

Física

Física moderna e contemporânea

Organizadores

Maurício Pietrocola

Nobuko Ueta

Elaboradores

Guilherme Brockington

Wellington Batista de Sousa

Nobuko Ueta

6

módulo

Nome do Aluno _____

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO

Governador: *Geraldo Alckmin*

Secretaria de Estado da Educação de São Paulo

Secretário: *Gabriel Benedito Issac Chalita*

Coordenadoria de Estudos e Normas Pedagógicas – CENP

Coordenadora: *Sônia Maria Silva*

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Reitor: *Adolpho José Melfi*

Pró-Reitora de Graduação

Sônia Teresinha de Sousa Penin

Pró-Reitor de Cultura e Extensão Universitária

Adilson Avansi Abreu

FUNDAÇÃO DE APOIO À FACULDADE DE EDUCAÇÃO – FAFE

Presidente do Conselho Curador: *Selma Garrido Pimenta*

Diretoria Administrativa: *Anna Maria Pessoa de Carvalho*

Diretoria Financeira: *Sílvia Luzia Frateschi Trivelato*

PROGRAMA PRÓ-UNIVERSITÁRIO

Coordenadora Geral: *Eleny Mitrulis*

Vice-coordenadora Geral: *Sônia Maria Vanzella Castellar*

Coordenadora Pedagógica: *Helena Coharik Chamlian*

Coordenadores de Área

Biologia:

Paulo Takeo Sano – Lyría Mori

Física:

Maurício Pietrocola – Nobuko Ueta

Geografia:

Sônia Maria Vanzella Castellar – Elvio Rodrigues Martins

História:

Kátia Maria Abud – Raquel Glezer

Língua Inglesa:

Anna Maria Carmagnani – Walkyria Monte Mór

Língua Portuguesa:

Maria Lúcia Victório de Oliveira Andrade – Neide Luzia de Rezende – Valdir Heitor Barzotto

Matemática:

Antônio Carlos Brolezzi – Elvia Mureb Sallum – Martha S. Monteiro

Química:

Maria Eunice Ribeiro Marcondes – Marcelo Giordan

Produção Editorial

Dreampix Comunicação

Revisão, diagramação, capa e projeto gráfico: *André Jun Nishizawa, Eduardo Higa Sokei, José Muniz Jr. Mariana Pimenta Coan, Mario Guimarães Mucida e Wagner Shimabukuro*

The background is a light green, semi-transparent overlay on a white background. It features a large clock face in the upper left, a gear in the lower right, and a hand holding a pencil in the center. The text is centered over the clock and gear.

***Cartas ao
Aluno***

Carta da

Pró-Reitoria de Graduação

Caro aluno,

Com muita alegria, a Universidade de São Paulo, por meio de seus estudantes e de seus professores, participa dessa parceria com a Secretaria de Estado da Educação, oferecendo a você o que temos de melhor: conhecimento.

Conhecimento é a chave para o desenvolvimento das pessoas e das nações e freqüentar o ensino superior é a maneira mais efetiva de ampliar conhecimentos de forma sistemática e de se preparar para uma profissão.

Ingressar numa universidade de reconhecida qualidade e gratuita é o desejo de tantos jovens como você. Por isso, a USP, assim como outras universidades públicas, possui um vestibular tão concorrido. Para enfrentar tal concorrência, muitos alunos do ensino médio, inclusive os que estudam em escolas particulares de reconhecida qualidade, fazem cursinhos preparatórios, em geral de alto custo e inacessíveis à maioria dos alunos da escola pública.

O presente programa oferece a você a possibilidade de se preparar para enfrentar com melhores condições um vestibular, retomando aspectos fundamentais da programação do ensino médio. Espera-se, também, que essa revisão, orientada por objetivos educacionais, o auxilie a perceber com clareza o desenvolvimento pessoal que adquiriu ao longo da educação básica. Tomar posse da própria formação certamente lhe dará a segurança necessária para enfrentar qualquer situação de vida e de trabