículas fundamentais são os quarks, os léptons e as partículas mediadoras.

Quarks	Léptons	Partículas mediadoras (bósons)		
u: <i>Up</i>	ν_e : neutrino do elétron	Interação eletrofraca (*)	Interação forte	Interação gravitacional
d: <i>Down</i>	e^- : elétron	γ : fóton (**)	g: Glúon (**)	G: Gráviton (**)
c: <i>Charm</i>	ν_μ : neutrino do múon	W^-		
s: <i>Strange</i>	μ^- : múon	W^+		
t: <i>Top</i>	ν_τ : neutrino do tau	Z^0		
b: <i>Bottom</i>	τ^- : tau			

(*) Obtido pela unificação entre a força eletromagnética e a força nuclear fraca. (**) Não possuem massa de repouso.

- Os hádrons são divididos em bárions e mésons. Os bárions são férmions constituídos por três quarks e os mésons são bósons constituídos por dois quarks.

A partir daí, uma série de novas partículas foi descoberta, nada indicando teoricamente que elas possam ser os constituintes básicos da matéria. Os laboratórios que trabalham com aceleradores de partículas procuram aumentar os níveis de energia nas colisões, na tentativa de detectar novas partículas.

Atualmente, pode-se dizer que a matéria é constituída por:

Léptons – partículas que não sofrem atuação da força nuclear forte, e não participam da formação do núcleo. São eles o elétron, o neutrino e as suas antipartículas.

Hádrons – São partículas que sofrem interação forte, se dividem em bárions e mésons. Os bárions são aqueles constituídos por três quarks. São as partículas mais pesadas (prótons e nêutrons e suas antipartículas). Os mésons têm massa intermediária entre os elétrons e os prótons e são constituídos por um quark e um antiquark. Como exemplo de mésons, tem-se os mésons- π , também conhecidos como píons.

Existem seis quarks que são os constituintes dos hádrons. Eles podem ser vistos na tabela a seguir.

Nome	Símbolo	Carga Elétrica
<i>Up</i>	u	$\frac{2}{3}e$
<i>Down</i>	d	$-\frac{1}{3}e$
<i>Charm</i>	c	$\frac{2}{3}e$
<i>Strange</i>	s	$-\frac{1}{3}e$
<i>Top</i>	t	$\frac{2}{3}e$
<i>Bottom</i>	b	$-\frac{1}{3}e$

Uma outra importante classificação das partículas é a classificação que dita se elas obedecem ou não ao Princípio de exclusão de Pauli. Esse princípio diz que duas partículas não podem estar no mesmo estado quântico ao mesmo tempo. As partículas que obedecem ao Princípio de exclusão de Pauli são denominadas férmions e têm como característica principal possuir *spin* semi-inteiro. As partículas que não obedecem a esse princípio são denominadas bósons e têm como característica principal possuir *spin* inteiro. O *spin* é uma medida do momento angular da partícula como um todo e das subpartículas que a compõem.

Alguns bárions:

Símbolo	Nome	Constituição (<i>quarks</i>)	Carga elétrica (e)	Spin
n	Nêutron	ddu	0	$\frac{1}{2}$
\bar{n}	Antinêutron	$\bar{d}\bar{d}\bar{u}$	0	$\frac{1}{2}$
p	Próton	uud	+1	$\frac{1}{2}$
\bar{p}	Antipróton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	$\frac{1}{2}$

Alguns mésons:

Símbolo	Nome	Constituição (<i>quarks</i>)	Carga elétrica (e)	Spin
π^+	píon mais	$u\bar{d}$	+1	0
π^-	píon menos	$d\bar{u}$	-1	0

Poderíamos ainda classificar léptons e *quarks* e suas antipartículas da seguinte forma:

Quarks	u (up)	c (charm)	t (top)	Anti-quarks	\bar{u} (anti-up)	\bar{c} (anti-charm)	\bar{t} (anti-top)
	d (down)	s (strange)	b (bottom)		\bar{d} (anti-down)	\bar{s} (anti-strange)	\bar{b} (anti-bottom)
Léptons	ν_e (neutrino do elétron)	ν_μ (neutrino do múon)	ν_τ (neutrino do tau)	Anti-léptons	$\bar{\nu}_e$ (antineutrino do elétron)	$\bar{\nu}_\mu$ (antineutrino do múon)	$\bar{\nu}_\tau$ (antineutrino do tau)
	e (elétron)	μ (múon)	τ (tau)		\bar{e} (anti-elétron)	$\bar{\mu}$ anti-múon	$\bar{\tau}$ anti-tau
	I	II	III		I	II	III

Na tabela acima, vemos três gerações de partículas (I, II e III). A matéria à qual estamos habituados em nossa vida é formada por partículas da geração I.

Niels Bohr, um dos pais da mecânica quântica, afirmou que quem não ficasse aturdido ao tomar contato com a mecânica quântica, certamente não a compreendeu. O fato, porém, é que essa teoria tem uma capacidade incrível de fazer previsões com altíssima precisão, mesmo baseando-se no princípio da incerteza e trabalhando com probabilidades.

O estudo de física de partículas é uma das áreas mais interessantes da Física, pois, em última instância, o que é o mundo macroscópico senão uma manifestação do mundo quântico. Assim, se quisermos compreender adequadamente o mundo em que vivemos, faz-se necessário estudar a constituição íntima da matéria.

RESUMINDO

Este capítulo propôs-se a estudar os fundamentos da Física nuclear. Inicia-se mostrando a distinção entre reações químicas, aquelas na qual não há alteração no núcleo do átomo, e as transmutações químicas, aquelas na qual há uma alteração na formação do núcleo.

Foram identificados três tipos básicos de radiação, a radiação α , com partículas idênticas ao núcleo do átomo de hélio, constituído por dois prótons e dois nêutrons, a radiação β , com partículas que podem ser positivas (pósitrons) ou negativas (elétrons), e as radiações γ , que são ondas eletromagnéticas de frequência bem superior à da luz visível.

Estudou-se as reações de fissão nuclear, reações na qual o átomo se transmuta em outros átomos, não necessariamente mais estáveis do que o átomo original, com liberação de energia; e as reações de fusão nuclear, na qual átomos se fundem em átomos mais pesados e estáveis, com maior liberação de energia por núcleon do que a reação de fissão nuclear.

A liberação de energia (ΔE) é resultado da diferença de massa (Δm) entre os reagentes e os produtos das transmutações nucleares. Essa liberação de energia pode ser calculada através da famosa fórmula de Einstein:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

As reações de fissão nuclear são utilizadas para fins pacíficos através dos reatores de fissão nuclear. Já as reações de fusão nuclear são uma promessa do século XXI para a obtenção de energia abundante e limpa, através dos reatores de fusão nuclear.

■ QUER SABER MAIS?



SITES

- Site do *International Thermonuclear Experimental Reactor*, que promete ser o protótipo do primeiro reator de fusão nuclear destinado a produzir energia para uso comercial.
www.iter.org
- Site governamental sobre a utilização de energia nuclear à base de fissão nuclear para a obtenção de energia elétrica.
www.eletronuclear.gov.br
- O funcionamento de submarinos nucleares.
<http://ciencia.hsw.uol.com.br/submarino-nuclear.htm>
- Tokamaks e a fusão termonuclear.
www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Tokamaks.htm
- Forças fundamentais – mundo macroscópico e microscópico.
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/articles/brink/
- Guia para o Grande Colisor de Hádrons (LHC).
<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7543089.stm>

Exercícios complementares

Física nuclear

1 O uso do carbono-14 é uma realidade na arqueologia, devido ao fato de que todos os seres vivos têm no seu metabolismo um fluxo constante de carbono, sendo uma pequeníssima parcela de carbono-14 radioativo. Através da porcentagem residual de carbono-14, é possível estimar a idade de um determinado achado arqueológico. Sabendo que a meia-vida do carbono é de aproximadamente 5.600 anos, uma múmia que apresente uma taxa de 25% da taxa normal em vida deve ter morrido a aproximadamente:

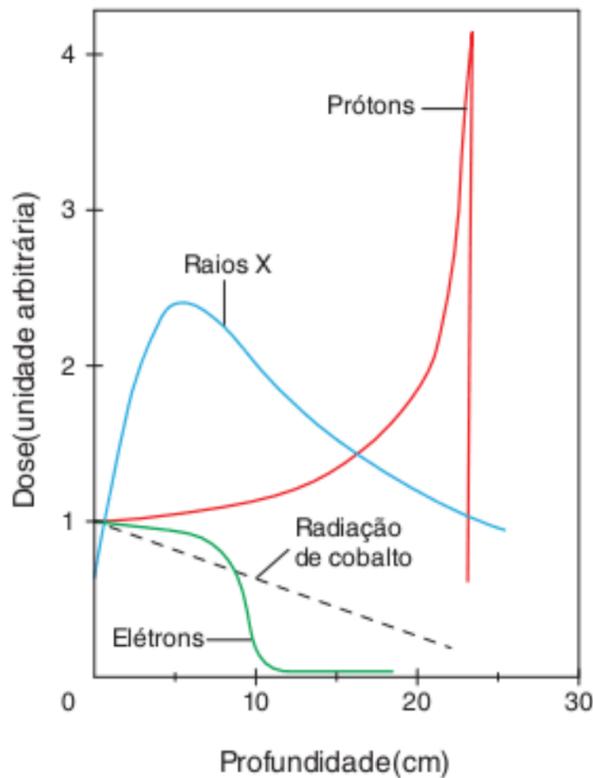
- (a) 5.600 anos.
- (b) 11.200 anos.
- (c) 16.800 anos.
- (d) 22.400 anos.
- (e) 28.000 anos.

2 Uerj Em um laboratório, existem 60 mg de Ra^{226} , cujo período de desintegração é de 1.600 anos. Daqui a 100 anos restará, da quantidade original desse isótopo, o correspondente, em mg:

Dado: $2^{0,0625} = 1,04$.

- (a) 40,2
- (b) 42,6
- (c) 50,2
- (d) 57,7

3 Uerj Feixes de partículas ou de radiação podem ser utilizados na terapia de câncer. A destruição de um tumor no organismo humano se dá pela transferência de uma certa quantidade de energia do feixe, denominada “dose”, para as células do tecido doente. O gráfico a seguir mostra como varia a dose fornecida por diferentes feixes, em função da profundidade de um tecido penetrado.



Publicação do Loma Linda University Medical Center, Batavia, s. d. (Adapt.).

Considere que, para valores das doses apresentadas no gráfico, a eficiência do tratamento seja tanto maior quanto maior for a intensidade da dose na região do tumor. Caso o tumor a ser tratado esteja localizado a uma profundidade de 21 cm, a melhor escolha para o tratamento envolve uma energia de:

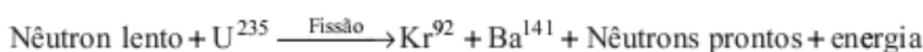
- (a) raio X.
- (b) cobalto.
- (c) elétrons.
- (d) prótons.

4 UFMS Foi descongelado para pesquisa genética, em setembro deste ano, o corpo de Oetzi, nome dado pelos cientistas a um cadáver encontrado na fronteira da Itália com a Áustria. O carbono-14 é um isótopo radioativo formado pela absorção de nêutrons dos raios cósmicos e existe normalmente na natureza na proporção de 10 partes por bilhão (10 ppb). Ele é absorvido pelas plantas sob a forma de CO_2 , estando presente, portanto, nos fósseis animais e vegetais.

A idade de Oetzi foi determinada pela datação por carbono-14. A partir do momento de sua morte, Oetzi começou a perder carbono-14 a uma taxa relacionada à meia-vida deste isótopo. Sabendo que a meia-vida de $\text{C}^{14} = 5.600$ anos e que a quantidade de carbono-14 encontrada foi de aproximadamente 5,19 ppb, a idade aproximada de Oetzi, em anos, está no intervalo entre:

- (a) 4.800 e 6.100.
- (b) 1.000 e 2.800.
- (c) 7.200 e 9.100.
- (d) 10.000 e 11.200.
- (e) 2.900 e 3.900.

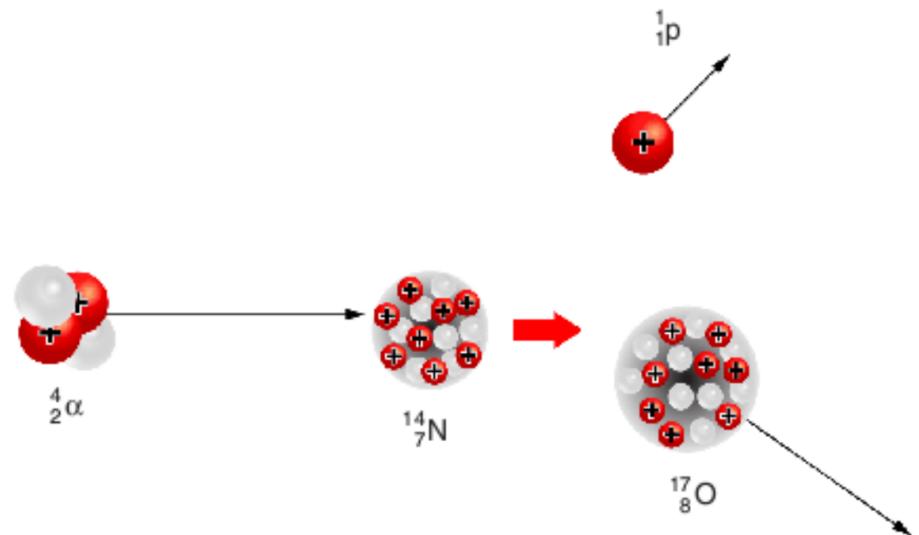
5 UFMT O esquema mostra a fissão de um núcleo atômico, por absorção de um nêutron lento, dando início à chamada reação em cadeia.



Com base na reação, indique:

- a) o número de nêutrons prontos por fissão.
- b) a energia liberada por fissão (não é necessário citar unidades).

6 UFBA Investigando a estrutura do núcleo atômico, Rutherford conseguiu, pela primeira vez, transformar artificialmente um elemento químico em outro, fazendo um feixe de partículas alfa passar através de uma camada de nitrogênio gasoso. A transformação ocorrida, de nitrogênio em oxigênio, está representada, de maneira sintética, na figura a seguir.



Com base nessas informações, na análise da figura e nos conhecimentos sobre Física nuclear, é correto afirmar que:

- 01 a estabilidade de núcleos atômicos se mantém pela ação de forças de natureza eletromagnética.
- 02 a partícula alfa é formada por dois núcleons.
- 04 o nitrogênio libera um próton mediante reação nuclear espontânea.
- 08 o oxigênio obtido é resultante de um processo de transmutação.
- 16 a conservação do número de massa ocorre em reações nucleares.
- 32 a carga elétrica total, antes da reação, é igual à carga elétrica após a reação.

Soma =

7 UFMT A quantidade Q de uma substância radioativa em qualquer tempo t pode ser determinada pela equação $Q(t) = Q_0 e^{-kt}$, onde Q_0 é a quantidade inicial, ou seja, $Q_0 = Q(0)$, e k é uma constante de proporcionalidade que depende da substância.

Dado que a meia-vida de uma substância radioativa é de 2 horas, isto é, $Q(2) = \frac{Q_0}{2}$, o valor de k é:

- (a) $-\frac{\ln 2}{2}$
- (b) $\frac{1}{2} - \ln 2$
- (c) $\frac{\ln 2}{2}$
- (d) $-\frac{1}{2} + \ln 2$
- (e) $2 \ln 2$

8 UFRN A carga elétrica é quantizada e o menor valor absoluto possível de ser observado no estado livre é $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Porém, em 1964, Gell-Mann propôs que existem partículas elementares, as quais denominou *quarks*, cujos valores de carga elétrica são frações de e . Os *quarks* não existem no estado livre, mas podem combinar-se para formar partículas elementares observadas nesse estado.

Considere a tabela periódica dos *quarks*, reproduzida a seguir, cuja leitura deve ser feita de acordo com a nomenclatura indicada no quadrado à esquerda da tabela.

	Grupo I	Grupo II	Grupo III
nome	Up	Charm	Top
carga(e)	$+\frac{2}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$
símbolo	u	c	t
massa-energia	- 5 MeV	- 1.500 MeV	- 170.000 MeV
	Down	Strange	Bottom
	$+\frac{1}{3}e$	$+\frac{1}{3}e$	$+\frac{1}{3}e$
	d	s	b
	- 10 MeV	- 150 MeV	- 5.000 MeV

A combinação de *quarks* que resulta em uma partícula elementar eletricamente carregada é:

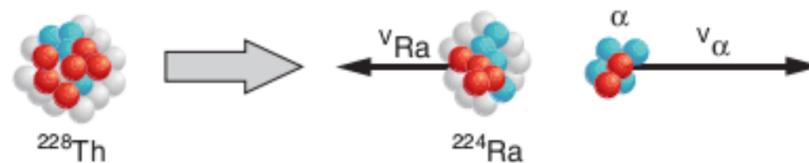
- (a) uds.
- (b) dds.
- (c) udd.
- (d) ddc.

9 Unicamp 2009 A evolução da sociedade tem aumentado a demanda por energia limpa e renovável. Tipicamente, uma roda-d'água de moinho produz cerca de 40 kWh (ou $1,4 \cdot 10^8 \text{ J}$) diários. Por outro lado, usinas nucleares fornecem em torno de 20% da eletricidade do mundo e funcionam através de processos controlados de fissão nuclear em cadeia.

- a) Um sítio pretende instalar em sua propriedade uma roda-d'água e a ela acoplar um gerador elétrico. A partir do fluxo de água disponível e do tipo de roda-d'água, ele avalia que a velocidade linear de um ponto da borda externa da roda deve ser $v = 2,4 \text{ m/s}$. Além disso, para que o gerador funcione adequadamente, a frequência de rotação da roda-d'água deve ser igual a 0,20 Hz. Qual é o raio da roda-d'água a ser instalada? Use $\pi = 3$.
- b) Numa usina nuclear, a diferença de massa Δm entre os reagentes e os produtos da reação de fissão é convertida em energia, segundo a equação de Einstein, $E = \Delta mc^2$, onde $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Uma das reações de fissão que podem ocorrer em uma usina nuclear é expressa de forma aproximada por $(1000 \text{ g de } U_{235}) + (4 \text{ g de nêutrons}) \rightarrow (612 \text{ g de } Ba_{144}) + (378 \text{ g de } Kr_{89}) + (13 \text{ g de nêutrons}) + \text{energia}$. Calcule a quantidade de energia liberada na reação de fissão descrita acima.

10 Unesp 2010 Em desintegrações radioativas, várias grandezas físicas são conservadas.

Na situação representada na figura, temos um núcleo de Tório (^{228}Th), inicialmente em repouso, decaindo em núcleo de Rádio (^{224}Ra) e emitindo uma partícula α . Na desintegração, a partícula α é emitida com uma energia cinética de aproximadamente $8,4 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. Qual é a energia cinética aproximada do núcleo do Rádio?



- (a) $15,0 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
- (b) $8,4 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
- (c) $9,0 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
- (d) $9,0 \cdot 10^{-13} \text{ J}$
- (e) $15,0 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

11 UFRGS 2010 Em certo experimento, um contador Geiger (instrumento que conta o número de eventos de decaimento radioativo por unidade de tempo) foi colocado a 0,5 m de uma amostra radioativa pequena, registrando 1.280 contagens/minuto. Cinco horas mais tarde, quando nova medida foi feita com o contador na mesma posição anterior, foram registradas 80 contagens/minuto.

Com base nessas informações, é correto concluir que a meia-vida da amostra é de

- (a) 0,6 h
- (b) 0,8 h
- (c) 1,0 h
- (d) 1,25 h
- (e) 1,5 h

12 UEL 2011 Um parâmetro útil para caracterizar o processo de decaimento radioativo de um núcleo particular é a meia-vida.

Assinale a alternativa que apresenta a melhor definição de meia-vida.

- (a) É o tempo que um núcleo radioativo leva para decair emitindo elétrons e nêutrons.
- (b) É o tempo gasto para um átomo se tornar radioativo após absorver energia escura emitida pelos átomos próximos.
- (c) É o tempo gasto para que metade de um dado número de núcleos radioativos sofra decaimento.
- (d) É metade do tempo gasto para um dado conjunto de núcleos radioativos emitir radiação.
- (e) É o tempo que um elemento químico gasta para entrar e sair de um meio material.

13 Udesc 2010 Considere as seguintes proposições sobre a radiação gama.

- I. A partícula gama tem a mesma carga elétrica do próton.
- II. A partícula gama é um fóton de radiação eletromagnética.
- III. É um dos tipos de radiação emitida pelos núcleos de átomos radioativos.
- IV. É menos penetrante na matéria do que os raios X.

Assinale a alternativa correta.

- (a) Somente as afirmativas II e III são verdadeiras.
- (b) Somente as afirmativas I e II são verdadeiras.
- (c) Somente as afirmativas I e IV são verdadeiras.
- (d) Somente as afirmativas II e IV são verdadeiras.
- (e) Somente as afirmativas III e IV são verdadeiras.

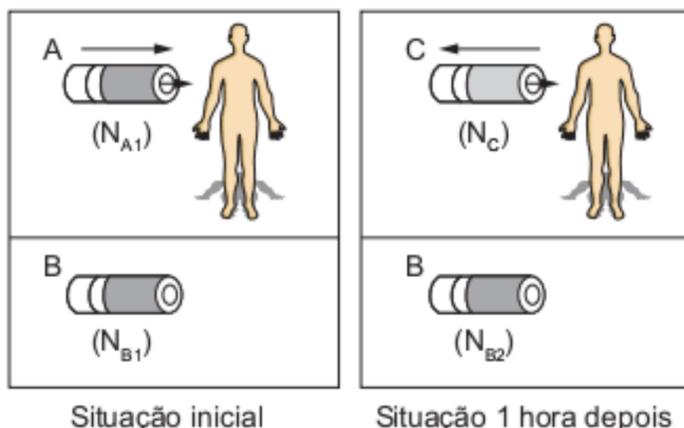
14 Udesc 2009 Em 1908, Ernest Rutherford recebeu o Prêmio Nobel de Química pelo seu trabalho para determinar a massa e a carga elétrica das partículas α , β e γ , que são emitidas pelos núcleos dos átomos de certos elementos radioativos. Analise as afirmativas a seguir, considerando que e e m_e sejam, respectivamente, a carga e a massa de repouso do elétron.

- I. A partícula α tem carga elétrica $+4e$, e sua massa de repouso é aproximadamente $7.340 m_e$.
- II. A partícula β pode ter carga elétrica $+e$ ou e , e sua massa de repouso é igual à do próton, ou seja, aproximadamente $1.840 m_e$.
- III. A partícula γ é um fóton de radiação eletromagnética, não possui carga elétrica e sua massa é nula.

Assinale a alternativa correta.

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

15 Fuvest 2007 Uma substância radioativa, cuja meia-vida é de aproximadamente 20 minutos, pode ser utilizada para medir o volume do sangue de um paciente. Para isso, são preparadas duas amostras, A e B, iguais, dessa substância, diluídas em soro, com volume de 10 cm^3 cada. Uma dessas amostras, A, é injetada na circulação sanguínea do paciente e a outra, B, é mantida como controle. Imediatamente antes da injeção, as amostras são monitoradas, indicando $N_{A1} = N_{B1} = 160.000$ contagens por minuto. Após uma hora, é extraída uma amostra C de sangue do paciente, com igual volume de 10 cm^3 , e seu monitoramento indica $N_C = 40$ contagens por minuto.

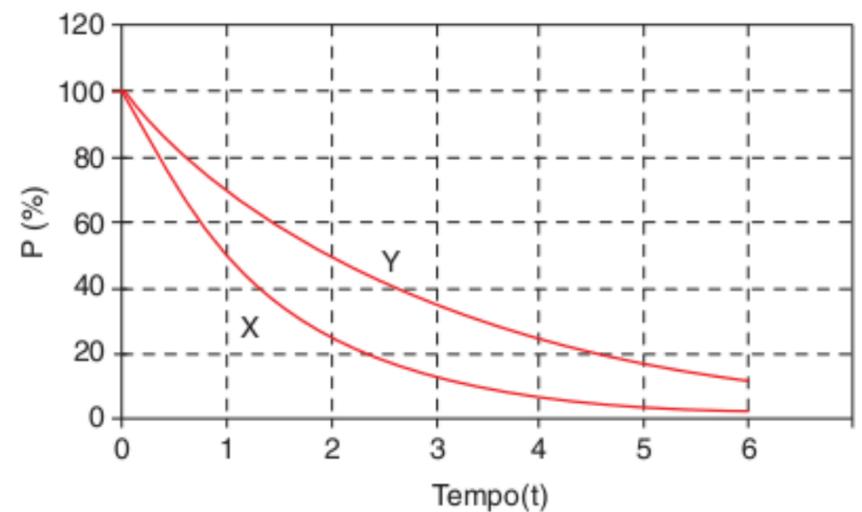


- a) Estime o número N_{B2} , em contagens por minuto, medido na amostra de controle B, uma hora após a primeira monitoração.
- b) A partir da comparação entre as contagens N_{B2} e N_C , estime o volume V , em litros, do sangue no sistema circulatório desse paciente.

Note e adote: A meia-vida é o intervalo de tempo após o qual o número de átomos radioativos presentes em uma amostra é reduzido à metade. Na monitoração de uma amostra, o número de contagens por intervalo de tempo é proporcional ao número de átomos radioativos presentes.

16 PUC-RS 2006 Define-se como meia-vida de um elemento radioativo o tempo necessário para que a metade de seus átomos tenha se desintegrado. No caso do Césio-137, a meia-vida é de 30 anos.

O gráfico a seguir indica o percentual de átomos radioativos, $P(\%)$, presentes em duas amostras radioativas puras, X e Y, em função do tempo, medido em unidades t .



A partir do gráfico, afirma-se que

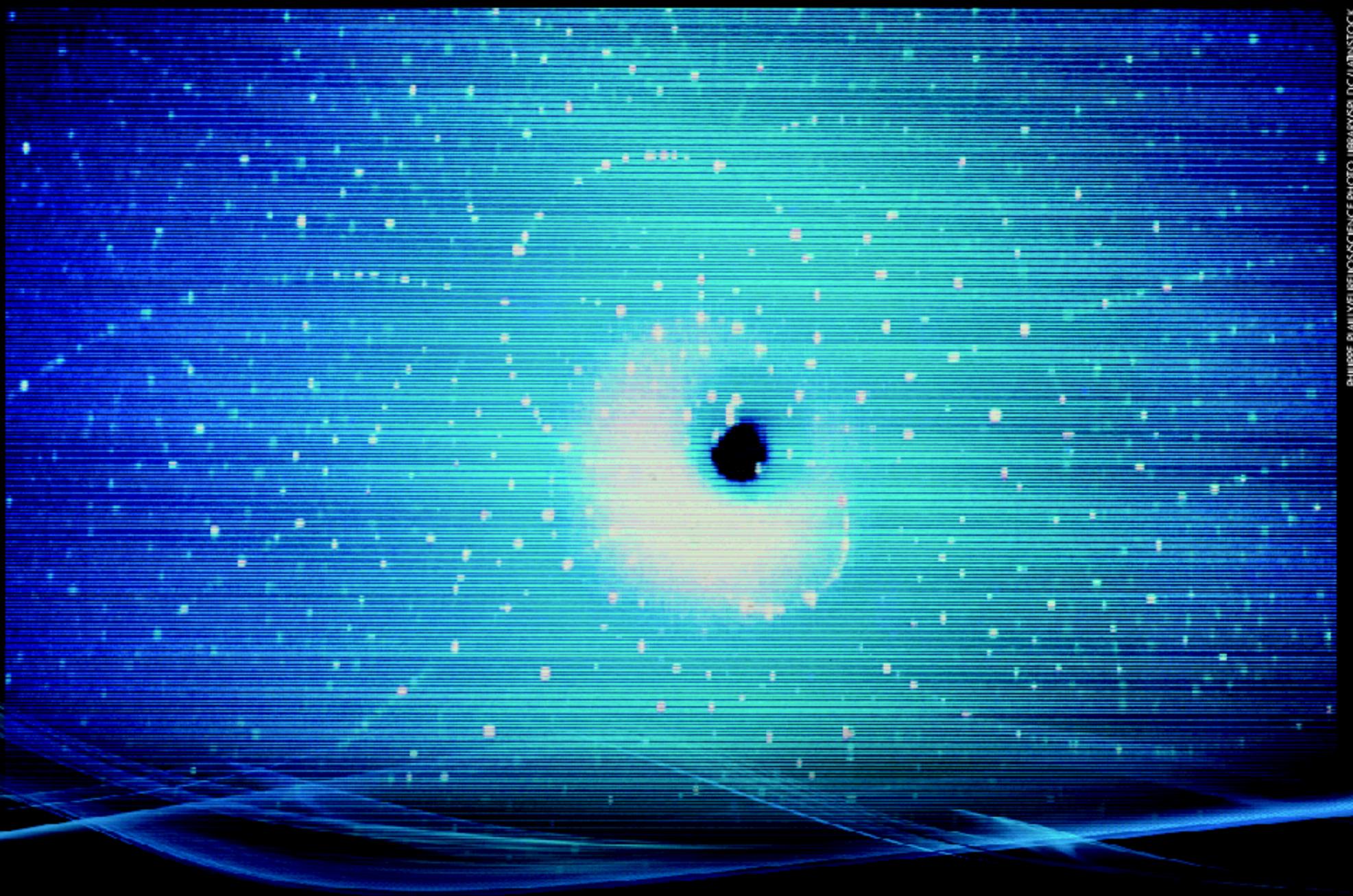
- I. a meia-vida de X é o dobro da de Y.
- II. a meia-vida de X é $3 t$.
- III. transcorrido um tempo $6 t$, o percentual de átomos radioativos, da amostra X, que se desintegraram é maior do que o da amostra Y.

Pela análise das informações acima, conclui-se que está(ão) correta(s) apenas a(s) afirmativa(s):

- (a) I.
- (b) II.
- (c) III.
- (d) I e III.
- (e) II e III.

4

Ondas e matéria



PHILIPPE PUALLEYRELIOS/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SPL DC/UTIN/STOCK

A difração de um feixe de elétrons em uma estrutura cristalina, à primeira vista, parece estranho, já que a difração é um fenômeno puramente ondulatório. No entanto, partículas e ondas podem, dependendo da situação, apresentar comportamentos ondulatórios ou corpusculares. Louis De Broglie – ganhador do prêmio Nobel de Física de 1929 –, utilizando-se de um raciocínio que propunha que a natureza é simétrica em vários aspectos, enunciou que a matéria possuía natureza dual, ou seja, corpuscular e ondulatória.

Teoria partícula-onda de De Broglie

A radiação eletromagnética que por um longo tempo foi interpretada unicamente como onda, teve seu caráter dual confirmado pelo efeito fotoelétrico (natureza de partícula) e pela difração (natureza ondulatória) efetuados pela radiação.

Em 1925, Louis De Broglie sugeriu que todas as partículas deveriam ser interpretadas como tendo propriedade de onda.



Fig. 1 Prince Louis-Victor De Broglie (1892-1987), físico experimental francês, Prêmio Nobel de Física em 1929 pelo descobrimento da natureza ondulatória do elétron.

De Broglie propôs então que o comprimento de onda da matéria era dado pela mesma relação válida para o fóton:

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

Onde p , neste caso, é o momento linear da matéria e λ é o comprimento de onda da matéria. Observe que, sendo essa equação a mesma utilizada para o fóton, De Broglie generalizou a ideia de Einstein, isto é, se ondas podem se comportar como matéria, matéria também pode se comportar como ondas. A equação é a mesma para ambos os casos.

Hoje, o que se aceita é que não é possível querer explicar todos os fenômenos somente pela teoria corpuscular ou pela teoria ondulatória. É necessário entender que os fótons ou os elétrons têm comportamento dual, ou seja, em alguns casos se comportam mais como partículas e em outros, mais como ondas.

Comprovação teórica da natureza ondulatória da matéria



Fig. 2 George Paget Thomson (1892-1975), físico britânico, Prêmio Nobel de Física em 1937 pelo descobrimento experimental da difração de elétrons em cristais.

Em 1926, Elsasser verificou que poderia utilizar um dispositivo parecido com o que Compton utilizou para verificar a natureza corpuscular da luz, a fim de comprovar a natureza ondulatória da matéria.

Da mesma forma que Compton fez incidir em um sólido cristalino um feixe de raios X, a ideia de Elsasser era fazer incidir sobre o sólido cristalino um feixe de elétrons. Os átomos do cristal, na sua estrutura interna, deveriam servir como “centros de difração” para as “ondas” associadas aos elétrons, de tal forma que os feixes difratados tenham direções definidas.

Em 1927, C. J. Davisson e L. H. Germer, nos Estados Unidos, e G.P. Thomson, na Escócia, utilizaram essa ideia em uma montagem experimental, que pode ser vista na figura 3.

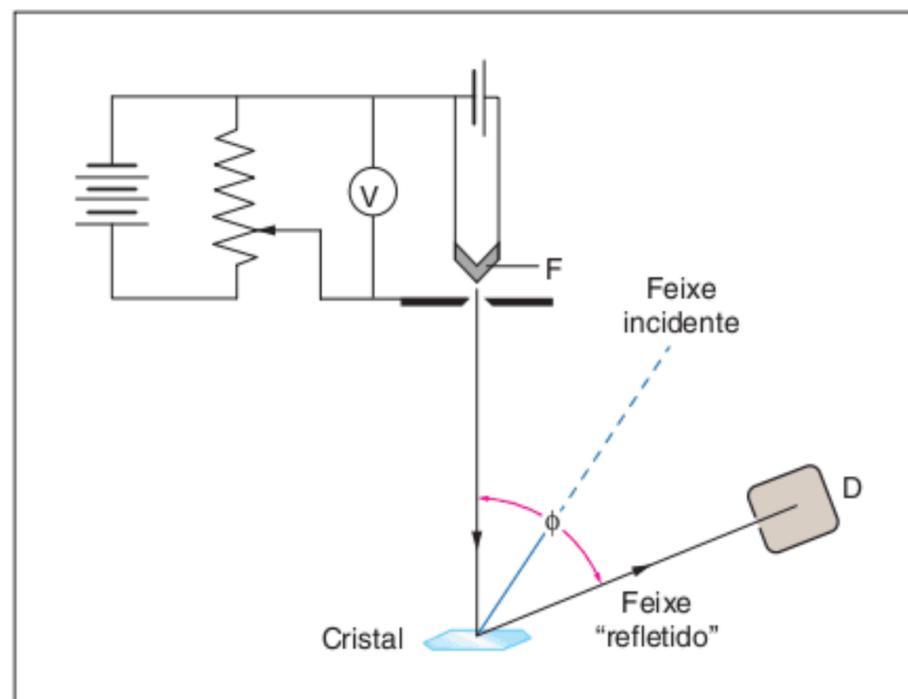


Fig. 3 Montagem experimental para observar a difração de elétrons.

SAIBA MAIS!

Curioso é que G.P Thomson era filho de J. J. Thomson, o mesmo que descobriu o elétron. Assim, o pai demonstrou o caráter corpuscular do elétron e o filho demonstrou o caráter ondulatório.

Na experiência da figura 3, os elétrons emitidos por um filamento (F) aquecido são acelerados por uma diferença de potencial variável e saem do canhão eletrônico com certa energia cinética e são registrados pelo detector D, que pode ser movimentado em diferentes posições angulares ϕ .

Pela teoria de De Broglie, essa energia cinética define um momento linear e , portanto, um comprimento de onda λ associado.

Os elétrons que incidem sobre o cristal na direção normal, a superfície têm a intensidade do feixe refletido medida para diversos valores do potencial aplicado V .

O arranjo regular dos átomos do cristal, cujos núcleos estão separados por uma distância na ordem de 10^{-15} m, atua como uma rede de difração, que difrata a onda de elétrons emitida.

Atualmente, a difração de elétrons é utilizada na determinação da estrutura das moléculas e no estudo da estrutura de superfícies sólidas organizadas.

A figura 4 mostra a intensidade do feixe refletido para um ângulo $\phi = 50^\circ$ em função da tensão V aplicada.

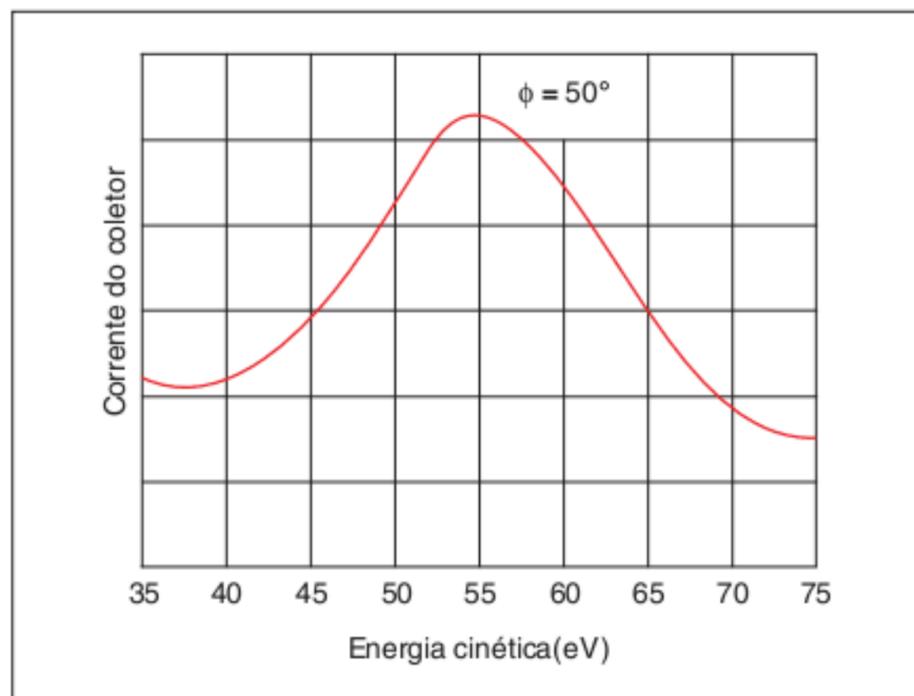


Fig. 4 Corrente do coletor em função da energia cinética.

No gráfico da figura 4, observa-se um pico quando a tensão aplicada aos elétrons é de 54 V. Esse pico de intensidade dos feixes refletidos pode ser explicado supondo-se que, por causa do pequeno comprimento de onda associado ao movimento dos elétrons, a distância entre os átomos do cristal é da ordem desse comprimento de onda; assim, a estrutura cristalina funciona como uma rede de difração para o feixe de elétrons incidente.

De fato, para um feixe incidente com energia cinética correspondente a 54 eV, o comprimento de onda associado é de 1,64 Å, o que concorda perfeitamente com a teoria que prevê, para o caso, 1,65 Å.

Essas concordâncias constituem argumento sólido para se crer que em certas circunstâncias os elétrons têm comportamento ondulatório.

É importante ressaltar que não só os elétrons têm comportamento ondulatório, mas todas as demais partículas, independente de estarem ou não carregadas eletricamente, têm esse comportamento.

Assim, os elétrons (e a matéria, em geral) e a radiação eletromagnética têm características de onda e de partícula.

O princípio da incerteza de Heisenberg



Fig. 5 Werner Heisenberg (1901-1976), físico alemão, Prêmio Nobel de Física em 1932 pela criação da mecânica quântica, cuja aplicação, entre outras coisas, conduziu à descoberta de formas alotrópicas do hidrogênio.

Quando se quer descrever o movimento de partículas no mundo macroscópico, usa-se os termos posição e velocidade. Mas será possível aplicar da mesma forma esses termos no mundo microscópico?

Basta pensar que, para se medir a temperatura de um recipiente contendo água, a temperatura do termômetro pouco influenciará no resultado das medidas; já para medir a temperatura de uma gota de água, certamente a temperatura do instrumento de medida fará com que o resultado da medição seja incorreto. Se extrapolar o fato para o mundo microscópico, esse efeito será ainda maior, gerando um alto valor de incerteza.

É possível aperfeiçoar o método de medição, mas ainda assim haverá sempre uma incerteza.

Pensemos então no elétron. Para determinar a sua posição, ao incidirmos luz sobre ele, podemos fazer com que o comprimento de onda da luz seja bastante pequeno a fim de determinarmos com bastante precisão a sua posição. Porém, ao diminuirmos o comprimento de onda, causamos um aumento da energia dos fótons, ou seja, na colisão, o momento linear dos elétrons será alterado; dessa forma, temos precisão elevada para a posição do elétron, porém alteração significativa na sua velocidade.

Assim, em 1927, Heisenberg enunciou que há um limite na precisão com a qual se pode determinar simultaneamente a posição e a velocidade da partícula. Matematicamente, tem-se:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

onde Δp é a incerteza sobre o momento linear da partícula e Δx é a incerteza na posição. A localização de uma partícula e seu momento linear são complementares e estão relacionados com uma constante. Dessa forma, se a incerteza na posição (Δx) é muito pequena, a incerteza do momento linear (Δp) deve ser muito grande e vice-versa.

Essa equação, na sua simplicidade, revela por que é possível o caráter dual da onda e da matéria.

Ao se forçar uma situação na qual, por exemplo, o elétron mostre o seu caráter ondulatório, a sua natureza corpuscular torna-se indistinta. Se, em outra situação, o seu caráter corpuscular prevalece, torna-se indistinto o seu caráter ondulatório.

Os dois conceitos, ondas e partículas, não são possíveis de serem observados na mesma situação. Não são contrários, mas sim complementares.

Revisando

- 1** Que diferença de potencial é necessária para um microscópio eletrônico dar aos elétrons um comprimento de onda de $0,5 \text{ \AA}$?
- 2** Um elétron tem velocidade de 300 m/s com precisão de $0,01\%$. Qual é a precisão máxima com que se poderá determinar sua posição?

Exercícios propostos

Dualidade partícula-onda de De Broglie

- 1** Qual é o comprimento de onda associado a um feixe de elétrons de 100 eV de energia cinética?
- 2** Qual é o comprimento de onda de De Broglie de uma partícula que se move com velocidade de $2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$, se a partícula é:
- um elétron.
 - um próton.
 - uma bola de $0,2 \text{ kg}$.
- 3** Obtenha a expressão para o comprimento de onda associado a um elétron que é acelerado por uma diferença de potencial V .
- 4** Um projétil de 40 g de massa tem velocidade de 1.000 m/s .
- Qual o valor de comprimento de onda a ele associado?
 - Por que a natureza ondulatória de um projétil não é revelada pelos efeitos de difração?
- 5** Íons de sódio são acelerados por uma diferença de potencial de 300 V .
- Qual é o momento linear adquirido pelos íons?
 - Qual o seu comprimento de onda de De Broglie?
- 6 UEM** Ao determinarmos o comprimento de onda de De Broglie de um elétron com uma velocidade $5 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ e uma massa de $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, obtemos:
Dado: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.
- $1,46 \cdot 10^{-14} \text{ m}$
 - $1,46 \cdot 10^{-60} \text{ m}$
 - $1,46 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
 - $0,146 \cdot 10 \text{ m}$
 - $1,46 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
- 7 ITA** Dobrando-se a energia cinética de um elétron não relativístico, o comprimento de onda original de sua função de onda fica multiplicado por:
- $\frac{1}{\sqrt{2}}$
 - $\frac{1}{2}$
 - $\frac{1}{4}$
 - $\sqrt{2}$
 - 2
- 8 ITA** Responder à questão com base nas afirmações a seguir.
- No efeito fotoelétrico, a energia dos elétrons arrancados da placa metálica é diretamente proporcional à intensidade da luz incidente nela.
 - Para obter-se um semicondutor do tipo N usando silício (tetravalente) como substrato, pode-se fazer dopagem com alumínio (trivalente).
 - A difração de raios X num cristal é uma evidência do dualismo onda-partícula.
 - A fusão nuclear dá origem a um núcleo cuja massa é ligeiramente inferior à soma das massas dos núcleos que o originaram.
- Pela análise das afirmações, conclui-se que somente:
- está correta a II.
 - está correta a III.
 - está correta a IV.
 - estão corretas a I e a II.
 - estão corretas a III e a IV.

9 UFRGS Considere as duas colunas abaixo, colocando no espaço entre parênteses o número do enunciado da primeira coluna que mais relação tem com o da segunda coluna.

1. Existência do núcleo atômico
2. Determinação da carga do elétron
3. Caráter corpuscular da luz
4. Caráter ondulatório das partículas

- Hipótese De Broglie
 Efeito fotoelétrico
 Experimento de Millikan
 Experimento de Rutherford

A relação numérica correta, de cima para baixo, na coluna da direita, que estabelece a associação proposta, é:

- (a) 4 – 3 – 2 – 1
- (b) 1 – 3 – 2 – 4
- (c) 4 – 2 – 3 – 1
- (d) 4 – 3 – 1 – 2
- (e) 4 – 1 – 2 – 3

10 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.

11 Um projétil tem uma velocidade de 300 m/s, conhecida com precisão de 0,01%. Qual é a precisão máxima com que se poderá determinar a sua posição? (Observe aqui o princípio da correspondência).

Princípio da incerteza de Heisenberg

12 Quando um átomo absorve um fóton, ele retém a energia de excitação durante um tempo de 1 NS antes de emití-la para um nível de energia mais baixo. Estime a incerteza desse estado de energia excitado. Sugestão: utilize o princípio da incerteza na forma:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

13 Um microscópio utiliza fótons para localizar um elétron de um átomo com precisão de 0,10 Å. Qual é a incerteza com que poderá ser conhecido o momento linear da referida partícula?

14 ITA Num experimento, foi de $5,0 \cdot 10^3$ m/s a velocidade de um elétron, medida com precisão de 0,003%. Calcule a incerteza na determinação da posição do elétron, sendo conhecidos: massa do elétron $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg e constante de Planck reduzida $\hbar = 1,1 \cdot 10^{-34}$ Js.

15 PUC-RS Responder à questão com base nas informações a seguir.

- I. Um semicondutor tipo N pode ser obtido dopando o silício, que é tetravalente, com fósforo, que é pentavalente.
- II. Considerando que a energia de um fóton é dada por $E = hf$ e que na relação massa-energia $E = mc^2$, um fóton, ao propagar-se no vácuo com velocidade $c = \lambda f$, apresenta massa dada por $m = \frac{hf}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$.
- III. Na equação $m = \frac{h}{c\lambda}$, c é a velocidade da luz no vácuo, λ é o comprimento de onda do fóton e h é a constante de Planck.

Pela análise das afirmações, conclui-se que somente estão corretas:

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

TEXTOS COMPLEMENTARES

O gato de Schrödinger

É um fato inegável o sucesso da mecânica quântica em descrever de forma bem-sucedida aquilo que acontece no mundo atômico; porém, parece haver um descompasso entre aquilo que se observa no mundo macroscópico e aquilo que a teoria quântica descreve no mundo atômico.

Um dos problemas da mecânica quântica é o da medida. Na teoria quântica, existe um paradigma que diz que tudo aquilo que não é proibido é compulsório, ou seja, tudo é tratado em função de probabilidades e o estado do átomo é uma superposição de tudo aquilo que poderia estar acontecendo com ele ao mesmo tempo. Os eventos todos são superpostos temporalmente, cada um deles com uma probabilidade, sendo o estado do átomo considerado dessa maneira.

O problema da medida é que, quando uma medida é feita, somente um desses estados surge como resultado, levando os outros estados a uma situação de não existência. Esse processo é chamado redução de amplitudes, pois as amplitudes das probabilidades dos estados não observados pela medida são reduzidas a zero.

Isso é problemático, pois nega o próprio princípio da mecânica quântica da superposição de estados. Na medida feita, haveria a necessidade de se medir todos os estados, já que todos eles estão superpostos temporalmente. Porém, como visto no parágrafo anterior, isso não acontece experimentalmente.

Para ilustrar o paradoxo entre a teoria quântica e aquilo que se observa no mundo macroscópico, Erwin Schrödinger propôs um experimento imaginário.

Um gato é colocado dentro de uma caixa selada. Preso à caixa, há um dispositivo contendo um núcleo radioativo e uma garrafa com um gás venenoso. O dispositivo é separado do gato de modo que o gato não interfira nele. O experimento é programado de tal maneira que há exatamente uma chance de 50% do núcleo radioativo decair em uma hora. Se o núcleo decair, ele emitirá uma partícula que dispara o aparato, que abre a garrafa, matando o gato. Se o núcleo não decair, então o gato permanece vivo. De acordo com a mecânica quântica, se o núcleo não é observado, ele é descrito como uma superposição (significando que existem simultaneamente) dois estados “núcleo decaído” e “núcleo não decaído”. Contudo, quando a caixa é aberta, o experimentador vê somente um “núcleo decaído/gato morto” ou “núcleo não decaído/gato vivo”.

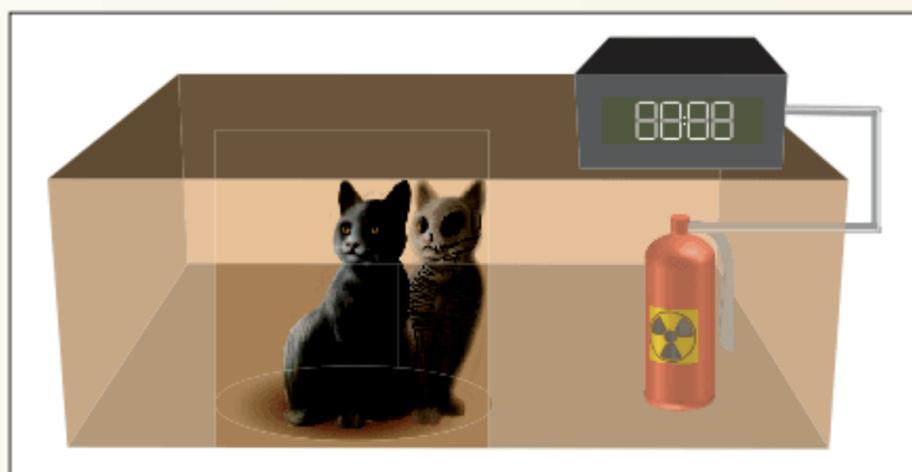


Ilustração do experimento de Schrödinger.

O paradoxo pode ser visto ainda da seguinte maneira: enquanto não se abre a caixa, segundo a mecânica quântica, os estados decaído e não decaído do núcleo coexistem, ou seja, se superpõem. Como a vida do gato depende diretamente do fato de o núcleo estar decaído ou não, isso leva ao fato de que os estados gato vivo e gato morto também se superpõem, o que é de fato ridículo, pois sabemos que, em um dado tempo, o gato estará vivo ou morto.

Schrödinger não quis de fato dizer que o gato estava vivo e morto simultaneamente, mas quis mostrar que a teoria quântica era incompleta.



Erwin Schrödinger (1887-1961), físico austríaco, Prêmio Nobel de Física em 1933 pelas contribuições no avanço da teoria atômica.

Algumas interpretações do problema da medida

- **Interpretação de Copenhague**
A interpretação de Copenhague é a visão ortodoxa da mecânica quântica. Ela diz que, onde for possível que coisas diferentes aconteçam em um sistema físico, haverá uma probabilidade para cada uma delas (a cada probabilidade haverá associada uma amplitude) e o estado total do sistema é dado pela soma ou superposição dessas amplitudes. Todavia, quando uma observação é feita, chega-se ao valor correspondente a somente um dos estados, que é a redução de amplitudes dita anteriormente.

- **A teoria da mente sobre a matéria**
De acordo com essa interpretação, a mente, não sendo parte do mundo quântico, não é forçada a estar em vários estados simultaneamente e, dessa forma, é livre para optar. Quando a mente humana observa o universo, o universo sabe que está sendo observado e, nesse ato, a mente impõe um único estado.

É possível que não se possa escolher qual estado a ser observado, mas aquilo que observamos se torna real naquele momento.

Essa visão é criticada pelo fato de que, sendo as pessoas seres diferentes, não há como a observação realizada pela mente de uma pessoa fazer com que todas as outras mentes vejam exatamente a mesma coisa, ou seja, havendo uma superposição de estados, seria possível que cada mente observasse um dos estados e, conseqüentemente, fizessem medições diferentes. Mas isso não é o que acontece.

- **A teoria dos muitos universos**
Essa teoria afirma que os estados continuam se superpondo e, no momento da observação, o universo se divide no número de estados existentes de tal maneira que o observador, agora dividido nos muitos universos, observa um estado correspondente.

No caso do paradoxo de Schrödinger, ao abrirmos a caixa, o universo se divide em dois: em um deles o gato estará vivo e, no outro, o gato estará morto.

De qualquer maneira, a interpretação de Copenhague tem trazido resultados práticos. Um deles é a criptografia quântica, sua descrição é a seguinte: é possível enviar a luz através de uma fibra ótica. Esse feixe de luz encontra-se em uma superposição de estados. Se, durante o trajeto da luz na fibra, for colocado um sensor que seja capaz de medir o sinal na fibra, uma observação é feita e os estados superpostos se colapsam em um único. Sendo assim, na outra extremidade da fibra, é possível saber se o sinal foi interceptado, pois a distribuição estatística se altera e, portanto, a segurança da comunicação é mantida. Esta comprovação experimental mostra que a visão de Copenhague é a que melhor se adapta ao problema da medida na mecânica quântica.

Desde sua origem no fim da década de 1960, a teoria das supercordas passou por inúmeras reviravoltas. Em vários momentos ganhou novas interpretações, até se tornar a mais bem sucedida resposta, até hoje, para um dos maiores desafios da física contemporânea: unificar a teoria da relatividade geral e a mecânica quântica.

Mas essa movimentada trajetória histórica está longe de chegar ao fim, segundo o físico norte-americano Edward Witten, do Instituto de Estudos Avançados da Universidade de Princeton, que recebeu na última segunda-feira (14/2), em São Paulo, o título de doutor honoris causa da Universidade Estadual Paulista (Unesp).

Para Witten, que é considerado um dos mais importantes físicos teóricos da atualidade, a teoria das supercordas deverá ganhar novas interpretações no futuro, adquirindo dimensões – e consequências teóricas – que ainda são completamente imprevisíveis.

“A teoria das supercordas alcançou um nível de desenvolvimento que, em cada um de seus estágios anteriores, ninguém jamais poderia conceber. Mas o processo de compreender o que realmente significa a teoria das supercordas ainda tem um longo caminho pela frente. Acredito que não estamos nada próximos de ver o fim desse caminho”, disse à Agência FAPESP.

Desenvolvida a partir do fim da década de 1960, a teoria das supercordas é um modelo físico no qual os componentes fundamentais da matéria não são os pontos sem dimensão que caracterizavam as partículas subatômicas na física tradicional, mas objetos extensos unidimensionais, semelhantes a uma corda. Dependendo do “tom” da vibração dessas cordas, elas corresponderiam a cada partícula subatômica.

Witten é o criador da Teoria-M, que unifica as cinco diferentes teorias das supercordas existentes anteriormente. O termo foi cunhado pelo cientista em 1995 e desencadeou a chamada “segunda revolução das supercordas”.

A Teoria-M determina que a matéria é formada por membranas e que o universo flui através de 11 dimensões: o tempo, a altura, a largura, o comprimento e mais sete dimensões “recurvadas”, com outras propriedades.

Ao longo de sua carreira, Witten recebeu alguns dos principais prêmios de sua área, incluindo a Medalha Isaac Newton, o Prêmio Lorentz da Academia de Ciências Holandesa (ambos em 2010), o Prêmio Henri Poincaré (2006), a Medalha Fields (1990) – considerada o Nobel da Matemática –, a Medalha Albert Einstein (1985) e o Prêmio Dirac (1985).

Após a cerimônia de titulação, no Instituto de Artes da Unesp, o pesquisador norte-americano apresentou a palestra “A teoria das cordas e o Universo”, abrindo o segundo Joint Dutch-IFT School on Theoretical Physics, que será realizado até o dia 18 de fevereiro. O evento, organizado pelo professor titular do Instituto de Física Teórica (IFT) da Unesp Nathan Jacob Berkovits, terá a participação de 27 alunos de Doutorado da Holanda.

Berkovits, um dos principais especialistas em supercordas no Brasil, coordena o Projeto Temático “Pesquisa e ensino em teoria de cordas”, financiado pela Fapesp. O projeto aglutina um esforço global para promover avanços na área, envolve uma série de parcerias internacionais e promove visitas de especialistas estrangeiros e intercâmbio de alunos do Brasil e do exterior.

Das interações subatômicas à gravitação quântica

De acordo com Witten, o processo de mudanças de interpretação que deu à teoria das supercordas novos significados, aumentando sua importância ao longo do tempo, está longe de terminar. “Ainda não podemos nem conceber o fim dessa jornada”, disse.

Os físicos consideram que a origem da teoria das supercordas remonta à formulação da Amplitude de Veneziano. A descoberta, realizada em 1968 pelo italiano Gabriele Veneziano, sugeria que a amplitude de espalhamento explicava propriedades físicas, como a simetria e a dualidade, da interação forte entre as partículas subatômicas denominadas mésons.

“Só me envolvi com a teoria das supercordas no fim da década de 1970, por isso não sei o que teria pensado sobre essa descoberta na época. Mas, olhando retroativamente, acho surpreendente que essa pequena fórmula tenha se tornado o ponto inicial de algo tão significativo”, afirmou Witten.

Segundo ele, a proliferação de ressonâncias das partículas subatômicas, ou hádrons, levavam os físicos ao desespero quando tentavam descrever as interações fortes entre elas. “A descoberta de Veneziano sugeria que, se havia tantas ressonâncias de partículas, o espalhamento ressonante poderia ter um papel importante na interação dos hádrons”, explicou.

A partir daí, segundo ele, desenvolveu-se a ideia de que um méson é uma pequena corda com cargas em suas extremidades. “As ressonâncias dos mésons, que correspondem aos polos da amplitude de Veneziano, seriam estados vibratórios dessas cordas”, disse Witten.

No entanto, a amplitude de Veneziano gerou descrições das interações fortes entre partículas que são corretas apenas do ponto de vista quantitativo. Outras descrições melhores surgiram e, por alguns anos, a teoria das supercordas ficou no ostracismo.

“Desenvolvimentos posteriores mostraram que o aparente fracasso da teoria das supercordas para explicar as interações fortes não era definitivo. As outras descrições melhores aparentemente eram equivalentes a uma parte ainda não descoberta da teoria das supercordas”, afirmou Witten.

O principal motivo para a sobrevivência da teoria, no entanto, é que, se ela era insuficiente para explicar as interações fortes, havia um outro problema da física para o qual ela estava correta: a gravitação quântica.

“A mecânica quântica e a gravidade existem no mundo real e, por isso, precisamos de uma teoria da gravitação quântica. Mas ela não pode ser compreendida com os algoritmos convencionais. A teoria das supercordas tinha as características para isso”, disse.

Depois da formulação da Amplitude de Veneziano, segundo Witten, descobriu-se que a teoria era incompatível com a massa que se atribuía às partículas. Alguns físicos, então, foram ousados o suficiente para propor que a teoria das supercordas havia sido mal interpretada: as cordas eram muito menores do que se havia imaginado e descreviam gravitação quântica. “Com isso, a teoria foi conduzida novamente para uma nova direção que não poderia ter sido prevista antes”, disse.

Supersimetria e supergravidade

Esse processo de transformação continuou ao longo dos anos e uma das consequências desse desenvolvimento foi perturbadora: a teoria estabelecia que o universo deveria ter dez dimensões espaciais, além do tempo.

“Isso deve ter parecido uma piada, na época. Mas, quando a teoria foi reinterpretada como uma candidata para unificar todas as teorias de partículas e forças elementares, as dimensões extras deram abertura para que se derivasse toda a complexidade do mundo real a partir de um ponto inicial”, disse Witten.

Os físicos descobriram então a supersimetria, descoberta que o norte-americano considera como a principal contribuição que a teoria das supercordas trouxe para prever tudo de novo que pode ser descoberto na física de partículas.

“A supersimetria levou ao tema extraordinariamente rico da supergravidade – que é a consequência da supersimetria ao descrever a gravidade. A supersimetria e a supergravidade são na verdade o topo de um iceberg muito maior: a teoria das supercordas se baseia em um novo tipo de geometria que nós ainda não entendemos”, afirmou.

De alguma maneira, segundo Witten, existe um novo tipo de geometria que não permite que se fale de “pontos” ou “linhas” no espaço-tempo, mas na qual se pode falar de superfícies mínimas quânticas.

“Depois disso, alguns físicos começaram a se perguntar: por que parar nas cordas? Por que não membranas? Havia uma boa resposta para isso: as cordas funcionam melhor que as membranas por causa das propriedades únicas dos números complexos. Mas, agora, sabemos que as membranas e os objetos de maior

dimensão não são parte de uma teoria alternativa. São, de fato, parte da teoria das supercordas”, afirmou.

Enquanto isso, outra ideia era desenvolvida para desafiar os paradigmas então estabelecidos pela teoria das supercordas: a dualidade eletromagnética. Em meados da década de 1990, várias pistas sugeriam que a simetria entre os campos elétricos e magnéticos tinham importância estrutural para a teoria das supercordas.

“A implicação mais direta era o fato de que a dualidade eletromagnética é importante na supergravidade. As várias vertentes – como as membranas e a dualidade eletromagnética – foram integradas na metade da década de 1990, gerando um novo paradigma”, ressaltou.

A partir daí, a teoria só pode ser compreendida em termos de mecânica quântica. “Mas ela não podia ter apenas uma ‘roupagem quântica’. Para entendê-la, seria preciso, de certa forma, que ela desse uma nova interpretação do que significa a mecânica quântica”, disse.

Sendo assim, de acordo com Witten, chegou-se a um novo paradigma: só havia uma teoria das supercordas e ela se tornara a única candidata à superunificação das leis da natureza.

“Na década de 1990, a visão predominante sobre o que significa a teoria das supercordas e sobre como se pode tentar entendê-la foi, mais uma vez, imensamente amplificada. Podemos perguntar: o que vem agora? Qual a próxima grande mudança de perspectiva? Difícil saber. Talvez já tenha havido, na última década, mais uma mudança de interpretação na teoria, mas é difícil identificá-la sem o devido distanciamento”, disse.

Fábio de Castro. “Revoluções teóricas”. Agência Fapesp, 17 fev. 2011. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/13467>>. Acesso em: 6 jul. 2012.

RESUMINDO

Neste capítulo, foi mostrado que a natureza possui aspecto dual, ou seja, dependendo do fenômeno, ela pode mostrar o seu caráter corpuscular ou ondulatório. A prova disso foi o fato de que os elétrons, até então tratados como partículas, sofreram difração ao serem projetados sobre uma estrutura cristalina, comprovando a teoria de Louis De Broglie, que associou à partícula um comprimento de onda λ , denominado comprimento de onda de De Broglie, tal que:

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

Onde h é a constante de Planck e p é a quantidade de movimento do corpo.

Em seguida, foi estudado o princípio da incerteza de Heisenberg, o qual postula que é impossível se determinar simultaneamente com 100% de precisão a posição e a quantidade de movimento do elétron. Dessa forma, o tratamento do elétron como uma partícula que executa um movimento em torno do núcleo e a discussão da sua trajetória tornam-se inúteis. Inaugura-se então a era na qual o elétron é tratado como uma função densidade de probabilidade, ou seja, o seu tratamento passa a ser probabilístico e determinado pela equação de Schrödinger, que determina as regiões de máxima probabilidade de se encontrar os elétrons, ou seja, os orbitais.

Com o princípio da incerteza, pode-se perceber que as manifestações corpuscular e ondulatória da natureza são complementares, ou seja, são manifestações de uma mesma essência, que ainda tentamos compreender.

■ QUER SABER MAIS?



SITES

- www.brasilecola.com/fisica/a-natureza-dual-luz.htm
- Jogo desenvolvido no Brasil que insere de forma lúdica conceitos de partículas elementares, decaimento de partículas (video game que ensina Física). www.sprace.org.br/SPRACE/sprace-game-pt.

partir do qual o comprimento de onda de De Broglie associado à molécula foi então medido. Os pesquisadores verificaram que o comprimento de onda de De Broglie associado a uma molécula de fulereno com velocidade de 220 m/s é de $2,50 \cdot 10^{-12}$ m, em concordância com o valor teoricamente previsto.

Qual seria o comprimento de onda de De Broglie associado a uma molécula de fulereno com velocidade de 110 m/s?

- (a) $1,00 \cdot 10^{-11}$ m (c) $1,25 \cdot 10^{-12}$ m (e) $3,12 \cdot 10^{-13}$ m
 (b) $5,00 \cdot 10^{-12}$ m (d) $6,25 \cdot 10^{-13}$ m

6 UFES 2007 Considerando a relação massa-energia oriunda da relatividade, a energia de um fóton e a expressão do momento linear (quantidade de movimento), De Broglie obteve uma expressão para o comprimento de onda de uma partícula.

- a) Demonstre a expressão obtida por De Broglie.
 b) Considerando a constante de Planck $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s, calcule:
 1. o comprimento de onda de De Broglie para um elétron de massa $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg que se move com velocidade $v = 6,0 \cdot 10^6$ m/s.
 2. o comprimento de onda de um elétron que estava inicialmente em repouso e que foi acelerado por uma diferença de potencial de 1 Volt.

7 ITA 2003 Considere as seguintes afirmações.

- I. No efeito fotoelétrico, quando um metal é iluminado por um feixe de luz monocromática, a quantidade de elétrons emitidos pelo metal é diretamente proporcional à intensidade do feixe incidente, independentemente da frequência da luz.
 II. As órbitas permitidas ao elétron em um átomo são aquelas em que o momento angular orbital é $n \frac{h}{2\pi}$, sendo $n = 1, 3, 5 \dots$.
 III. Os aspectos corpuscular e ondulatório são necessários para a descrição completa de um sistema quântico.
 IV. A natureza complementar do mundo quântico é expressa, no formalismo da Mecânica quântica, pelo princípio de incerteza de Heisenberg.

Quais estão corretas?

- (a) I e II. (c) I e IV. (e) III e IV.
 (b) I e III. (d) II e III.

8 ITA 2011 Obtenha uma expressão para as energias das órbitas do modelo de Bohr do átomo de hidrogênio usando a condição de que o comprimento da circunferência de uma órbita do elétron ao redor do próton seja igual a um número inteiro de comprimentos de onda de Broglie do elétron.

9 UFPR 2008 O efeito fotoelétrico foi descoberto experimentalmente por Heinrich Hertz em 1887. Em 1905, Albert Einstein propôs uma explicação teórica para esse efeito, a qual foi comprovada experimentalmente por Millikan, em 1914. Essa comprovação experimental deu a Einstein o prêmio Nobel de Física de 1921. Em relação a esse efeito, assinale a alternativa correta.

- (a) O efeito fotoelétrico ocorre quando um elétron colide com um próton.
 (b) A teoria de Einstein considerou que a luz nesse caso se comporta como uma onda.

- (c) Esse efeito é observado quando fótons atingem uma superfície metálica.
 (d) Esse efeito é utilizado para explicar o funcionamento de fontes de *laser*.
 (e) Inexistem aplicações tecnológicas desse efeito em nosso cotidiano, pois ele ocorre somente no nível atômico.

10 PUC-MG 2008 A Física moderna introduziu novos conceitos para explicação de fenômenos que não mais podiam ser explicados pela Física clássica. Assinale a opção que contradiz essa afirmativa.

- (a) A descontinuidade dos espectros atômicos.
 (b) O efeito fotoelétrico.
 (c) A dualidade onda e matéria.
 (d) A propagação retilínea da luz.

11 UFPEL 2007 Considere as afirmações sobre o átomo.

- I. A energia do elétron ligado é sempre negativa.
 II. Um elétron ligado pode assumir qualquer valor de energia.
 III. Ao decair do primeiro estado excitado para o estado fundamental, o elétron absorve um *quantum* de energia.

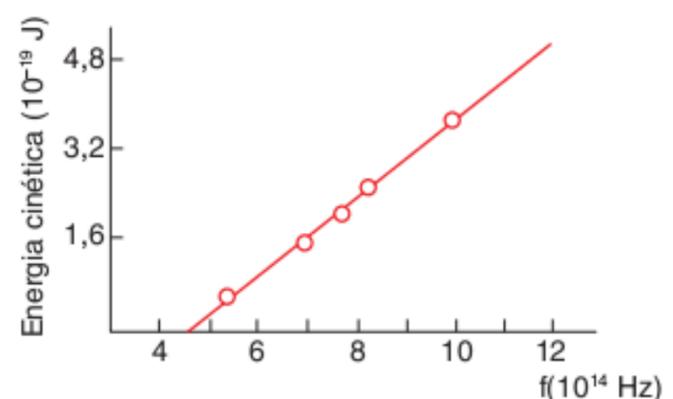
Com base na Física moderna e em seus conhecimentos, está(ão) correta(s) a(s) afirmação(ões):

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

12 UFMG 2007 No efeito fotoelétrico, um fóton de energia E_f é absorvido por um elétron da superfície de um metal. Sabe-se que uma parte da energia do fóton, E_m , é utilizada para remover o elétron da superfície do metal e que a parte restante, E_c , corresponde à energia cinética adquirida pelo elétron, ou seja:

$$E_f = E_m + E_c$$

Em 1916, Millikan mediu a energia cinética dos elétrons que são ejetados quando uma superfície de sódio metálico é iluminada com luz de diferentes frequências. Os resultados obtidos por ele estão mostrados no gráfico a seguir.



Considerando essas informações:

- a) Calcule a energia mínima necessária para se remover um elétron de uma superfície de sódio metálico. Justifique sua resposta.

Dado: a constante de Planck vale $6,63 \cdot 10^{-34}$ J. s.

- b) Explique o que acontece quando uma luz de comprimento de onda de $0,75 \cdot 10^{-6}$ m incide sobre a superfície de sódio metálico.

13 UFG 2007 O efeito fotoelétrico, explorado em sensores, células fotoelétricas e outros detectores eletrônicos de luz, refere-se à capacidade da luz de retirar elétrons da superfície de um metal. Quanto a este efeito, pode-se afirmar que:

- (a) a energia dos elétrons ejetados depende da intensidade da luz incidente.
- (b) a energia dos elétrons ejetados é discreta, correspondendo aos *quanta* de energia.
- (c) a função trabalho depende do número de elétrons ejetados.
- (d) a velocidade dos elétrons ejetados depende da cor da luz incidente.
- (e) o número de elétrons ejetados depende da cor da luz incidente.

14 Ufes 2007 Considerando a relação massa-energia oriunda da relatividade, a energia de um fóton e a expressão do momento linear (quantidade de movimento), De Broglie obteve uma expressão para o comprimento de onda de uma partícula.

- a) Demonstre a expressão obtida por De Broglie.
- b) Considerando a constante de Planck $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J. s, calcule:
 1. o comprimento de onda de De Broglie para um elétron de massa $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg que se move com velocidade $v = 6,0 \cdot 10^6$ m/s.
 2. o comprimento de onda de um elétron que estava inicialmente em repouso e que foi acelerado por uma diferença de potencial de 1 Volt.

15 UFRGS 2007 Quando se faz incidir luz de certa frequência sobre uma placa metálica, qual é o fator que determina se haverá ou não emissão de fotoelétrons?

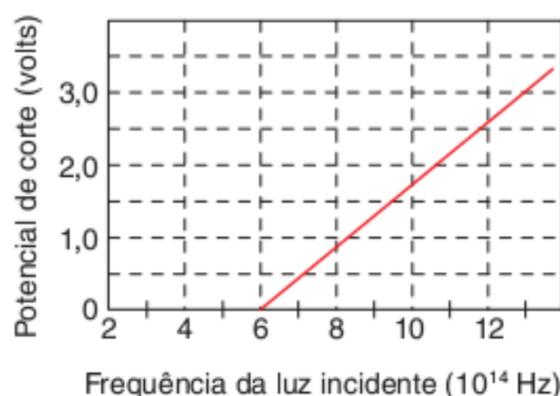
- (a) A área da placa.
- (b) O tempo de exposição da placa à luz.
- (c) O material da placa.
- (d) O ângulo de incidência da luz.
- (e) A intensidade da luz.

16 UFRGS 2007 Em 1999, um artigo de pesquisadores de Viena (M. Arndt e outros) publicado na revista *Nature* mostrou os resultados de uma experiência de interferência realizada com moléculas de fulereno – até então os maiores objetos a exibir dualidade onda-partícula. Nessa experiência, as moléculas de fulereno, que consistem em um arranjo de 60 átomos de carbono, eram ejetadas de um forno e passavam por um sistema de fendas antes de serem detectadas sobre um anteparo. Após a detecção de muitas dessas moléculas, foi observado sobre o anteparo um padrão de interferência similar ao do elétron, a partir do qual o comprimento de onda de De Broglie associado à molécula foi então medido. Os pesquisadores verificaram que o comprimento de onda de De Broglie associado a uma molécula de fulereno com velocidade de 220 m/s é de $2,50 \cdot 10^{-12}$ m, em concordância com o valor teoricamente previsto.

Qual seria o comprimento de onda de De Broglie associado a uma molécula de fulereno com velocidade de 110 m/s?

- (a) $1,00 \cdot 10^{-11}$ m
- (b) $5,00 \cdot 10^{-12}$ m
- (c) $1,25 \cdot 10^{-12}$ m
- (d) $6,25 \cdot 10^{-13}$ m
- (e) $3,12 \cdot 10^{-13}$ m

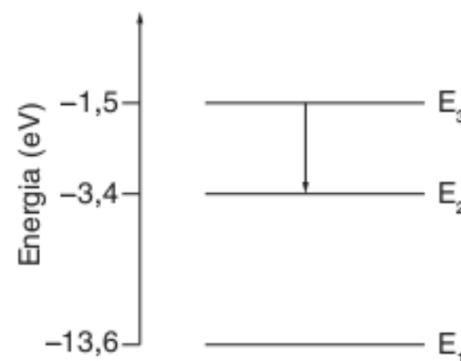
17 UFPE 2007 Em uma experiência de efeito fotoelétrico com uma placa metálica, foram determinados os potenciais de corte em função da frequência da luz incidente, como mostrado no gráfico a seguir. A partir do gráfico, determine o potencial de superfície (também chamado de função trabalho) do metal, em unidades de 10^{-20} J.



Constantes físicas necessárias:

- aceleração da gravidade: 10 m/s^2
- constante de Planck: $6,6 \cdot 10^{-34}$ J. s

18 UFG 2006 Transições eletrônicas, em que fótons são absorvidos ou emitidos, são responsáveis por muitas das cores que percebemos. Na figura a seguir, vê-se parte do diagrama de energias do átomo de hidrogênio.



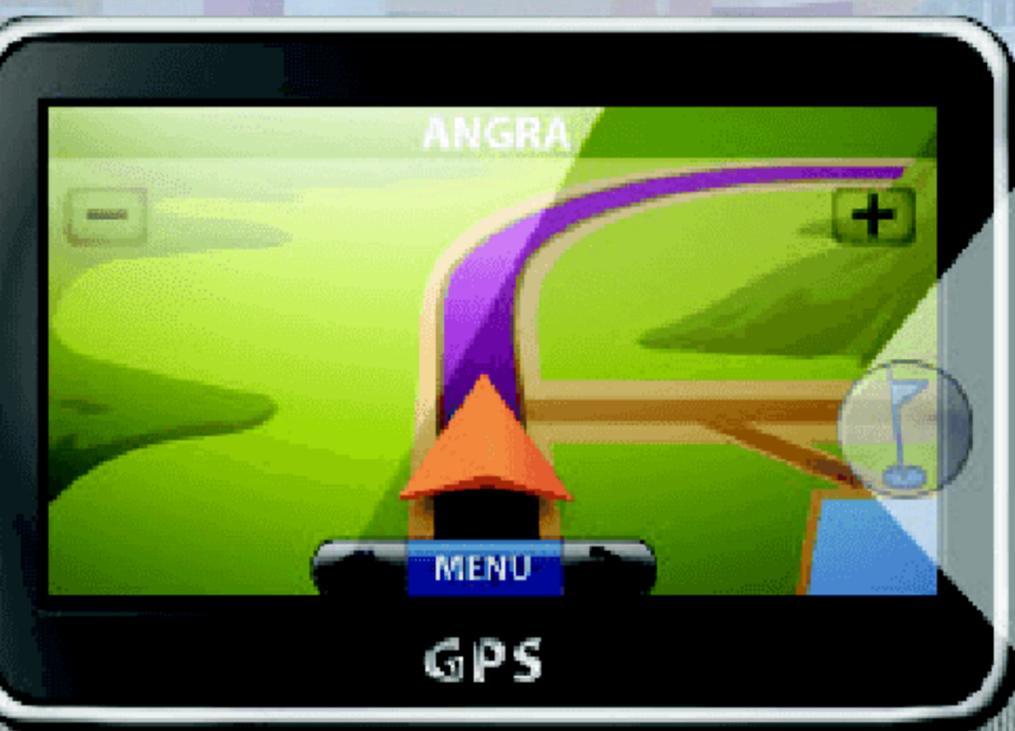
Na transição indicada ($E_3 \rightarrow E_2$), um fóton de energia:

- (a) 1,9 eV é emitido.
- (b) 1,9 eV é absorvido.
- (c) 4,9 eV é emitido.
- (d) 4,9 eV é absorvido.
- (e) 3,4 eV é emitido.

Teoria da Relatividade Restrita de Einstein

5

As duas figuras mostram exemplos em que as teorias desenvolvidas por Albert Einstein, no início do século XIX, são aplicadas. Observamos um receptor de GPS (*Global Positioning System*), equipamento extremamente útil para a orientação das pessoas nas modernas cidades e muito utilizado em viagens. O receptor de GPS recebe informações através de satélites que estão localizados a certa distância da Terra, onde o campo gravitacional é mais fraco. Além disso, os satélites se movimentam em relação à Terra. Desse modo, a base de tempo dos satélites tem que ser corrigida utilizando-se a teoria da relatividade.



Equipamento de recepção GPS.

A partir da localização do GPS, observamos a usina nuclear de Angra dos Reis, onde se tem um reator de fissão nuclear. Em processos de fissão, observa-se que a massa dos produtos da reação nuclear é menor do que a massa dos reagentes dessa mesma reação. A diferença de massa explica-se pela equação de Einstein: $E = mc^2$, que estabelece a relação de conservação de massa de energia.

Usina nuclear de Angra dos Reis.

Esses conceitos são pouco intuitivos, porém o seu estudo é fascinante. Em nosso mundo, cada vez mais invenções utilizar-se-ão desses conhecimentos, e, por consequência, estarão mais presentes no cotidiano das pessoas.

Introdução

Na definição do dicionário *Aurélio*, paradigma é um exemplo que serve como modelo, padrão. Nossa percepção do mundo é baseada em nossos paradigmas, ou seja, os modelos que desenvolvemos ao longo de nossa vida. Assim também é na Física. Ao longo dos capítulos anteriores, vários paradigmas foram quebrados, tais como o da quantização da energia e o da relação entre energia e frequência.

Mas é na teoria da relatividade restrita que paradigmas profundos são quebrados, pois Einstein questiona o absolutismo do tempo e do espaço. Em nosso dia a dia, o tempo é algo que não se questiona, o seu desenrolar inexorável é o mesmo para todos. Afinal, todos temos 24 horas por dia. Será isso uma verdade inquestionável?

O referencial inercial

Quando *Sir* Isaac Newton, ainda no século XVII, publicou o que talvez tenha sido o mais importante livro científico na história da Física, o *Philosophiae naturalis principia mathematica (Princípios matemáticos da filosofia natural)*, ele estabeleceu alguns dos conceitos fundamentais sobre os quais toda a mecânica clássica se baseia e que tiveram profundos impactos nas ciências dos séculos seguintes. Dois desses princípios são:

- O absolutismo do tempo, ou seja, o tempo é absoluto e homogêneo. No *Principia*, lemos: “o tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, sem referência a qualquer coisa externa, flui uniformemente.”
- O absolutismo do espaço, ou seja, o espaço não é alterado por fatores externos e permanece imóvel. Ainda no *Principia*, podemos ler: “O espaço absoluto, por sua própria natureza e sem referência a nada externo, permanece homogêneo e imóvel.”

Esses dois conceitos formam a base para o que conhecemos como leis da mecânica:

- Inércia – todo corpo mantém-se em repouso ou em movimento retilíneo uniforme caso a resultante das forças que nele agem seja nula.
- A força que age em um corpo é igual ao produto da sua massa pela aceleração nele impressa. Essa afirmação pode ser escrita como:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

ATENÇÃO!

Nessa formulação da Segunda Lei de Newton, estamos desconsiderando sistemas de massa variável, como foguetes.

- Quando um corpo A exerce uma força sobre um corpo B, o corpo B exerce em A uma força de mesma direção, mesmo módulo, mas de sentido oposto.

A mecânica clássica apresentou um enorme avanço no entendimento do universo. Ela era capaz de calcular as órbitas dos planetas. Foi uma poderosa ferramenta no projeto de máquinas e de estruturas, ou seja, um enorme sucesso.

No estudo do movimento dos corpos, no qual as leis da mecânica são aplicadas, são de fundamental importância os conceitos de posição e trajetória. Para definirmos tais grandezas, é necessário um sistema de referência a fim de que o movimento possa ser nele descrito. Nesse trabalho, usaremos um sistema cartesiano de coordenadas (x, y, z) , em que consideraremos válida a geometria euclidiana.

Assim, a pergunta que nos vem é: As leis de Newton são válidas para qualquer referencial?

Para responder a essa pergunta, imaginemos uma situação em que uma pessoa se encontra em um vagão acelerado. Ela observa um livro situado sobre uma mesa, supostamente lisa, e verifica que este se movimenta em relação ao vagão aparentemente sem estar sob a ação de nenhuma força. Isso estaria violando a Primeira Lei de Newton, certo? Assim, não se pode afirmar que as leis da mecânica são válidas para qualquer referencial.

Os referenciais para os quais são válidas as três leis de Newton são denominados inerciais. A determinação de um referencial inercial não é muito simples. No caso da Terra, como a sua aceleração é baixa, podemos considerar, dentro de um nível aceitável de precisão, que um laboratório preso à Terra é um bom referencial inercial. Caso queiramos um referencial inercial melhor, poderemos colocá-lo nas estrelas ou mesmo nas galáxias.

A relatividade de Galileu

Imagine a situação em que uma pessoa encontra-se no interior de um vagão que está em movimento retilíneo e uniforme. Será que existe alguma experiência envolvendo as leis mecânicas que possam identificar se a pessoa está em movimento ou repouso?

A figura a seguir ilustra a situação em que o vagão, no qual há um sistema referencial $R'(x', y', z')$, movimenta-se com velocidade \vec{v} , paralelamente ao eixo x de um referencial $R(x, y, z)$.

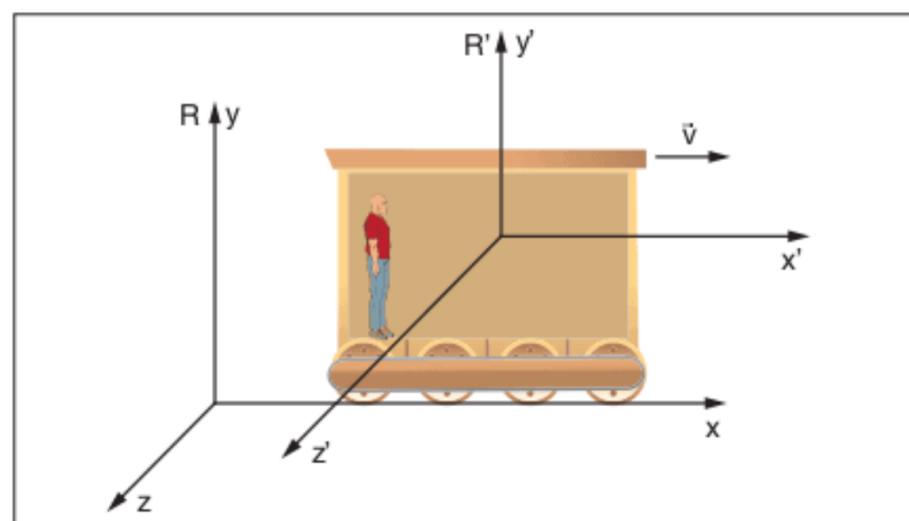


Fig. 1 Observador em MU em relação a um referencial xyz.

Vamos supor que um dado evento ocorra na posição (x_1, y_1, z_1) em relação ao referencial R , no instante $t = t_0$. Para o observador dentro do vagão, que no instante $t = 0$ encontrava-se na origem, as coordenadas (x', y', z') do evento são:

$$x' = x_1 - v \cdot t_0$$

$$y' = y_1$$

$$z' = z_1$$

Observe que o conceito de espaço e tempo absolutos estão presentes. Dessa forma, qualquer referencial que se movimenta em MRU em relação a outro referencial inercial também será um referencial inercial, aqui chamado referencial de Galileu.

O que é interessante, e também é o que determina a relatividade de Galileu, é que as leis da mecânica são invariantes, ou seja, são as mesmas quando transformadas de um referencial inercial para outro. Assim, não dá para saber se estamos em repouso ou em movimento com qualquer experiência da mecânica, desde que estejamos em um referencial inercial. Poderíamos jogar pingue-pongue no vagão do início do tópico e o transcorrer da partida seria exatamente igual ao que teríamos na Terra.

Porém, como sempre acontece no evoluir da ciência, o século XIX trouxe uma série de novas constatações experimentais, que questionaram seriamente a relatividade de Galileu.

O eletromagnetismo de Maxwell

Um importante desafio à relatividade de Galileu ocorreu no século XIX quando o físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) publicou um trabalho no qual apresentava um conjunto de equações que unificaram a eletricidade e o magnetismo e, entre outros resultados, mostrava que a luz era uma onda eletromagnética, sendo capaz de prever a sua velocidade com grande precisão. Na teoria de Maxwell, a velocidade da luz no vácuo era dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1)$$

Na equação acima, μ_0 e ϵ_0 são, respectivamente, a permeabilidade magnética e a permissividade elétrica do vácuo.

O problema que se apresentou foi: as leis da eletricidade, conforme colocadas por Maxwell, não eram invariantes na transformação de Galileu, isto é, era possível, por meio de uma experiência eletromagnética, determinar se havia movimento ou repouso.

Uma das situações que mostram o problema pode ser vista na figura 2.

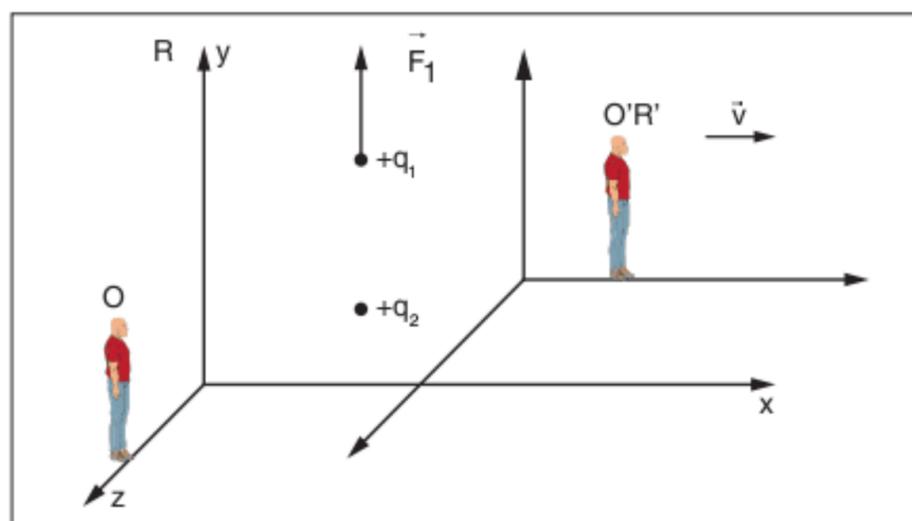


Fig. 2 Paradoxo que surge da relatividade de Galileu para o eletromagnetismo.

Um observador O, postado no referencial R, observa as duas cargas q_1 e q_2 , de mesmo sinal, em repouso em relação a ele, e afirma que a força resultante na carga q_1 é a força elétrica \vec{F}_1 .

Já o observador O' que se encontra no referencial R', que se movimenta em relação a R para a direita com velocidade \vec{v} , afirma que a resultante das forças que agem em q_1 é igual a \vec{F}_1 menos a força magnética que surge quando duas cargas elétricas de mesmo sinal se movimentam na mesma direção e sentido. Dessa forma, ele calcula uma resultante cujo módulo é menor do que a resultante calculada pelo observador O colocado no referencial R.

Do observado anteriormente, pode-se inferir que:

- a relatividade de Galileu não se aplica a fenômenos eletromagnéticos e, nesse caso, deverá haver um referencial inercial absoluto para o eletromagnetismo; ou
- a relatividade de Galileu está correta, porém a formulação de Maxwell está errada e precisa ser revista; ou
- a teoria eletromagnética de Maxwell está correta, porém as bases da mecânica clássica e a relatividade de Galileu estão erradas e precisam ser corrigidas para levar a uma relatividade mais ampla.

A hipótese b (formulação incorreta de Maxwell) não resiste a observações experimentais que comprovam o seu grande sucesso na explicação de diversos fenômenos relacionados ao comportamento de ondas eletromagnéticas, bem como à construção de dispositivos onde essas ondas poderiam ser geradas e irradiadas.

Assim sendo, inicialmente a comunidade científica se apegou à opção a (criação de um referencial absoluto para o magnetismo). O próprio Maxwell afirmava que a velocidade da luz era medida em relação a um referencial inercial absoluto: o éter. O éter era um meio com propriedades bastante peculiares: preenchia todo o universo, não possuía massa, devia ser bastante elástico para permitir que a velocidade da luz fosse altíssima e deveria ser imperceptível. Com certeza um meio, no mínimo, curioso.

Assim, como em qualquer ramo da Física, o éter deveria passar por testes experimentais que comprovassem a sua existência. Foi exatamente isso que ocorreu no final do século XIX com os experimentos de Michelson e Morley.

O experimento de Michelson e Morley



Fig. 3 Albert Abraham Michelson (1852-1931). Prêmio Nobel de Física em 1907 pela invenção do interferômetro e por suas pesquisas feitas no campo da espectroscopia e da meteorologia.

Para entender a importância do experimento dos físicos Michelson e Morley, imaginemos a situação em que um carro em movimento emite uma onda sonora em um ar em repouso para um observador também em repouso.

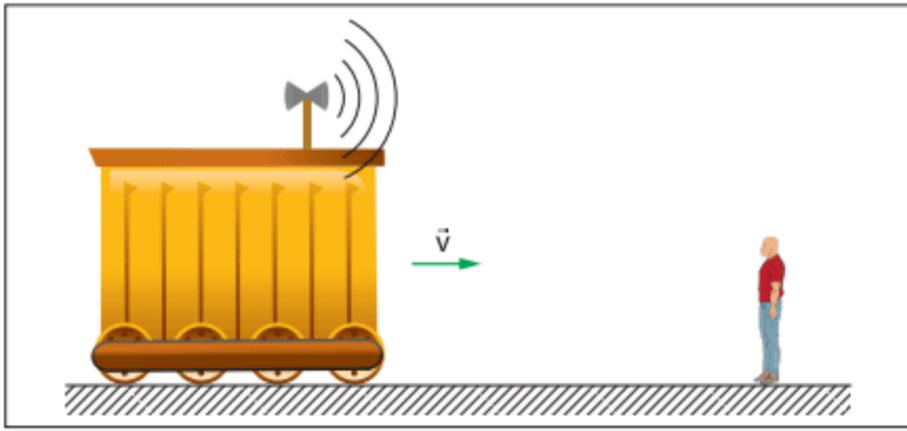


Fig. 4 Fonte sonora movendo-se em relação ao observador.

É sabido que a velocidade da fonte não irá interferir na velocidade do som em relação ao ar, pois esta velocidade é função somente das propriedades físicas do ar. Estando o observador em repouso, a velocidade do som em relação ao observador ($v_{s,o}$) será igual à velocidade do som em relação ao ar ($v_{s,a}$).

Todavia, se o observador se movimentar em relação à fonte, haverá a necessidade de se computar a velocidade do observador em relação ao ar ($v_{o,a}$) para determinar a velocidade do som em relação ao observador.

Assim sendo, se o observador se desloca na direção da fonte, como na figura a seguir, tem-se que:

$$v_{s,o} = v_{s,a} + v_{o,a}$$

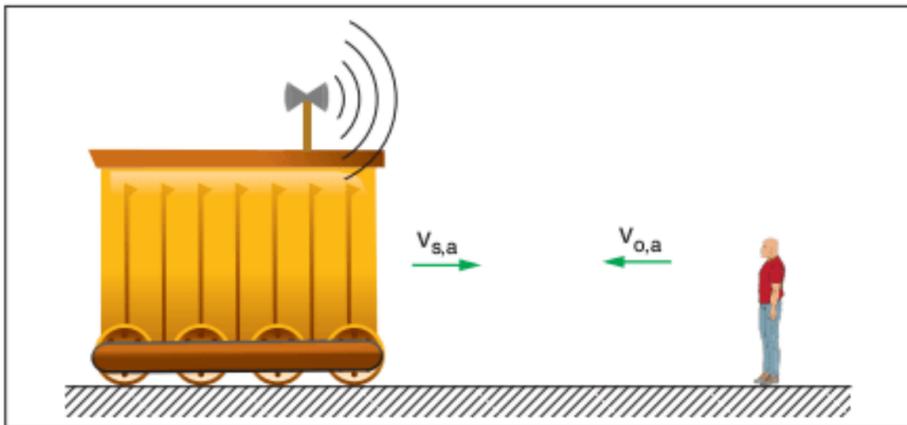


Fig. 5 Observador e fonte sonora em sentidos opostos.

Caso o observador se desloque no sentido contrário ao da fonte, podemos escrever que:

$$v_{s,o} = v_{s,a} - v_{o,a}$$

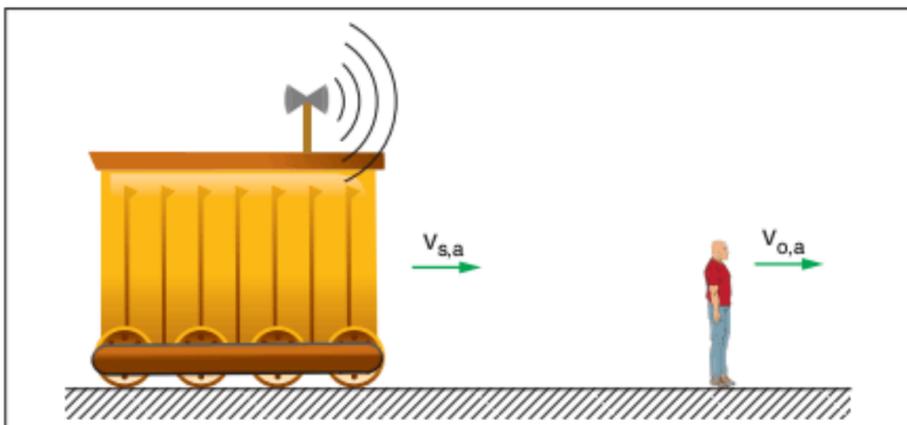


Fig. 6 Observador e fonte sonora no mesmo sentido.

Assim, efeito parecido deveria ocorrer quando a Terra se movesse em relação ao éter, considerando que a luz tem em relação ao éter o mesmo comportamento que as ondas mecânicas

têm em relação ao ar, consideração esta feita por Maxwell e por todos os defensores do éter. Dessa forma, para se determinar a velocidade da luz para um observador fixo na Terra, a velocidade da Terra em relação ao éter deveria ser computada e capaz de ser calculada com um experimento.

Foi exatamente isso que o físico Albert Michelson (1852-1931) e o químico-físico Edward Morley (1838-1923) objetivaram com a sua experiência, cuja montagem pode ser observada na figura a seguir.

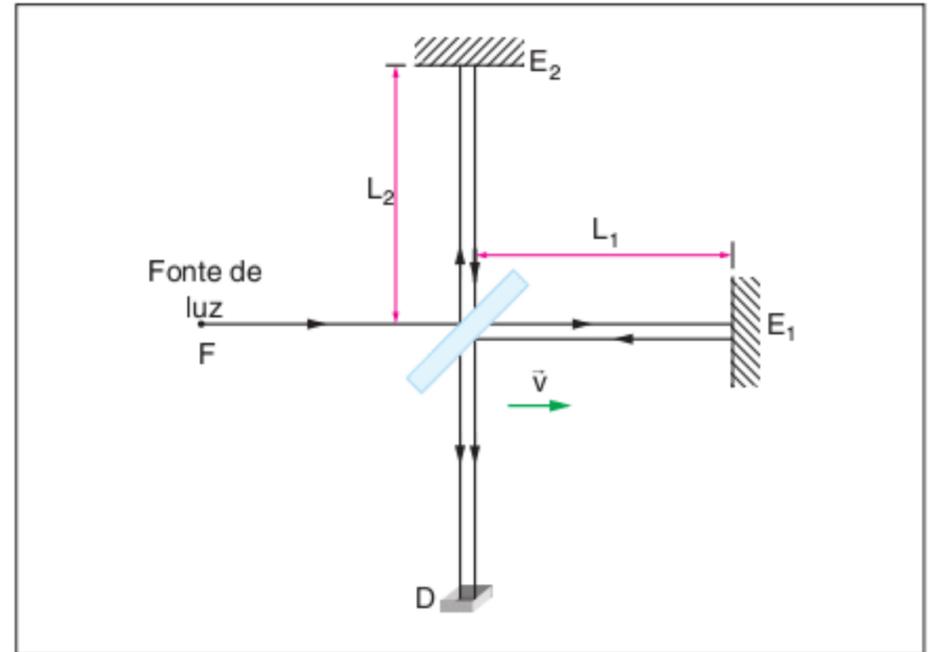


Fig. 7 Montagem experimental de Michelson e Morley.

Na figura 7, a luz é emitida pela fonte de luz F e incide no espelho semitransparente E_0 . Uma parte do feixe vai para o espelho E_1 , no braço de comprimento L_1 , nele refletindo e tornando a E_0 . O outro feixe vai para o espelho E_2 através do braço de comprimento L_2 , nele refletindo e também retornando a E_0 . Os dois raios se recombinaem em E_0 e incidem no detector D.

Supondo que a Terra esteja se deslocando em relação ao éter com velocidade \vec{v} , conforme a figura 7, para o raio que incide no espelho E_1 , tem-se que o tempo necessário para ele retornar ao espelho E_0 é tal que:

$$T_1 = \frac{L_1}{c-v} + \frac{L_1}{c+v} = \frac{2 \cdot L_1}{(c^2 - v^2)} = \frac{2 \cdot L_1}{c \left[1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

Para o raio que descreve o braço L_2 perpendicular à velocidade \vec{v} da Terra em relação ao éter, a trajetória descrita pode ser vista na figura a seguir.

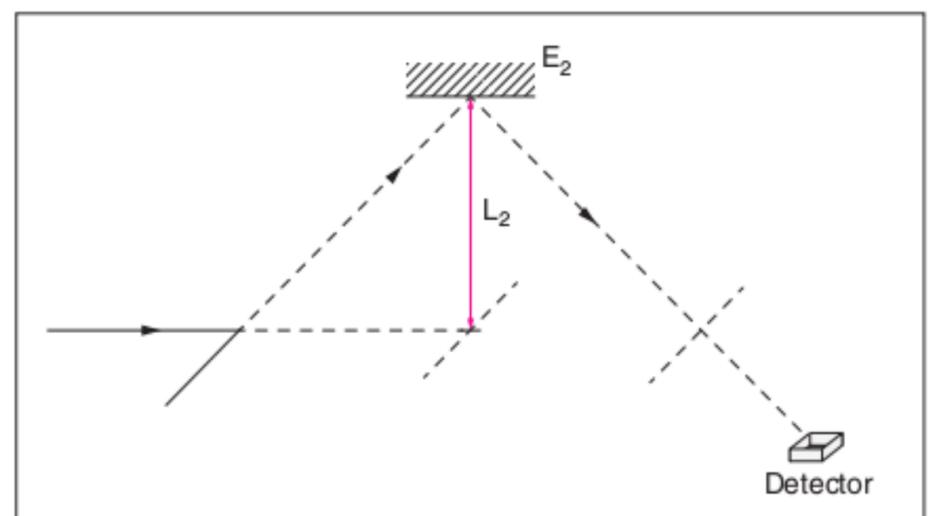


Fig. 8 Trajetória da luz do experimento de Michelson e Morley.

O tempo necessário para percorrer o braço L_2 , incidir no espelho E_2 e retornar a E_0 é dado por:

$$T_2 = \frac{2 \cdot L_2}{\sqrt{v^2 + c^2}} = \frac{2 \cdot L_2}{c \cdot \left[1 + \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

Assim, era de se esperar que houvesse um descasamento temporal entre os raios provenientes dos 2 braços, gerando, então, no detector D, uma figura de interferência; sendo este o mesmo princípio das franjas de interferência do experimento de Young. Girando a montagem em 90° , devido aos tamanhos ligeiramente diferentes dos braços, a figura de interferência deveria se alterar, provando o movimento da Terra em relação ao éter. Para o espanto da comunidade científica, nenhuma alteração foi observada dentro do erro do experimento. A experiência foi repetida diversas vezes em ocasiões diferentes sempre com o mesmo resultado.

A conclusão que muitos relutaram em aceitar, dentre eles Lorentz e Fitzgerald, é de que a hipótese c (a teoria eletromagnética de Maxwell estava correta, mas a mecânica de Newton e a relatividade de Galileu precisavam ser corrigidas) era a direção correta a ser tomada.

Em relação a Lorentz e Fitzgerald, apesar de a hipótese do éter não ser viável diante das conclusões do experimento de Michelson e Morley, os resultados que chegaram foram surpreendentes. Eles supunham que os corpos poderiam sofrer contrações na direção de deslocamento, o que explicava a ausência de mudança na figura de interferência quando se girava o interferômetro em 90° .

Em 1905, ano miraculoso de Einstein, ele propõe uma teoria baseada em dois pressupostos que, alicerçados na verificação experimental, causariam um grande impacto na Física, gerando uma nova e mais ampla relatividade.

A teoria da relatividade restrita de Einstein – Fundamentos

Suponha que você se encontre parado ao lado de uma linha de ferro. No instante em que o seu cronômetro é disparado, você acende uma lanterna apontando-a na mesma direção e no mesmo sentido de um trem que acaba de passar pela linha de ferro, movendo-se com a assustadora velocidade de 10^8 m/s. A situação é descrita na figura a seguir.

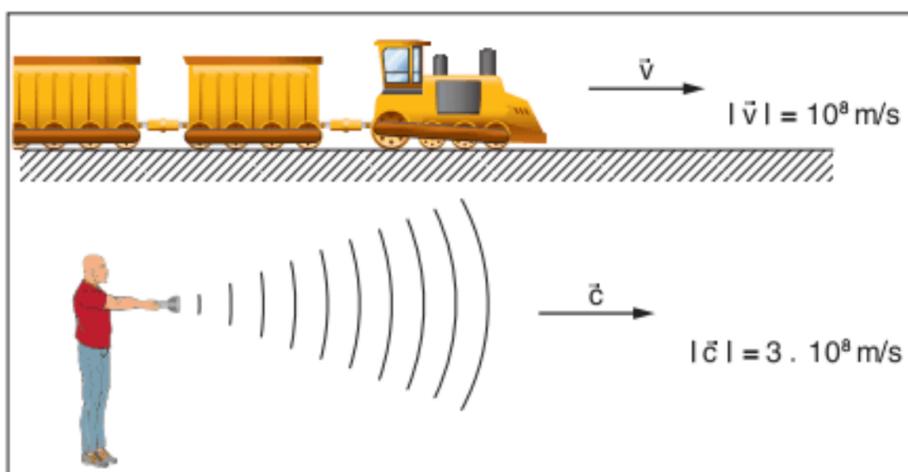


Fig. 9 Invariância da velocidade da luz.

Supondo a velocidade da luz igual a $3 \cdot 10^8$ m/s, para o observador que se encontra parado, pode-se dizer que a frente de onda afasta-se dele com essa velocidade; porém, considerando o tempo absoluto e a *transformação galileana*, para um observador que se encontra dentro do trem, a velocidade com a qual a frente de onda se moveria seria de $(3 - 1) \cdot 10^8$ m/s ou $2 \cdot 10^8$ m/s, ou seja, a velocidade da luz para o observador do trem seria dependente de sua própria velocidade.

A conclusão acima, baseada em nossas próprias experiências, contradiz com as observações de Michelson e Morley, que garantem a invariância da velocidade da luz.

ATENÇÃO!

Assim sendo, para o observador dentro do trem, a velocidade da luz continua sendo de $3 \cdot 10^8$ m/s. Não é possível chegarmos a esse resultado se não abrimos mão do tempo e do espaço absolutos.

A teoria da relatividade restrita – Postulados

Para chegar ao entendimento de tempo e espaço não absolutos, Einstein enunciou dois postulados para a teoria da relatividade restrita, dos quais decorrem todas as demais conclusões de sua formulação teórica.

1º Postulado:

As leis da Física são invariantes para qualquer referencial inercial. Não existe referencial inercial preferencial.

Já se sabia, desde há muito tempo, que as leis da mecânica, tais como conservação de momento e de energia, eram invariantes para qualquer referencial inercial. O que Einstein propôs foi que as leis da teoria eletromagnética fossem invariáveis para qualquer referencial inercial.

2º Postulado:

A velocidade da luz é a mesma em todos os referenciais inerciais.

Uma das primeiras conclusões que podemos extrair desses dois postulados é que nenhum corpo pode superar a velocidade da luz. Porém, se pensarmos que os corpos têm massa constante, o que impede de os acelerarmos continuamente e assim atingirmos a velocidade da luz?

A resposta é que a massa relativística é função da velocidade, ou seja, a nossa massa relativística em repouso não é a mesma em movimento. A massa relativística cresce com a velocidade, tendendo a infinito quando a velocidade do corpo se aproxima da velocidade da luz. Dessa forma, é impossível acelerar o corpo até a velocidade da luz, pois a massa tende a infinito nessa velocidade. A relação entre as massas em repouso (m_0) e em movimento (m) é dada por:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2}} \quad (4)$$

Na equação (4), v é a velocidade do corpo em relação ao referencial inercial e c é a velocidade da luz no vácuo.

A dilatação do tempo e a contração do espaço

Voltando ao problema do trem, a única solução para que as velocidades da luz sejam iguais para ambos os referenciais é que a medida de espaço e a de tempo para os dois referenciais sejam diferentes, *ou seja, o espaço e o tempo são relativos e dependem do referencial*. Esta afirmação pode ser escrita matematicamente por:

$$c = \frac{s_{\text{luz-estrada}}}{t_{\text{estrada}}} = \frac{s_{\text{luz-trem}}}{t_{\text{trem}}} \quad (5)$$

Por meio da transformação de Galileu, a equação (5) não tem solução, pois:

$$\begin{aligned} s_{\text{luz-estrada}} &= c \cdot t_{\text{estrada}} \\ s_{\text{luz-trem}} &= (c - v) t_{\text{trem}} \end{aligned} \quad (6)$$

e,

$$t_{\text{trem}} = t_{\text{estrada}} \quad (7)$$

A equação (7) estabelece que o tempo é absoluto. A equação (5) só tem solução se a transformação de Galileu não for válida e se o tempo não for absoluto. Como afirmado anteriormente, Lorentz e Fitzgerald, na tentativa de salvar o modelo do éter, propuseram que o espaço e o tempo sofriam alterações no deslocamento da terra através do fluido. Propuseram também as seguintes transformações, válidas para o sistema de coordenadas mostrado a seguir.

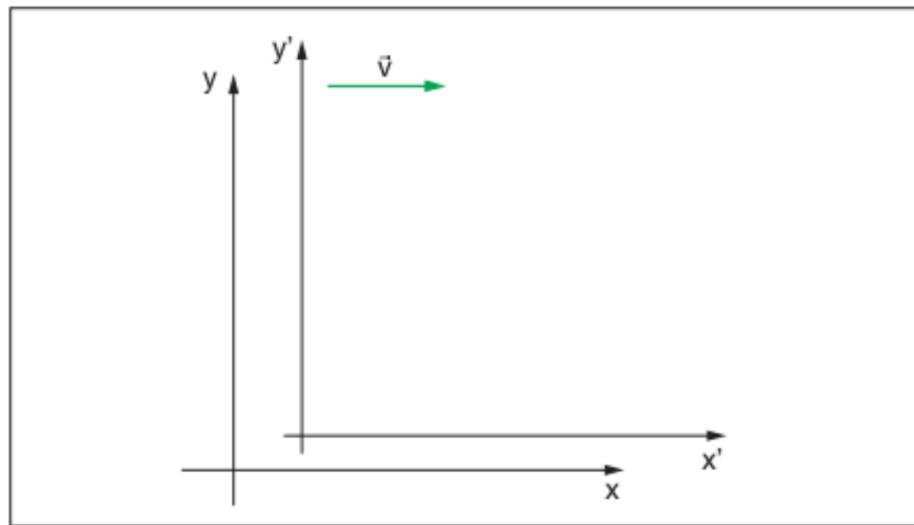


Fig. 10 O referencial $x'y'$ move-se com movimento uniforme em relação ao referencial xy .

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (8)$$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (9)$$

As equações anteriores, conhecidas como transformações de Lorentz-Fitzgerald, relacionam a coordenada espacial x e x' dos dois referenciais, bem como o tempo t e t' para os dois referenciais. Uma primeira observação nos indica que se a velocidade é baixa, o que ocorre nas nossas experiências diárias,

valem as transformações de Galileu e o tempo para os dois referenciais é o mesmo, ou seja, o tempo é absoluto. Mas à medida que a velocidade aumenta, o fator $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$ passa a exercer um papel fundamental.

Passemos agora a demonstrar as relações de Lorentz e Fitzgerald. Por meio dessa demonstração chegaremos a conclusões importantes sobre o tempo e o espaço relativísticos. Suponha um vagão de um trem, como o mostrado na figura 11, que se desloca para a direita em movimento uniforme, com velocidade v . Na parte inferior do vagão, há uma fonte de luz e, na parte superior, um espelho. O experimento consiste em medir o tempo que o feixe óptico leva para subir, refletir no espelho e novamente descer para a fonte de luz.

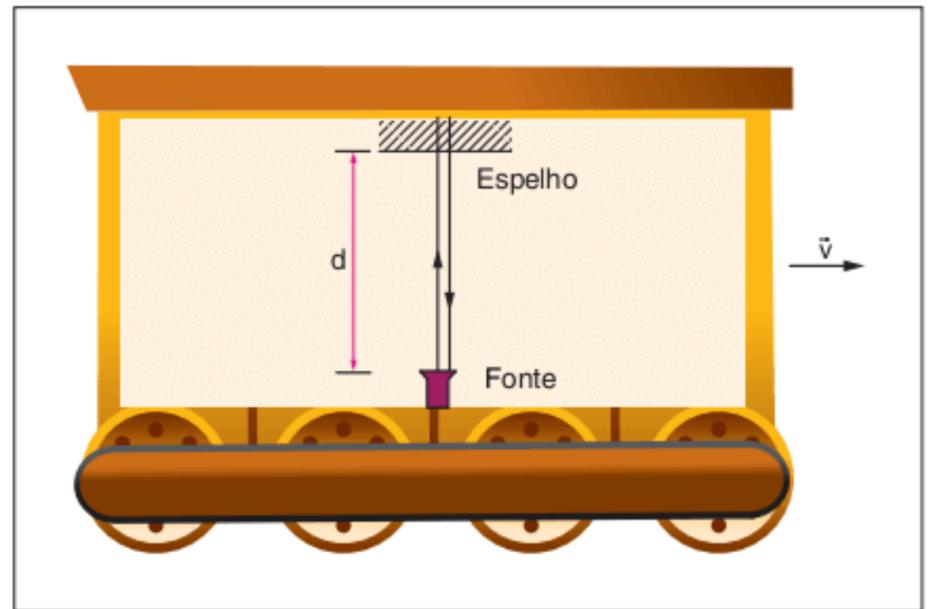


Fig. 11 Feixe para um referencial solidário ao trem.

Para um observador no interior do vagão, o tempo de subida e descida do feixe óptico é dado por:

$$\Delta t_{\text{vagão}} = \frac{2 \cdot d}{c} \quad (10)$$

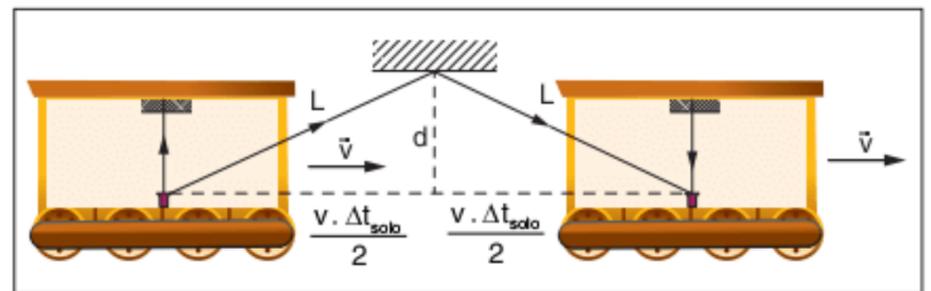


Fig. 12 Feixe para um referencial externo ao trem.

Para um observador no exterior do vagão e em repouso em relação ao solo, o tempo de subida e descida do feixe óptico é dado por:

$$\Delta t_{\text{solo}} = \frac{2 \cdot L}{c} \quad (11)$$

Sendo a velocidade da luz constante para qualquer referencial inercial, fica claro que os relógios para observadores situados em referenciais diferentes marcam o tempo de maneira diferente. O que se conclui é que:

$$\text{se } d < L \rightarrow \Delta t_{\text{vagão}} < \Delta t_{\text{solo}}$$

Dilatação do tempo:

Para referenciais em movimento, o tempo passa mais lentamente, ou seja, o tempo sofre uma dilatação.

A partir dessa conclusão, é possível estabelecer uma relação entre a variação de tempo observada por um observador no vagão e a no solo. Pela figura, podemos escrever que:

$$\Delta t_{\text{vagão}} = \frac{2 \cdot d}{c}$$

$$\Delta t_{\text{solo}} = \frac{2 \cdot L}{c} \rightarrow \Delta t_{\text{solo}} = \frac{2}{c} \cdot \sqrt{d^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t_{\text{solo}}}{2}\right)^2}$$

$$\frac{\Delta t_{\text{vagão}}}{\Delta t_{\text{solo}}} = \frac{\frac{2 \cdot d}{c}}{\frac{2}{c} \cdot \sqrt{d^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t_{\text{vagão}}}{2}\right)^2}} \rightarrow$$

$$\frac{\Delta t_{\text{vagão}}}{\Delta t_{\text{solo}}} = \frac{2 \cdot \cancel{c} \cdot \Delta t_{\text{vagão}}}{\cancel{c} \cdot 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{c \cdot \Delta t_{\text{vagão}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{v \cdot \Delta t_{\text{solo}}}{2}\right)^2}}$$

$$\frac{\Delta t_{\text{vagão}}}{\Delta t_{\text{solo}}} = \frac{\Delta t_{\text{vagão}}}{\Delta t_{\text{vagão}} \sqrt{1 + \left(\frac{v \cdot \Delta t_{\text{solo}}}{c \cdot \Delta t_{\text{vagão}}}\right)^2}} \rightarrow$$

$$\left(\frac{\Delta t_{\text{solo}}}{\Delta t_{\text{vagão}}}\right)^2 = 1 + \left(\frac{\Delta t_{\text{solo}}}{\Delta t_{\text{vagão}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

Finalmente,

$$\boxed{\Delta t_{\text{solo}} = \frac{\Delta t_{\text{vagão}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}} \quad (12)$$

Nesse ponto, podemos inserir os conceitos de tempo próprio e medida própria. A medida própria de uma grandeza é aquela realizada quando o objeto da medida está em repouso em um dado referencial. Assim, a medida Δt_{solo} , realizada pelo observador no solo, é uma medida não própria Δt , pois a montagem no interior do vagão se movimenta em relação a ele. Porém, para o observador no interior do vagão, a medida $\Delta t_{\text{vagão}}$ torna-se uma medida própria Δt_p , pois a montagem não se movimenta em relação a ele. Assim, levando-se em conta a equação obtida anteriormente, tem-se que:

$$\underbrace{\Delta t}_{\text{Medida não própria}} = \frac{\overbrace{\Delta t_p}^{\text{Medida própria}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Dilatação do tempo:

Relógios em movimento medem a duração de eventos mais vagorosamente do que relógios em repouso. Os relógios em movimento atrasam-se.

Uma outra consequência dos postulados de Einstein é que a medida de distâncias também torna-se diferente para dois referenciais. Considere um vagão que se movimenta com velocidade constante \vec{v} em relação a um outro referencial. A fim de medir o comprimento do vagão, dois observadores, um no interior do vagão e o outro fixo no referencial em relação ao qual se movimenta o vagão, podem utilizar-se de um ponto fixo R na estrada, de tal modo que os seus relógios serão disparados no momento em que a parte frontal do vagão tocar o ponto de referência e serão parados no momento em que a parte de trás do vagão tocar o ponto de referência. Isso pode ser observado na figura a seguir.

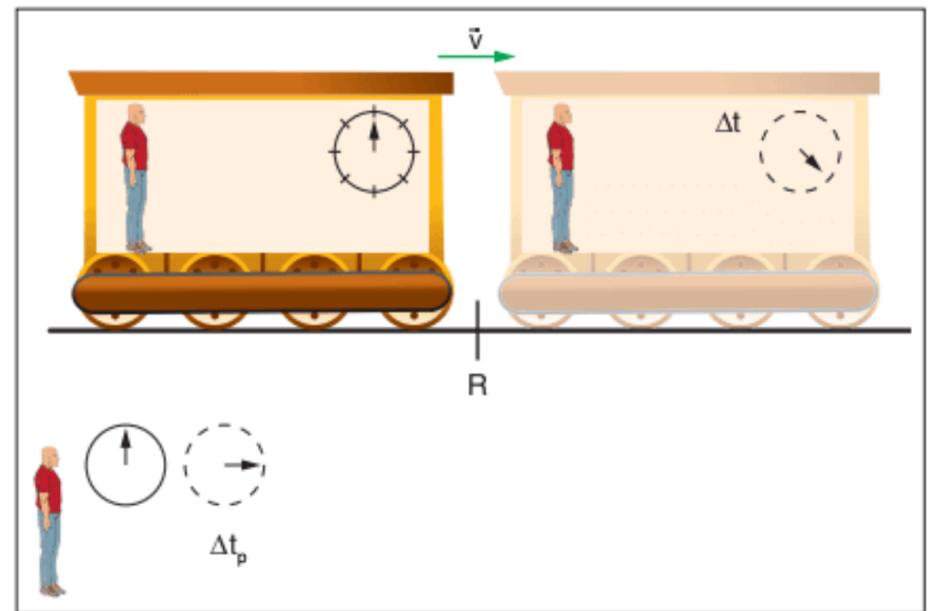


Fig. 13 Contração do espaço.

Como o ponto R encontra-se em movimento em relação ao observador no interior do vagão, sua medida é não própria; portanto, para ele, o comprimento do trem é:

$$L = v \cdot \Delta t$$

Para o observador fora do vagão, o ponto R encontra-se em repouso, logo, a sua medida é própria e o comprimento do trem L' medido por ele é:

$$L' = v \cdot \Delta t_p$$

Dessa forma, dividindo as equações obtidas para L' e L , tem-se que:

$$\frac{L'}{L} = \frac{v \cdot \Delta t_p}{v \cdot \Delta t} = \frac{\Delta t_p}{\Delta t}$$

Da relação entre Δt e Δt_p obtida anteriormente, podemos escrever que:

$$\frac{L'}{L} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \rightarrow L' = L \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (13)$$

A análise também poderia ser feita pensando que o observador no interior do vagão mede o comprimento L utilizando uma régua que se encontra em repouso em relação ao vagão, enquanto o observador que se encontra fora do vagão teria

que utilizar uma outra régua, agora em movimento, para medir o comprimento L' do vagão. Dessa forma podemos concluir que réguas em movimento se contraem.

Contração do espaço:

Réguas em movimento medem comprimentos menores do que réguas em repouso.

ATENÇÃO!

É muito importante ressaltar que quando a velocidade v é muito menor que a velocidade da luz, caso da maior parte dos fenômenos do nosso dia a dia, tem-se que os postulados da mecânica newtoniana tornam-se praticamente válidos, pois:

$$\Delta t_{\text{vagão}} \approx \Delta t_{\text{solo}} \text{ e}$$

$$\Delta x_{\text{vagão}} \approx \Delta x_{\text{solo}}$$

Destaca-se que não existe, portanto, referencial preferencial, pois, para o referencial S' , o referencial S é que se movimenta em sentido contrário com velocidade v , sendo, portanto, todas as relações válidas também para o referencial S' em relação ao referencial S .

A contração de comprimento foi verificada, por exemplo, no projeto do acelerador linear de elétrons da Universidade de Stanford. Para uma velocidade de saída dos elétrons $v = 0,999975 c$, cada metro do tubo acelerador parece ter 7,1 mm para um observador movendo-se com o elétron. Se essas considerações sobre a contração do espaço não fossem levadas em conta, não haveria condições de essas máquinas funcionarem.

Uma interessante ilustração da compressão do tempo é o paradoxo dos irmãos gêmeos. Suponha que dois irmãos gêmeos encontrem-se no planeta Terra com 10 anos de idade. Um deles irá realizar uma viagem espacial a uma velocidade de $0,99 c$, com duração de 10 anos, tempo da nave, e o outro irá permanecer na Terra. Muito surpreso estará o viajante espacial quando encontrar o seu irmão com bem mais de 20 anos, pois:

$$\Delta t_{\text{Terra}} = \frac{\Delta t_{\text{Nave}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{10}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,99c}{c}\right)^2}} \approx 70,8 \text{ anos}$$

Assim, ao retornar para a Terra de sua viagem espacial, encontrará o seu irmão, que aqui ficou, como um senhor de quase 81 anos de idade.

Podemos também observar a contração do espaço, pois uma distância que para o irmão na Terra seria igual a aproximadamente 70 anos-luz, para o observador dentro da nave é de aproximadamente 9,9 anos-luz.

Os fatos físicos anteriormente mencionados, a contração do espaço e a dilatação do tempo, são os argumentos utilizados pelo eminente cientista do século XX Carl Sagan, para afirmar sobre a possibilidade de viagens intergalácticas no futuro. Imaginando o diâmetro da Via Láctea em 100 mil anos-luz, um viajante, a uma velocidade de $0,999999975 c$, demoraria, considerando um relógio na nave, um tempo igual a aproximadamente 22 anos, tornando possível o conhecimento de toda

a Via Láctea, porém, ao retornar ao nosso planeta, 100 mil anos teriam se passado. Será que estamos prontos para essa surpresa?

Outra importante comprovação experimental da Teoria da Relatividade Restrita é feita através da detecção de mésons μ (múons), que são partículas subatômicas que surgem na atmosfera terrestre devido a raios cósmicos que chegam à Terra. Esses múons surgem na atmosfera em torno de 9.000 m de altitude possuindo velocidades na ordem de $0,998 c$ e com um tempo de duração (meia-vida) de $2 \mu\text{s}$. Assim, de acordo com a mecânica newtoniana na qual o tempo é absoluto, eles deveriam percorrer uma distância $d = 0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 600 \text{ m}$ antes de desaparecerem. Consequentemente, eles não chegariam à superfície da Terra. Porém, o que se verifica na prática é que muitos múons chegam à superfície da Terra. Como explicar?

De fato, a Teoria da Relatividade Restrita consegue explicar adequadamente a incidência dessas partículas na superfície terrestre. Podemos analisar o problema do ponto de vista de um observador no múon. Para ele, a distância a ser percorrida até a superfície da Terra sofreria uma contração, tal que:

$$h' = h \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = 9.000 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,998c}{c}\right)^2} \approx 568 \text{ m}$$

O valor obtido acima é muito próximo do valor obtido anteriormente para a mecânica newtoniana. Assim, para o múon, é como se a altura a cair fosse bem menor do que a distância observada por alguém na Terra. Houve uma contração do espaço.

Outra maneira de entender o fenômeno é imaginar que, sendo o tempo de meia-vida do múon na Terra igual a $2 \mu\text{s}$, o tempo de meia-vida, medido no referencial da partícula, é igual a:

$$\Delta t_{\text{múon}} = \frac{\Delta t_{\text{terra}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \rightarrow \Delta t_{\text{múon}} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,998c}{c}\right)^2}} = 3,16 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Nesse tempo, a distância percorrida pelo múon seria igual a:

$$h = 0,998 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 3,16 \cdot 10^{-5} = 9.472 \text{ m}$$

O resultado concorda bastante com o valor da altura onde os múons aparecem em média. Esta foi a primeira importante comprovação experimental da **Teoria da Relatividade Restrita** de Einstein.

Dinâmica relativística

Ao afirmar o princípio da invariância da velocidade da luz, fica claro a necessidade de redefinirmos o conceito de massa inercial, tal como se observa a seguir.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (14)$$

É importante observar que não há alteração da quantidade de matéria. É a inércia do corpo que se altera com o aumento da velocidade.

Dessa definição de massa, tem-se, então, a famosa, mas nem sempre compreendida, expressão da energia relativística de Einstein.

$$E = m \cdot c^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \cdot c^2 \quad (15)$$

Essa expressão nos permite compreender e entender dois princípios que durante muito tempo foram cruciais para a Física. Os princípios da conservação de massa e da conservação de energia. O que Einstein nos mostra por meio dessa equação é a conservação da massa e da energia simultaneamente.

Sem essa equação, é impossível compreender fenômenos em Física nuclear, pois em várias reações nucleares a massa não se conserva, havendo liberação de energia, explicada perfeitamente pela equação de Einstein.

Assim sendo, a energia cinética de um corpo pode ser redefinida como:

$$E_c = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - m_0 \cdot c^2 \quad (16)$$

Se utilizarmos a aproximação $(1+x)^n \approx 1+n \cdot x$, se $x \ll 1$, podemos escrever a equação anterior da seguinte maneira:

$$E_c = m_0 \cdot c^2 \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}} - m_0 \cdot c^2 \approx m_0 \cdot c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right) - m_0 \cdot c^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (17)$$

Observe que a equação é a própria expressão para a energia cinética da mecânica clássica. Ela é válida para o caso em que $v \ll c$, ou seja, a expressão clássica para a energia cinética é um caso particular da relatividade restrita. A mecânica newtoniana não é extinta pela relatividade restrita. Ela se torna um caso particular quando o termo relativístico $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$

tende a 1, pelo fato de a velocidade v ser muito menor do que a velocidade c . Vários experimentos em diversos laboratórios em todo o mundo são feitos até os dias de hoje para comprovar as teorias de Einstein.

Exercícios resolvidos

1 Uma nave espacial que se dirige à Lua passa pela Terra com velocidade relativa de $0,8c$.

- Qual a duração da viagem da Terra à Lua para um observador na Terra?
- Qual é a distância da Terra à Lua para um passageiro na nave?
- Qual a duração da viagem para o passageiro?

Dado: Distância Terra-Lua, para observador em repouso na Terra, igual a 384.000 km.

Resolução:

Em todos os problemas de relatividade, temos que ter os conceitos de tempo próprio e de medida própria. O tempo próprio é o tempo indicado por um relógio em repouso em relação a um dado referencial. Medida própria é a medida de um objeto em repouso em relação a um dado referencial.

- Para o observador na Terra, o tempo de deslocamento é calculado utilizando a sua medida própria de distância, tal que:

$$\Delta t = \frac{d_{Terra-Luz}}{0,8 \cdot c} = \frac{384.000}{0,8 \cdot 300000} = 1,6 \text{ s}$$

- A régua do viajante está em movimento em relação ao que se quer medir, não sendo, portanto, uma medida própria. Temos, então, a contração do espaço, pois réguas em movimento medem comprimentos menores do que réguas em repouso.

Portanto, tem-se que:

$$\Delta x_{nave} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \cdot \Delta x_{Terra} = 384.000 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,8c}{c}\right)^2} = 230.400 \text{ km}$$

- Há duas maneiras de se calcular, já que as transformações de Lorentz mantêm constante a relação espaço e tempo.

C.1) Basta dividir a distância medida pelo viajante na nave pela sua velocidade:

$$\Delta t_{nave} = \frac{230.400}{0,8 \cdot c} = \frac{230.400}{0,8 \cdot 300000} = 0,96 \text{ s}$$

C.2) É dada a medida realizada pelo referencial em repouso, no caso a Terra, como sendo transcorridos 1,6 s. Considerando o relógio da nave em movimento, este atrasa-se, tal que:

$$\Delta t_{nave} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \cdot \Delta t_{Terra} = \sqrt{1 - \left(\frac{0,8c}{c}\right)^2} \cdot 1,6 = 0,96 \text{ s}$$

- 2** Determine a velocidade relativa de uma barra cujo comprimento medido é a metade do seu comprimento em repouso.

Resolução:

Trata-se do efeito relativístico da contração do espaço. Assim, considerando o comprimento da régua igual a L , tem-se que:

$$L' = \frac{L}{2} = L \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \rightarrow v = 0,866c$$

- 3** Um elétron é acelerado a partir do repouso até atingir uma energia relativística final igual a 2,5 MeV.

A energia de repouso do elétron é $E_0 = 0,5 \text{ MeV}$.

Determine:

- a energia cinética do elétron quando ele atinge a velocidade final.
- a velocidade escalar atingida pelo elétron como uma fração da velocidade da luz no vácuo, c .

Resolução:

- a) A energia relativística (E_R) de uma partícula é a soma de sua energia cinética (K) com sua energia de repouso (E_0). Portanto,

$$E_R = K + E_0 \Rightarrow K = E_R - E_0 \Rightarrow \\ K = 2,5 - 0,5 = 2,0 \text{ MeV.}$$

- b) Sabemos que $E_R = mc^2$, onde $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, sendo v a velocidade da partícula e m_0 a sua massa de repouso. Assim,

$$E_R = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ ou } 1 - \frac{v^2}{c^2} = \left(\frac{E_0}{E_R} \right)^2 \Rightarrow$$

$$v^2 = c^2 \left(1 - \left(\frac{E_0}{E_R} \right)^2 \right) \Rightarrow v = \frac{2\sqrt{6}}{5} c.$$

Então, $v = 0,96 c$.

Conclusões

A Teoria da Relatividade Restrita de Einstein, postulada em 1905, trata de referenciais em movimento retilíneo uniforme. Anos depois, em 1916, Einstein apresentou a Teoria da Relatividade Geral. Essa teoria trata de curvaturas no espaço-tempo. Assim, a dimensão espacial está intimamente ligada à dimensão temporal; não há como desvincular uma dimensão da outra.

Nessa teoria, corpos de grande massa deformam o espaço-tempo em sua volta, o que explicaria a atração gravitacional, analogamente ao que ocorre quando se coloca um corpo altamente denso sobre uma superfície esticada, tal como a de uma cama elástica. O campo gravitacional é transmitido de um corpo a outro na velocidade da luz. Assim, as interações a distância não são instantâneas, tornando a Terceira Lei de Newton falha nessas circunstâncias.

Seu trabalho também prevê o desvio da luz ao passar perto de tais corpos, pois a interação gravitacional iria desviar os fótons componentes da luz. Essa previsão foi comprovada durante um eclipse solar, no qual Einstein esteve no Brasil em 1919. Devido ao desvio da luz, a estrela parecia estar em uma posição diferente da que realmente estava.

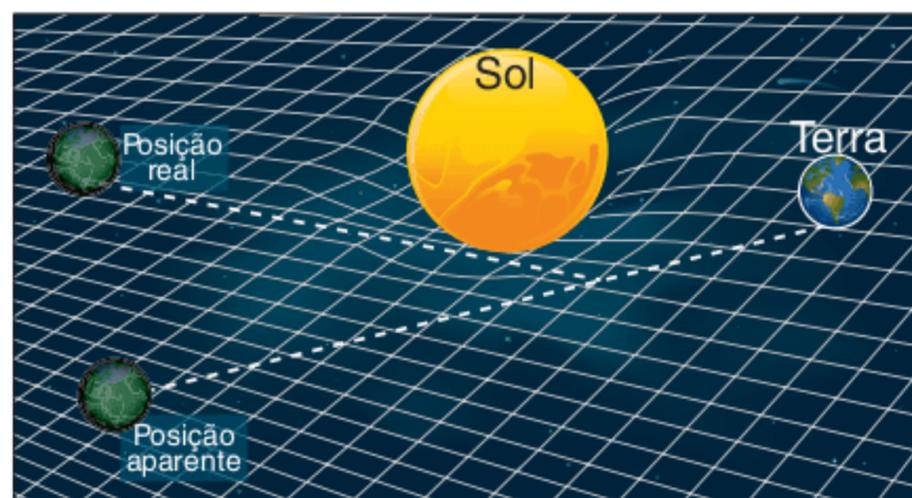


Fig. 14 Alteração da trajetória da luz pela ação do Sol.

Revisando

1 UFRN (Adapt.) Nos dias atuais, há um sistema de navegação de alta precisão que depende de satélites em órbita em torno da Terra. Para que não haja erros significativos nas posições fornecidas por esses satélites, é necessário corrigir relativisticamente o intervalo de tempo medido pelo relógio a bordo de cada um desses satélites. A Teoria da Relatividade Especial prevê que, se não for feito esse tipo de correção, um relógio a bordo não marcará o mesmo intervalo de tempo que outro relógio em repouso na superfície da Terra, mesmo sabendo-se que ambos os relógios estão sempre em perfeitas condições de funcionamento e foram sincronizados antes de o satélite ser lançado.

Se não for feita a correção relativística para o tempo medido pelo relógio de bordo, o que poderá ocorrer com o referido relógio?

2 UFRGS (Adapt.) Em 1905, como consequência da sua Teoria da Relatividade Especial, Albert Einstein (1879-1955) mostrou que a massa pode ser considerada como mais uma forma de energia. Em particular, a massa m de uma partícula em repouso é equivalente a um valor de energia e dado pela famosa fórmula de Einstein:

$$E = m \cdot c^2$$

onde c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, que vale aproximadamente 300.00 km/s.

Com relação às aplicações da fórmula de Einstein, assinale V para verdadeiro ou F para falso.

- Na reação nuclear de fissão do U-235, a soma das massas das partículas reagentes é maior do que a soma das massas das partículas resultantes.
- Na reação nuclear de fusão de um próton com um nêutron para formar um dêuteron, a soma das massas das partículas reagentes é menor do que a massa da partícula resultante.
- A irradiação contínua de energia eletromagnética pelo Sol provoca uma diminuição gradual da massa solar.

Exercícios propostos

1 UFSE A Teoria da Relatividade de Einstein formaliza adequadamente a mecânica para os corpos que viajam a velocidades muito altas, evidenciando as limitações da mecânica newtoniana.

De acordo com essa teoria, analise as informações.

- 00 A velocidade limite para qualquer corpo é a velocidade da luz no vácuo, aproximadamente $3,0 \cdot 10^8$ m/s.
- 11 O tempo pode passar de maneira diferente para observadores a diferentes velocidades.
- 22 As dimensões de um objeto são sempre as mesmas, quer ele esteja em repouso, quer em movimento.
- 33 A massa de um elétron viajando à metade da velocidade da luz é maior que a do elétron em repouso.
- 44 A célebre equação $E = m \cdot c^2$ pode explicar a energia que o Sol emite quando parte de sua massa se converte em energia.

Soma =

2 UFL Quando aceleramos um elétron até que ele atinja a velocidade $v = 0,5 \cdot c$, em que c é a velocidade da luz, o que acontece com a massa?

- (a) Aumenta em relação à sua massa de repouso, por um fator $\frac{1}{\sqrt{0,75}}$.
- (b) Aumenta em relação à sua massa de repouso, por um fator $\frac{1}{\sqrt{0,5}}$.
- (c) Diminui em relação à sua massa de repouso, por um fator $\sqrt{0,75}$.
- (d) Diminui em relação à sua massa de repouso, por um fator $\sqrt{0,5}$.
- (e) Não sofre nenhuma alteração.

3 UFRN A Teoria da Relatividade Especial ou Restrita prediz que existem situações nas quais dois eventos que acontecem em instantes diferentes, para um observador em um dado referencial inercial, podem acontecer no mesmo instante, para outro observador que está em outro referencial inercial. Ou seja, a noção de simultaneidade é relativa e não absoluta.

A relatividade da simultaneidade é consequência do fato de que:

- (a) a Teoria da Relatividade Especial só é válida para velocidades pequenas em comparação à velocidade da luz.
- (b) a velocidade de propagação da luz no vácuo depende do sistema de referência inercial em relação ao qual ela é medida.
- (c) a Teoria da Relatividade Especial não é válida para sistemas de referências inerciais.
- (d) a velocidade de propagação da luz no vácuo não depende do sistema de referência inercial em relação ao qual ela é medida.

4 UEL A teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, mas em perfeito acordo com os resultados experimentais. Ela é aplicada, entretanto, somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade, válida não só para referenciais inerciais, mas também para referenciais não inerciais.

Sobre os referenciais inerciais, considere as seguintes afirmativas.

- I. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidades constantes.
- II. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidades variáveis.
- III. Observadores em referenciais inerciais diferentes medem a mesma aceleração para o movimento de uma partícula.

Assinale a alternativa correta.

- (a) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
- (b) Apenas a afirmativa II é verdadeira.
- (c) As afirmativas I e II são verdadeiras.
- (d) As afirmativas II e III são verdadeiras.
- (e) As afirmativas I e III são verdadeiras.

5 UFRN Sendo a velocidade de propagação da luz igual a $3 \cdot 10^8$ m/s, a ordem de grandeza da energia de repouso de 1 g de matéria, em J, é:

- (a) 10^8
- (b) 10^9
- (c) 10^{13}
- (d) 10^{14}
- (e) 10^{15}

6 UFJF Assinale, dentre os itens a seguir, o correto.

- (a) A Teoria da Relatividade de Einstein diz ser possível acelerar partículas massivas, a partir do repouso, até velocidades superiores à velocidade da luz.
- (b) A energia de um fóton aumenta conforme aumenta seu comprimento de onda.
- (c) Um elétron, ao ser freado bruscamente, pode emitir raios X.
- (d) Um corpo negro, por ser negro, nunca emite radiação eletromagnética.
- (e) Segundo De Broglie, a luz sempre se comporta como uma onda, e o elétron sempre se comporta como partícula.

7 PUC-RS A relação massa-energia ($E = \Delta mc^2$, com $c^2 = 9,0 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$) atualmente é vista como um emblema da Teoria da Relatividade Restrita, de 1905. Porém, já no início da década de 1890, a Física necessária para obter essa relação estava disponível, e implícita na equação do Eletromagnetismo Clássico, que põe em correspondência a quantidade de movimento e a energia de uma onda eletromagnética. No entanto, cabe inegavelmente a Einstein o mérito de tê-la generalizado. Essa relação permite concluir que, se aquecermos um corpo, fazendo com que ele absorva 90 kJ, sua massa irá aumentar:

- (a) um décimo de grama.
- (b) um centésimo de grama.
- (c) um milésimo de grama.
- (d) um milionésimo de grama.
- (e) um bilionésimo de grama.

8 UFSC O ano de 2005 será o Ano Internacional da Física, pois estaremos completando 100 anos de importantes publicações realizadas por Albert Einstein. O texto a seguir representa um possível diálogo entre dois cientistas, em algum momento, nas primeiras décadas do século XX.

“Z – Não posso concordar que a velocidade da luz seja a mesma para qualquer referencial. Se estivermos caminhando a 5 km/h em um trem que se desloca com velocidade de 100 km/h em relação ao solo, nossa velocidade em relação ao solo será de 105 km/h. Se acendermos uma lanterna no trem, a velocidade da luz desta lanterna em relação ao solo será de $c + 100 \text{ km/h}$.”

B – O nobre colega está supondo que a equação para comparar velocidades em referenciais diferentes seja $v' = v_0 + v$. Eu defendo que a velocidade da luz no vácuo é a mesma em qualquer referencial com velocidade constante e que a forma para comparar velocidades é que deve ser modificada.

Z – Não diga também que as medidas de intervalos de tempo serão diferentes em cada sistema. Isto é um absurdo!

B – Mas é claro que as medidas de intervalos de tempo podem ser diferentes em diferentes sistemas de referência.

Z – Com isto você está querendo dizer que tudo é relativo!

B – Não! Não estou afirmando que tudo é relativo! A velocidade da luz no vácuo será a mesma para qualquer observador inercial. As grandezas observadas poderão ser diferentes, mas as leis da Física deverão ser as mesmas para qualquer observador inercial.”

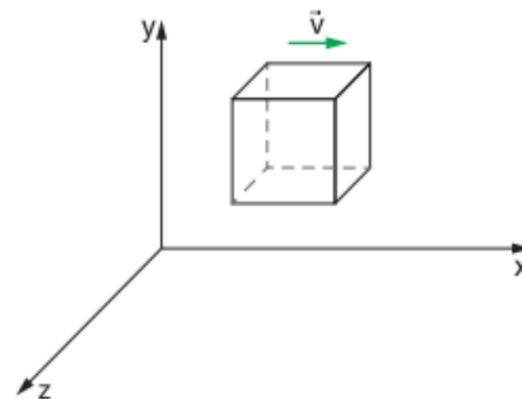
Com o que você sabe sobre Teoria da Relatividade e considerando o diálogo apresentado, assinale a(s) proposição(ões) correta(s).

- 01 O cientista B defende ideias teoricamente corretas sobre a Teoria da Relatividade Restrita, mas que não têm nenhuma comprovação experimental.
- 02 O cientista Z aceita que objetos podem se mover com velocidades acima da velocidade da luz no vácuo, pois a mecânica newtoniana não coloca um limite superior para a velocidade de qualquer objeto.
- 04 O cientista Z está defendendo as ideias da mecânica newtoniana, que não podem ser aplicadas a objetos que se movem com velocidades próximas à velocidade da luz.
- 08 De acordo com a Teoria da Relatividade, o cientista B está correto ao dizer que as medidas de intervalos de tempo dependem do referencial.
- 16 De acordo com a Teoria da Relatividade, o cientista B está correto ao afirmar que as leis da Física são as mesmas para cada observador.

Soma =

9 UFRN Segundo a Teoria da Relatividade Especial, as medidas de comprimento e de massa, por exemplo, dependem do estado de movimento relativo entre observadores que efetuam tais medidas a partir de referenciais inerciais diferentes.

Considere um cubo sólido e homogêneo movendo-se com velocidade v , na direção x , paralelamente a uma de suas arestas, conforme representado na figura a seguir.



As grandezas L_0 , m_0 , V_0 e ρ_0 são, respectivamente, o comprimento da aresta, a massa, o volume e a densidade de massa desse cubo, medidos desde um referencial em relação ao qual ele está em repouso.

Se esses valores forem medidos de um referencial inercial em relação ao qual esse cubo se move com velocidade v constante – segundo uma direção paralela a uma das arestas –, então o comprimento da aresta paralela à direção em que o cubo se

move será dado por $L = \frac{L_0}{\gamma}$, e as outras três grandezas serão dadas, respectivamente, por $m = \gamma \cdot m_0$, V e ρ , em que γ é o fator relativístico de Lorentz.

São dados ainda: $\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}$ e $\rho = \frac{m}{V}$.

Segundo a Teoria da Relatividade Especial, para a situação descrita, a relação entre as densidades de massa do cubo, conforme medidas nos dois referenciais, é expressa por:

- (a) $\rho = \gamma \rho_0$
- (b) $\rho = \gamma^2 \rho_0$
- (c) $\rho = \rho_0$
- (d) $\rho = \gamma^4 \rho_0$

10 ITA No modelo proposto por Einstein, a luz se comporta como se sua energia estivesse concentrada em pacotes discretos, chamados “quanta” de luz, e atualmente conhecidos por fótons. Estes possuem momento p e energia E relacionados pela equação $E = pc$, em que c é a velocidade da luz no vácuo. Cada fóton carrega uma energia $E = hf$, em que h é a constante de Planck e f é a frequência da luz. Um evento raro, porém possível, é a fusão de dois fótons, produzindo um par elétron-pósitron, sendo a massa do pósitron igual à massa do elétron. A relação de Einstein associa a energia da partícula à massa do elétron ou pósitron, isto é, $E = m_e c^2$. Assinale a frequência mínima de cada fóton, para que dois fótons, com momentos opostos e de módulo iguais, produzam um par elétron-pósitron após a colisão.

- (a) $f = \frac{(4m_e c^2)}{h}$ (c) $f = \frac{(2m_e c^2)}{h}$ (e) $f = \frac{(m_e c^2)}{4h}$
 (b) $f = \frac{(m_e c^2)}{h}$ (d) $f = \frac{(m_e c^2)}{2h}$

11 UFC Um acelerador de partículas síncrotron é usado para fazer uma partícula atingir uma velocidade v , próxima de c . Em um experimento, foram medidas a energia relativística total E e a energia de repouso E_0 . Determine o valor da razão $\frac{v}{c}$ em função de E e E_0 .

12 UFSC 2011 Com base nos tópicos de Física moderna, assinale a(s) proposição(ões) correta(s).

- 01 Corpo negro ideal é todo corpo capaz de absorver toda a radiação que nele incide. Quando um corpo negro é aquecido, ele é uma fonte ideal de radiação térmica.
- 02 O efeito fotoelétrico só ocorre se a frequência da luz incidente sobre o metal for superior a um valor mínimo f_{\min} e a emissão de cargas elétricas desse material independe da intensidade da radiação incidente.
- 04 A Teoria da Relatividade Especial, proposta por Einstein, está baseada em dois postulados, sendo que um deles é enunciado da seguinte forma: “As leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Ou seja, não existe nenhum sistema de referência inercial preferencial”.
- 08 A apresentação do trabalho do físico Maxwell sobre a quantização da energia é considerada hoje como o marco oficial da fundação da Física moderna.
- 16 A Teoria da Relatividade Restrita tem como consequência a contração espacial e a dilatação temporal.
- 32 O fenômeno da radiação do corpo negro é explicado pela Física clássica e pela moderna como sendo uma distribuição contínua de energia de um sistema.
- 64 O comportamento dualístico de uma onda-partícula é descrito e aceito pela Física clássica, sendo mais aprofundado e explicado pela Física quântica.

Soma =

13 UFPB 2011 A Relatividade Especial é uma teoria muito bem consolidada experimentalmente, inclusive tendo aplicações dela no cotidiano. Um exemplo bastante expressivo é o aparelho de navegação GPS, o qual está baseado na Relatividade Especial, e é construído com a finalidade de proporcionar orientação espacial com precisão.

Com base nos conceitos da Relatividade Especial, identifique as afirmativas corretas.

- A velocidade da luz no vácuo é a mesma em todas as direções e em todos os referenciais inerciais e não depende do movimento da fonte ou do observador.
- As leis da Física dependem do referencial inercial escolhido.
- Dois observadores em movimento relativo não concordam, em geral, quanto à simultaneidade entre dois eventos.
- O tempo próprio é o intervalo de tempo entre dois eventos que ocorrem no mesmo ponto em um determinado referencial inercial, medido nesse referencial.
- O comprimento próprio de um objeto é aquele medido em um referencial no qual ele está em repouso.

14 UEM 2011 Analise as alternativas abaixo e assinale o que for correto.

- 01 O segundo postulado da teoria da Relatividade Restrita afirma que a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor para todos os observadores, qualquer que seja seu movimento ou o movimento da fonte.
- 02 A energia total relativística de um corpo é o produto da massa relativística desse corpo pela velocidade da luz no vácuo ao quadrado.
- 04 O nêutron possui uma massa aproximadamente igual à do próton, mas não possui carga elétrica.
- 08 Nas reações nucleares de transmutação, a energia total e a quantidade de movimento não são conservadas.
- 16 Os nêutrons, os prótons e os elétrons são as únicas partículas elementares da natureza.

Soma =

15 UFPR 2010 Entre as inovações da Física que surgiram no início do século XX, uma foi o estabelecimento da Teoria _____, que procurou explicar o surpreendente resultado apresentado pela radiação e pela matéria conhecido como dualidade entre _____ e ondas. Assim, quando se faz um feixe de elétrons passar por uma fenda de largura micrométrica, o efeito observado é o comportamento _____ da matéria, e quando fazemos um feixe de luz incidir sobre uma placa metálica, o efeito observado pode ser explicado considerando a luz como um feixe de _____.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta de palavras para o preenchimento das lacunas nas frases citadas.

- (a) Relativística – partículas – ondulatório – partículas
- (b) Atomística – radiação – rígido – ondas
- (c) Quântica – partículas – ondulatório – partículas
- (d) Relativística – radiação – caótico – ondas
- (e) Quântica – partículas – ondulatório – ondas

O gigante Albert Einstein

Em 1905, o alemão judeu Albert Einstein obteve o seu doutorado e publicou cinco artigos, sendo que quatro deles foram muito importantes para uma nova compreensão da Física. Os artigos publicados foram:

- *Sobre um ponto de vista heurístico concernente a geração e transformação da luz* – Nesse artigo, Einstein trata do efeito fotoelétrico. Foi o trabalho que lhe rendeu o Prêmio Nobel.
- *Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares* – Esse foi o assunto da sua tese de doutoramento pela Universidade de Zurique e, de acordo com o próprio Einstein, o artigo tratava da “determinação do tamanho exato de átomos a partir da difusão e da viscosidade em soluções diluídas de substâncias neutras”.
- *Sobre o movimento de partículas suspensas em fluidos em repouso, como postulado pela teoria molecular do calor* – Esse artigo trata do movimento Browniano que se tornou uma importante comprovação sobre a existência do átomo.
- *Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento* – Esse artigo propõe a Teoria da Relatividade Restrita, útil para corpos que se movimentam em movimento retilíneo e uniforme, o qual altera o entendimento do espaço e do tempo.
- *A inércia de um corpo depende da sua energia?* – Nesse artigo, ele propõe a sua famosa equação $E = m \cdot c^2$, como uma consequência da sua Teoria da Relatividade Restrita, sendo essa equação fundamental para o entendimento dos processos de reações nucleares e, portanto, para a construção de usinas de energia atômica e artefatos nucleares de uso militar.

Após 1905, Einstein continuou publicando uma média de cinco artigos todos os anos e, em 1915, a sua Teoria da Relatividade Geral estava pronta. Essa teoria tratava de corpos acelerados e provocou uma profunda mudança na visão que se tinha do universo.

A Teoria da Relatividade Geral

Conforme dito na conclusão do capítulo 5, a Teoria da Relatividade Geral trata das curvaturas do espaço-tempo. Dessa forma, Einstein propõe que o tempo e o espaço não são absolutos e que eles têm uma interdependência entre si. Apesar de o tratamento matemático da teoria ser difícil, algumas consequências são possíveis de se entender.

Começemos pelo entendimento do princípio de equivalência. Na relatividade restrita, Einstein mostrou que não haveria como saber se estamos em repouso ou em movimento retilíneo uniforme utilizando nenhuma experiência física. Na Teoria da Relatividade Geral, Einstein estendeu o conceito da equivalência para referenciais acelerados.

Imagine que você se encontra viajando em uma espaçonave com aceleração longitudinal de $9,8 \text{ m/s}^2$. Se você soltasse uma maçã dentro da espaçonave, ela se comportaria da mesma forma que se você estivesse sob a ação do campo gravitacional da Terra. Então, segundo a Teoria da Relatividade Geral, o princípio da equivalência nos diz que não há como saber se estamos acelerados ou sob ação de um campo gravitacional. É óbvio que, para que isso seja verdade, a massa inercial (aquela que se opõe à ação da força) deve ser igual à massa gravitacional (aquela que, interage

com outras massas gerando a força gravitacional). Esse princípio tem consequências muito interessantes, como veremos a seguir.

Imagine que você se encontra em um foguete que está acelerado $9,8 \text{ m/s}^2$ e este foguete tem 1 km de comprimento. Você está na parte inferior do foguete e o seu companheiro de missão encontra-se na parte superior do foguete. Vocês combinam fazer o seguinte experimento: Ele irá disparar um pulso de laser e, após um segundo, disparará outro pulso de laser. Você dispõe de um detetor e irá medir o intervalo de chegada dos pulsos. O que ocorrerá?

De fato, como você se encontra acelerado, você medirá um intervalo entre pulsos menor do que 1 s, certo?

Analisando sob o ponto de vista de quem está fora da espaçonave, esse raciocínio é realmente lógico. Mas pense agora no princípio da equivalência que afirma que não é possível por meio de uma experiência física saber se estamos acelerados ou sob a ação de um campo gravitacional. Assim, se repetíssemos essa experiência na Terra, ela teria que levar ao mesmo resultado e assim chegaríamos à conclusão de que o campo gravitacional da Terra altera o passar do tempo.

Essa experiência foi feita em 1962 utilizando relógios de alta precisão montados no chão e no alto de uma caixa-d'água e foi constatado que o relógio no chão passava mais lentamente do que o relógio na torre, em concordância exata com o princípio da equivalência da Teoria da Relatividade Geral. Esse problema é importante considerando que os atuais sistemas de navegação por satélite exigem sincronismo perfeito de relógios. Estando eles submetidos a um campo gravitacional menor do que o das aeronaves na Terra, há a necessidade de correção relativística para se obter altos níveis de precisão nesses sistemas de navegação.

Outra aplicação interessante da Teoria da Relatividade Geral é o aparecimento de buracos negros. Eles ocorrem quando uma estrela, cuja massa supera um determinado valor crítico, cessa de produzir energia por esgotamento do seu combustível nuclear. Nesse caso, ela se colapsa pela interação gravitacional formando uma estrutura com uma densidade tão elevada que cria uma singularidade no espaço-tempo, conforme a figura a seguir.



Ilustração artística de um buraco negro no universo.

O círculo negro que se observa no buraco negro é chamado horizonte de eventos, que é a região da qual nem a luz pode escapar. Esse conceito é muito importante porque, se pensarmos na

luz somente como uma onda, não haveria por que o campo gravitacional gerado pelo buraco negro interferir no seu movimento. Porém, considerando o modelo corpuscular da luz na qual ela é formada por fótons, podemos pensar na interação entre a luz e o campo gravitacional, fato comprovado por Einstein na observação da posição aparente de estrelas durante eclipses solares.

No entanto, se a massa da estrela não for superior à massa crítica necessária para a formação do buraco negro, ela pode, ao morrer, se tornar uma anã branca ou uma estrela de nêutrons. Essas estruturas formam regiões com elevado campo gravitacional, porém não chegam a ser buracos negros por não formarem um horizonte de eventos.

O diagrama a seguir mostra a deformação no espaço-tempo causada por estrelas que colapsaram gravitacionalmente.

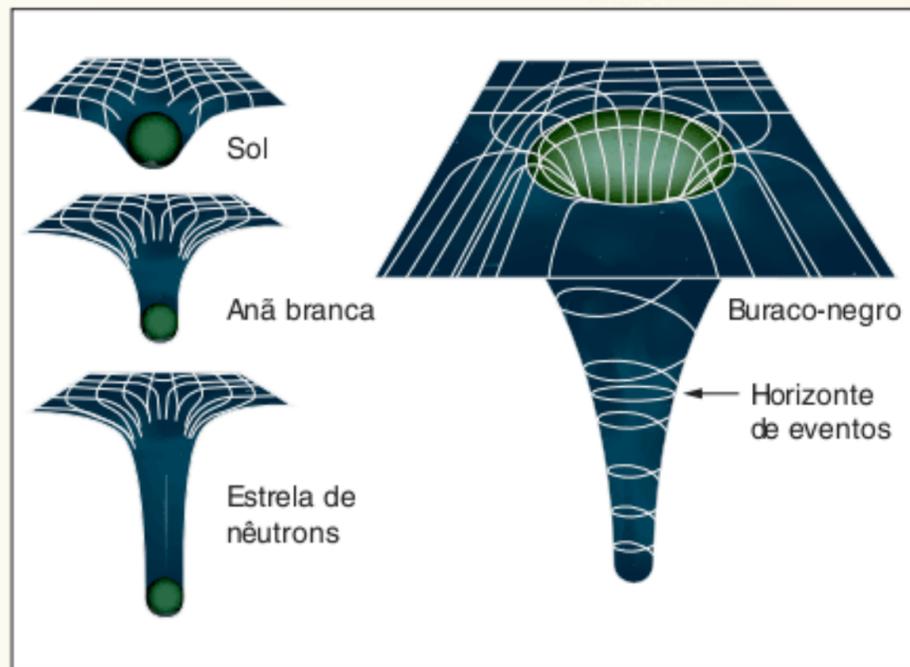


Ilustração da deformação no espaço-tempo causada por uma estrela e por estrelas colapsadas (anã branca, estrela de nêutrons e buraco negro).

Os astrônomos hoje já identificaram vários buracos negros no universo. Sua observação não é direta, já que são negros, porém as alterações gravitacionais que eles ocasionam nas estrelas vizinhas são notadas e, então, podem ser medidas as suas características. Finalmente, poderíamos perguntar, o que acontece quando alguém entra dentro de um buraco negro?

Ao passar pelo horizonte de eventos, a pessoa não iria sentir nada, porém, pelo aumento do campo gravitacional, o tempo iria passar cada vez mais lentamente para ele em relação a quem estivesse de fora. Com a aproximação cada vez maior com o centro do buraco negro e pelo fato de o campo nos pés do astronauta ser maior do que o da cabeça (supondo que ele esteja indo de pé para o buraco negro), ele seria esticado e morreria despedaçado.

O trabalho de Einstein foi certamente uma das maiores manifestações da genialidade humana. No final de sua vida, tentou sem sucesso desenvolver uma teoria que unificasse as quatro forças da natureza. Além disso, não conseguiu aceitar o tratamento não determinístico da nova teoria quântica que estava sendo desenvolvida; no campo pessoal, foi um dos idealizadores iniciais do projeto Manhattan, que construiu a primeira bomba atômica, pois via na Alemanha nazista uma ameaça ao mundo e ao sionismo; recusou a presidência de Israel, tornando-se um pacifista. Uma frase sintetiza muito bem o que ele pensava a respeito da pesquisa científica: "A busca pela verdade é mais importante que a própria verdade".

RESUMINDO

A Teoria da Relatividade de Einstein é um dos feitos mais notáveis da ciência nos últimos 200 anos. Ao retomar os princípios da relatividade de Galileu, e neles incluir as leis do eletromagnetismo, Einstein postula que:

- a) a velocidade da luz no vácuo é a mesma para qualquer referencial inercial;
- b) as leis da Física são invariantes para qualquer referencial inercial.

Esses dois postulados abalam de forma profunda a compreensão do tempo e do espaço, já que essas duas grandezas deixam de ser absolutas e passam a ser interdependentes, a fim de que os postulados possam ser respeitados. Para ratificar a teoria de Einstein, vários experimentos foram realizados comprovando a veracidade dos postulados. Dessa forma, chega-se a duas conclusões importantes sobre o princípio da relatividade restrita de Einstein:

- a) réguas em movimento se contraem; e
- b) relógios em movimento se atrasam.

Como resultado desses postulados, é necessário rever o conceito de massa inercial, o que levou Einstein a uma das equações mais conhecidas (e menos compreendida) da Física – a equação de conservação de massa e energia, ou seja:

$$E = m \cdot c^2$$

onde E é a energia relativística do corpo e m é a sua massa inercial, a qual é função da sua velocidade através da equação:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Onde m_0 é a massa de repouso do corpo e v é a sua velocidade em relação a um dado referencial.

Por fim, tem-se um relance da Teoria da Relatividade Geral de Einstein, que trata do espaço-tempo para referenciais acelerados ou submetidos a campos gravitacionais.

A **Teoria da Relatividade Geral** de Einstein constitui-se no principal instrumento da Astrofísica para entender o conceito de gravidade do ponto de vista cosmológico.

■ QUER SABER MAIS?



SITES

- Associação Aeroespacial Brasileira
www.aeroespacial.org.br
- Testando a Teoria da Relatividade de Einstein
www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010130050331

- Pesquisa Fapesp online.
www.revistapesquisa2.fapesp.br/pdf/einstein/martins.pdf

Exercícios complementares

1 Unicamp 2008 Com um pouco de capacidade de interpretação do enunciado, é possível entender um problema de Física moderna, como o exposto a seguir, com base nos conhecimentos de Ensino Médio. O positrônio é um átomo formado por um elétron e sua antipartícula, o pósitron, que possui carga oposta e massa igual à do elétron. Ele é semelhante ao átomo de hidrogênio, que possui um elétron e um próton. A energia do

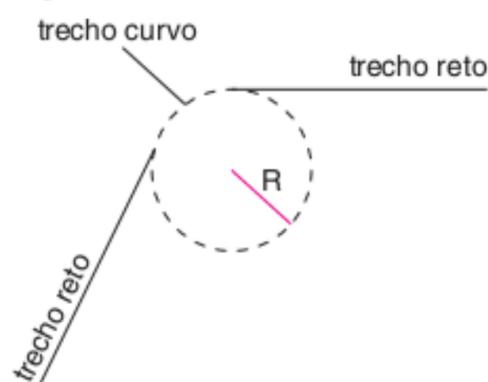
nível fundamental desses átomos é dada por $E_1 = \frac{-13,6}{\left(1 + \frac{m_e}{m_p}\right)} \text{ eV}$,

onde m_e é a massa do elétron e m_p é a massa do pósitron, no caso do positrônio, ou a massa do próton, no caso do átomo de hidrogênio. Para o átomo de hidrogênio, como a massa do próton é muito maior que a massa do elétron, $E_1 = -13,6 \text{ eV}$.

- Calcule a energia do nível fundamental do positrônio.
- Ao contrário do átomo de hidrogênio, o positrônio é muito instável, pois o elétron pode se aniquilar rapidamente com a sua antipartícula, produzindo fótons de alta energia, chamados raios gama. Considerando que as massas do elétron e do pósitron são $m_e = m_p = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, e que, ao se aniquilarem, toda a sua energia, dada pela relação de Einstein $E_p + E_e = m_e c^2 + m_p c^2$, é convertida na energia de dois fótons gama, calcule a energia de cada fóton produzido. A velocidade da luz é $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

2 Unicamp 2007 Numa fonte de luz síncrotron, como aquela existente no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) de Campinas, elétrons circulam no interior de um tubo com velocidade de módulo v muito próximo ao da velocidade da luz no vácuo, que é $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. A trajetória percorrida pelos elétrons é composta de trechos em linha reta e de trechos

curvos (arcos de circunferência de raio R), como ilustrado na figura abaixo. Nas curvas, os elétrons sofrem aceleração centrípeta e, em consequência disso, emitem luz.



- Se $R = 3,0 \text{ m}$, qual é o módulo da aceleração centrípeta do elétron nos trechos curvos da trajetória? Para simplificar o cálculo, considere neste item que o módulo da velocidade v dos elétrons é exatamente igual a c .
- Segundo a Teoria da Relatividade, a energia de um elétron é dada por $E = \gamma mc^2$, onde $m = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ é a massa do elétron, e γ é uma grandeza adimensional sempre maior do que 1, que depende da velocidade do elétron. No LNLS, a energia do elétron é igual a $2,1 \cdot 10^{-10} \text{ J}$. Qual é o valor de γ ?
- A diferença entre os módulos das velocidades da luz e dos elétrons, $\Delta v = (c - v)$, relaciona-se com γ por:

$$\Delta v \cong \frac{c}{2\gamma^2}. \text{ Encontre } \Delta v \text{ no caso do LNLS.}$$

3 UFSC 2007 A Física moderna é o estudo da Física desenvolvido no final do século XIX e início do século XX. Em particular, é o estudo da Mecânica Quântica e da Teoria da Relatividade Restrita.

Assinale a(s) proposição(ões) correta(s) em relação às contribuições da Física moderna.

- 01 Demonstra limitações da Física Newtoniana na escala microscópica.
- 02 Nega totalmente as aplicações das leis de Newton.
- 04 Explica o efeito fotoelétrico e o *laser*.
- 08 Afirma que as leis da Física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.
- 16 Comprova que a velocidade da luz é diferente para quaisquer observadores em referenciais inerciais.
- 32 Demonstra que a massa de um corpo independe de sua velocidade.

Soma =

4 Unicamp 2009 A evolução da sociedade tem aumentado a demanda por energia limpa e renovável. Tipicamente, uma roda-d'água de moinho produz cerca de 40 kWh (ou $1,4 \cdot 10^8$ J) diários. Por outro lado, usinas nucleares fornecem em torno de 20% da eletricidade do mundo e funcionam através de processos controlados de fissão nuclear em cadeia.

- a) Um sitiante pretende instalar em sua propriedade uma roda-d'água e a ela acoplar um gerador elétrico. A partir do fluxo de água disponível e do tipo de roda-d'água, ele avalia que a velocidade linear de um ponto da borda externa da roda deve ser $v = 2,4$ m/s. Além disso, para que o gerador funcione adequadamente, a frequência de rotação da roda-d'água deve ser igual a 0,20 Hz. Qual é o raio da roda-d'água a ser instalada? Use $\pi = 3$.
- b) Numa usina nuclear, a diferença de massa Δm entre os reagentes e os produtos da reação de fissão é convertida em energia, segundo a equação de Einstein $E = \Delta mc^2$, onde $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Uma das reações de fissão que podem ocorrer em uma usina nuclear é expressa de forma aproximada por $(1000 \text{ g de } U_{235}) + (4 \text{ g de nêutrons}) \rightarrow (612 \text{ g de } Ba_{144}) + (378 \text{ g de } Kr_{29}) + (13 \text{ g de nêutrons}) + \text{energia}$. Calcule a quantidade de energia liberada na reação de fissão descrita acima.

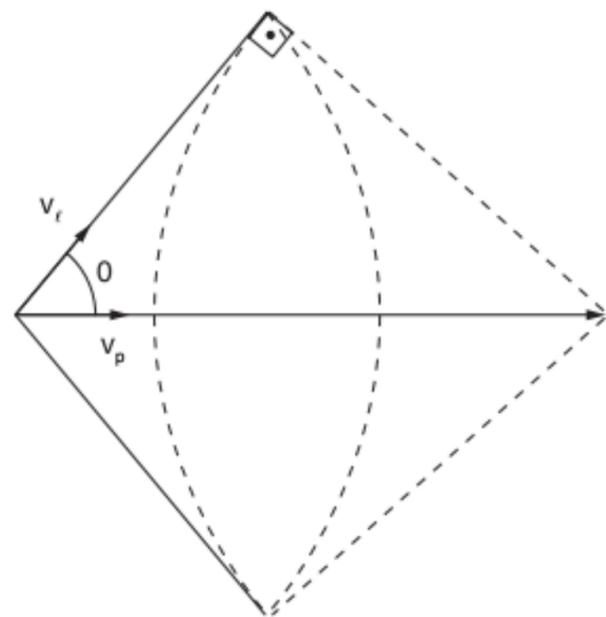
5 UFABC 2006 A charge mostra Albert Einstein criando sua equação, que apresenta um dos princípios que revolucionou a Física.



- Pode-se afirmar que essa equação expressa que a:
- (a) matéria pode ser convertida em energia e a energia pode ser convertida em matéria.
 - (b) energia pode ser emitida ou absorvida em quantidades de massa denominadas fótons.
 - (c) matéria, no vácuo, sempre se desloca à velocidade da luz.
 - (d) energia liberada pela massa de um fóton é proporcional à sua frequência.
 - (e) matéria, ao atingir a velocidade da luz, não apresenta alterações físicas.

6 Unicamp 2011 A radiação Cerenkov ocorre quando uma partícula carregada atravessa um meio isolante com uma velocidade maior do que a velocidade da luz nesse meio. O estudo desse efeito rendeu a Pavel A. Cerenkov e colaboradores o prêmio Nobel de Física de 1958. Um exemplo desse fenômeno pode ser observado na água usada para refrigerar reatores nucleares, em que ocorre a emissão de luz azul devido às partículas de alta energia que atravessam a água.

- a) Sabendo-se que o índice de refração da água é $n = 1,3$, calcule a velocidade máxima das partículas na água para que não ocorra a radiação Cerenkov. A velocidade da luz no vácuo é $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s.
- b) A radiação Cerenkov emitida por uma partícula tem a forma de um cone, como ilustrado na figura a seguir, pois a sua velocidade, v_p , é maior do que a velocidade da luz no meio, v_l . Sabendo que o cone formado tem um ângulo $\theta = 50^\circ$ e que a radiação emitida percorreu uma distância $d = 1,6$ m em $t = 12$ ns, calcule v_p .
Dados: $\cos 50^\circ = 0,64$ e $\sin 50^\circ = 0,76$.



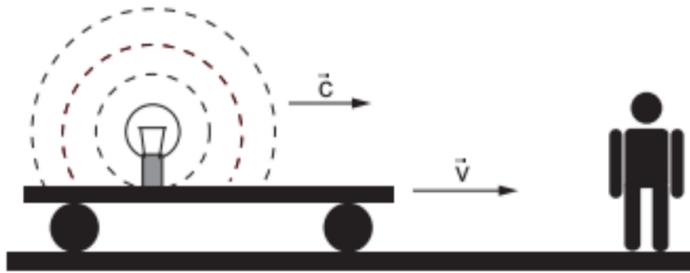
7 UFRGS 2011 De acordo com a Teoria da Relatividade, quando objetos se movem através do espaço-tempo com velocidades da ordem da velocidade da luz, as medidas de espaço e tempo sofrem alterações. A expressão da contração espacial

é dada por $L = L_0 \left(1 - v^2 / c^2\right)^{\frac{1}{2}}$, onde v é a velocidade relativa entre o objeto observado e o observador, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, L é o comprimento medido para o objeto em movimento e L_0 é o comprimento medido para o objeto em repouso.

A distância Sol-Terra para um observador fixo na Terra é $L_0 = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. Para um nêutron com velocidade $v = 0,6 c$, essa distância é de:

- (a) $1,2 \cdot 10^{10}$ m
- (b) $7,5 \cdot 10^{10}$ m
- (c) $1,0 \cdot 10^{11}$ m
- (d) $1,2 \cdot 10^{11}$ m
- (e) $1,5 \cdot 10^{11}$ m

8 UFV 2010 A figura a seguir mostra um vagão aberto que se move com velocidade de módulo V em relação a um sistema de referência fixo no solo. Dentro do vagão, existe uma lâmpada que emite luz uniformemente em todas as direções. Em relação ao vagão, o módulo da velocidade de propagação da luz é c .



Para uma pessoa parada em relação ao solo, na frente do vagão, o módulo da velocidade de propagação da luz emitida pela fonte será:

- (a) c (c) $c - V$
 (b) $c + V$ (d) $\frac{c + V}{c - V}$

9 Unicamp 2010 O GPS (*Global Positioning System*) consiste em um conjunto de satélites que orbitam a Terra, cada um deles carregando a bordo um relógio atômico. A Teoria da Relatividade Geral prevê que, por conta da gravidade, os relógios atômicos do GPS adiantam com relação a relógios similares na Terra. Enquanto na Terra transcorre o tempo de um dia ($t_{\text{Terra}} = 1,0 \text{ dia} = 86.400 \text{ s}$), no satélite, o tempo transcorrido é $t_{\text{satélite}} = t_{\text{Terra}} + \Delta t$, maior que um dia, e a diferença de tempo Δt tem que ser corrigida. A diferença de tempo causada pela gravidade é dada por $\left(\frac{\Delta t}{t_{\text{Terra}}}\right) = \left(\frac{\Delta U}{mc^2}\right)$, sendo ΔU a diferença de energia potencial gravitacional de uma massa m entre a altitude considerada e a superfície da Terra; e $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, a velocidade da luz no vácuo.

- a) Para o satélite, podemos escrever $\Delta U = mgR_T \left(1 - \frac{R_T}{r}\right)$, sendo $r \approx 4R_T$ o raio da órbita, $R_T = 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$ o raio da Terra e g a aceleração da gravidade na superfície terrestre. Quanto tempo o relógio do satélite adianta em $t_{\text{Terra}} = 1,0 \text{ dia}$ em razão do efeito gravitacional?
- b) Relógios atômicos em fase de desenvolvimento serão capazes de medir o tempo com precisão maior que uma parte em 10^{16} , ou seja, terão erro menor que 10^{-16} s a cada segundo. Qual é a altura h que produziria uma diferença de tempo $\Delta t = 10^{-16} \text{ s}$ a cada $T_{\text{Terra}} = 1,0 \text{ s}$? Essa altura é a menor diferença de altitude que poderia ser percebida comparando medidas de tempo desses relógios. Use, nesse caso, a energia potencial gravitacional de um corpo na vizinhança da superfície terrestre.

10 UFC 2009 Um avião militar “relativístico” voa com uma velocidade constante de $0,9 c$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. Esse avião dispara um míssil. O piloto observa que o míssil se afasta do avião com uma velocidade de $0,6 c$. No mesmo instante, um feixe de *laser* é disparado em relação ao avião com uma velocidade c . Assinale a alternativa que apresenta, respectivamente, os valores da velocidade do míssil e da velocidade do feixe de *laser*, percebidos por um observador em um referencial estacionário.

- (a) c e c (c) $1,50 c$ e c (e) $0,30 c$ e $0,10 c$
 (b) $0,97 c$ e c (d) $1,50 c$ e $1,90 c$

11 UEM 2011 Analise as alternativas a seguir e assinale o que for correto.

- 01 O segundo postulado da teoria da Relatividade Restrita afirma que a velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor para todos os observadores, qualquer que seja seu movimento ou o movimento da fonte.
- 02 A energia total relativística de um corpo é o produto da massa relativística desse corpo pela velocidade da luz no vácuo ao quadrado.
- 04 O nêutron possui uma massa aproximadamente igual à do próton, mas não possui carga elétrica.
- 08 Nas reações nucleares de transmutação, a energia total e a quantidade de movimento não são conservadas.
- 16 Os nêutrons, os prótons e os elétrons são as únicas partículas elementares da natureza.

12 UFMG 2008 Suponha que, no futuro, uma base avançada seja construída em Marte. Suponha também que uma nave espacial esteja viajando em direção à Terra, com velocidade constante igual à metade da velocidade da luz. Quando essa nave passa por Marte, dois sinais de rádio são emitidos em direção à Terra – um pela base e outro pela nave. Ambos são refletidos pela Terra e, posteriormente, detectados na base em Marte. Sejam t_B e t_n os intervalos de tempo total de viagem dos sinais emitidos, respectivamente, pela base e pela nave, desde a emissão até a detecção de cada um deles pela base em Marte. Considerando-se essas informações, é correto afirmar que:

- (a) $t_n = \left(\frac{1}{2}\right) t_B$ (c) $t_n = \left(\frac{5}{6}\right) t_B$
 (b) $t_n = \left(\frac{2}{3}\right) t_B$ (d) $t_n = t_B$

13 UFRGS 2008 Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do texto a seguir, na ordem em que aparecem. De acordo com a relatividade restrita, é _____ atravessarmos o diâmetro da Via Láctea, uma distância de aproximadamente 100 mil anos-luz (equivalente a 10^{18} m), em um intervalo de tempo bem menor que 100 anos. Isso pode ser explicado pelo fenômeno de _____ do comprimento, como visto pelo viajante, ou ainda pelo fenômeno de _____ temporal, como observado por quem está em repouso em relação à galáxia.

- (a) impossível – contração – dilatação
 (b) possível – dilatação – contração
 (c) possível – contração – dilatação
 (d) impossível – dilatação – contração
 (e) impossível – contração – contração

14 UFJF 2002 O modelo atômico de Bohr, aperfeiçoado por Sommerfeld, prevê órbitas elípticas para os elétrons em torno do núcleo, como num sistema planetário. A afirmação “um elétron encontra-se exatamente na posição de menor distância ao núcleo (periélio) com velocidade exatamente igual a 10^7 m/s ” é correta do ponto de vista do modelo de Bohr, mas viola o princípio:

- (a) da relatividade restrita de Einstein.
 (b) da conservação da energia.
 (c) de Pascal.
 (d) da incerteza de Heisenberg.
 (e) da conservação de momento linear.

1

Princípios básicos da Física quântica

Revisando

- $E_C = 1,4 \text{ eV} = 2,24 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
 - $\lambda = 82,5 \text{ nm}$
- Apenas a afirmativa II é correta, porque a energia cinética do elétron depende apenas da frequência da luz incidente.
- 2960 Å
 - 8,2 eV
 - 8,2 V

Exercícios propostos

- C
- B
- $7,34 \cdot 10^7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
- C
- D
- A
- B
- V; V; F; V
- E
- E
- C
- A
- B
- E
- 23
- A
- A

Exercícios complementares

- $3,97 \cdot 10^5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
 - 2282 K
- $2,3 \cdot 10^{19}$ fótons
- 1,18 eV
- Não haverá efeito fotoelétrico.
- 1.855 Å
- 0,36 eV
 - 1,75 eV
 - $\lambda = 7.104 \text{ Å}$
- 8,2 eV
 - Não há variação da Energia cinética ao variarmos a intensidade, logo $E_c = 8,2 \text{ eV}$.
- 5.404 Å
 - 3,9 eV
 - 3,91 V
- 3.551
- 1,21 V
- $6 \cdot 10^5 \text{ m/s}$
- 5,3 eV; 2.345 Å; 3 V
- $2,44 \cdot 10^{-2} \text{ Å}$
 - 310 eV
- 0,02725 Å;
 - 0,06043 Å
- $4,85 \cdot 10^{-12}$
 - 41 keV
 - 41 keV
- $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; 4,045 Å
- $5,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}$
- $R = 1,3$
 - $|\Delta v|_{\text{átomo}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$
- C
- Para a luz vermelha: $d_v = 1.051 \text{ m}$
Para a luz azul: $d_a = 898 \text{ m}$
- E
- $f_0 = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$
 - $E_{c\text{máx}} = 6,6 \cdot 10^{-20} \text{ J}$

2

Átomo de Bohr

Revisando

- Não.
 - Absorção I e V, emissão II, III, IV.
 - $6,15 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$. Sim, é visível.
- Para o elétron saltar do nível $n = 1$ para o nível $n = \infty$, onde o elétron é ionizado, foram consumidos $|E_1 - E_\infty| = |-13,6| = 13,6 \text{ eV}$.
Como a energia do fóton é de 20 eV e o elétron absorveu 13,6 eV, a energia cinética do elétron será de 6,4 eV ($20 - 13,6 = 6,4 \text{ eV}$).

Exercícios propostos

- D
- 4.838 Å
 - 6.575 Å
- B
- A variação de energia corresponde ao fóton emitido na radiação.
 - λ_a é a maior energia
 $\frac{hc}{\lambda_a} = E_3 - E_1$
 $\lambda_a = \frac{h \cdot c}{E_3 - E_1}$
- $p = 1$
- A
- B
- D
- Como a massa do elétron é igual à massa do pósitron:

$$m_e = m_p \quad \frac{m_e}{m_p} = 1$$

$$\text{Se } E = \frac{-13,6}{\left(1 + \frac{m_e}{m_p}\right)} = \frac{-13,6}{1+1} = \frac{-13,6}{2} = -6,8 \text{ eV}$$

$$\text{b) } E = \frac{2mc^2}{2}$$

$$E_p + E_e = m_e c^2 + m_p c^2 = 9 \cdot 10^{-31} (3,0 \cdot 10^8)^2 = 8,1 \cdot 10^{-14} \text{ J será a energia de um fóton.}$$

- $\Delta E = E_2 - E_1$

$$E_2 = \frac{E_1}{4}$$

$$\text{Logo } \Delta E = \left(\frac{E_1}{4}\right) - E_1 = \frac{-3}{4}(E_1)$$

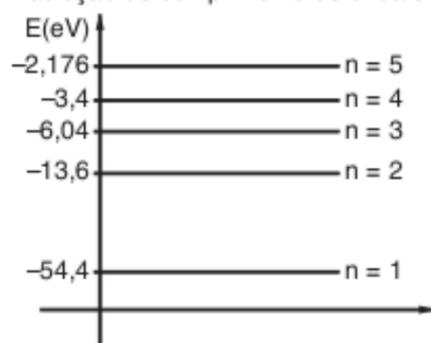
$$\Delta E = \frac{-3}{4}(-2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J}) = 1,64 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

A energia pode ser fornecida a esse átomo por meio de colisões entre partículas (efeito fotoelétrico).

- $n = \infty$ representa o estado no qual o elétron está livre, ou seja, ocorreu a ionização desse elétron e sua energia E tem valor $E \geq 0$.

Exercícios complementares

- 1.219 Å; 1.028 Å; 975 Å
- 3.656 Å
- Radiação de comprimento de onda 914 Å.



- 2,85 eV
- 882 μm
- 25 keV
- 0,41 Å
- 6.577 Å; 4.875 Å
- 54,4 eV; 228 Å
- 305 Å; 257 Å; 244 Å
- $n = 4$ para $n = 2$
 - Balmer.
- 12,09 eV; 1.028 Å; $6,44 \cdot 10^{-37} \text{ N.s}$
- $v' = \frac{v}{n}$
- $n = 1$
 - $r \approx 0,53 \text{ Å}$
 - $1,06 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
 - $2 \cdot 10^{-24} \text{ N.s}$
 - $4,2 \cdot 10^{16} \text{ rad/s}$
 - $2,2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$
 - $8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$
 - $9,1 \cdot 10^{22} \text{ m/s}^2$
 - $2,2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$
 - $-4,4 \cdot 10^{-18} \text{ J}$
 - $-2,2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$
- Sendo c a velocidade da luz, pela equação fundamental da ondulatória, temos:
 $c = \lambda f \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda}$ (I)

Ao saltar de uma órbita de maior energia para a órbita estável, o elétron emite um fóton de frequência f . De acordo com a equação de Planck, a energia liberada (ΔE) nessa emissão é dada por: $\Delta E = h f$ (II)

Substituindo (I) em (II):

$$\Delta E = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h c}{\Delta E}$$

Como a energia dos fótons somente está disponível na natureza em quantidades determinadas, conclui-se pela expressão acima que somente são possíveis determinados comprimentos de onda, formando as raias espectrais mostradas na figura.

- D
- F; V; F; F; V
- D
- D
- Aspectos da Física clássica: Lei de Coulomb e Conservação da energia.
Aspectos inovadores: restrição (quantização) da órbita do elétron e o fóton de energia (quantização da energia).

$$\text{b) } v_r = \sqrt{\frac{2(E_1 - E_0)}{M_H}}$$

- B

3

Física nuclear e radioatividade

Revisando

- Verdadeiro
As linhas espectrais sugerem que um elétron e um átomo podem assumir somente determinadas energias.
 - Falso
Para arrancar um elétron, este absorve energia e passa para um estado de maior energia até ser ionizado.
 - Falso
O raio do átomo é cerca de 10.000 vezes maior que o do núcleo.
- ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Ra}$
Houve a emissão de uma partícula alfa.

Exercícios propostos

1. A
2. A
3. B
4. D
5. B
6. A
7. E
8. A

Exercícios complementares

1. B
2. D
3. D
4. A
5. a) 3 nêutrons.
b) $E = [\text{massa}(\text{nêutron} + \text{U}^{235}) - \text{massa}(3. \text{nêutrons} + \text{Kr}^{92} + \text{Ba}^{141})]. c^2$
6. 56
7. C
8. B
9. a) $V = \omega R$
 $R = \frac{V}{\omega} = \frac{V}{2\pi f}$
 $R = \frac{2,4}{2.3.0,2} = 2,0 \text{ m}$
b) $\Delta m = (612 + 378 + 13) - (1.000 + 4)$
 $\Delta m = 1.003 - 1.004 = -1g = 1.10^{-3} \text{ kg}$

Energia liberada:
 $E = \Delta mc^2$
 $E = (-1.10^{-3})(3.10^8)^2$
 $E = 9.10^{13} \text{ J}$
10. A
11. D
12. C
13. A
14. B
15. a) 20.000 cpm
b) 5,0 L
16. C

4

Ondas e matéria

Revisando

1. 603 V
2. 1,0 mm

Exercícios propostos

1. 1,23 Å
2. a) 3,6 Å
b) $1,98.10^{-3} \text{ Å}$
c) $1,66.10^{-39} \text{ m}$
3. $p = \frac{h}{\lambda}$
4. a) $1,6575.10^{-35} \text{ m}$
b) O comprimento de onda associado é bem menor do que qualquer dimensão conhecida; assim, não se observa a difração.
5. a) $1,9.10^{-21} \text{ Ns}$
b) $3,5.10^{-13} \text{ m}$
6. C
7. A
8. C
9. A
10. D
11. $\frac{1,75.10^{-33}}{m_{\text{projétil}}} \text{ m}$
12. $5,28.10^{-26} \text{ J}$
13. $5,28.10^{-24} \text{ Ns}$
14. $3,86.10^{-4} \text{ m}$
15. C

Exercícios complementares

1. B
2. $V = \frac{W}{q} \rightarrow W = \frac{1}{2}mv^2 = qV \rightarrow v^2 = \frac{2qV}{m} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$
 $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{\frac{2qV}{m}}} = h\sqrt{\frac{1}{2mqV}} =$
 $= 6,6.10^{-34} \sqrt{\frac{1}{2.9.10^{-31}.1,6.10^{-19}.12,5.10^3}}$
 $\lambda = \frac{6,6.10^{-34}}{6.10^{-23}} = 1,1.10^{-11} = 11.10^{-12} \text{ m}$

Portanto, λ em unidades 10^{-12} é igual a 11.
3. a) 10^{-10} m
b) $p = 6,6.10^{-24} \text{ kg.m/s}$
c) $E_{\text{Cin}} = 2,6.10^5 \text{ eV}$
4. E
5. B
6. a) $\lambda = h/p$
b) 1. $\lambda \approx 1,2.10^{10} \text{ m}$
2. $\lambda \approx 1,2.10^9 \text{ m}$
7. E
8. $E = -\frac{n^2 h^2}{8\pi^2 r^2 m}$
9. C
10. D
11. A
12. a) $E_m = 1,8 \text{ eV}$.
b) Com este comprimento de onda não há energia suficiente para arrancar elétrons do material.
13. D
14. a) $\lambda = h/p$.
b) 1. $\lambda \approx 1,2.10^{10} \text{ m}$.
2. $\lambda \approx 1,2.10^9 \text{ m}$.
15. C
16. B
17. $\Phi = 39,6.10^{20} \text{ J}$
18. A

5

Teoria da Relatividade Restrita de Einstein

Revisando

1. Ele ficará cada vez mais atrasado em relação ao relógio da Terra.
2. V; F; V

Exercícios propostos

1. 88
2. A
3. D
4. E
5. D
6. C
7. E
8. 30
9. B
10. B
11. $\frac{v}{c} = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{E}$
12. 21
13. V; F; V; V; V
14. 07
15. C

Exercícios complementares

1. a) -6,8 eV
b) $8,1.10^{-14} \text{ J}$
2. a) $3,0.10^{16} \text{ m/s}^2$
b) $\gamma \approx 2,6.10^3$
c) $\Delta v \approx 22 \text{ m/s}$
3. 13

4. a) 2,0 m
b) 9.10^{13} J
5. A
6. a) $v_{\text{máx}} = 2,3.10^8 \text{ m/s}$
b) $v_p \approx 2,1.10^8 \text{ m/s}$
7. D
8. A
9. a) $\Delta t = 4,6.10^{-5} \text{ s}$
b) $h = 0,9 \text{ m}$
10. B
11. 07
12. D
13. C
14. D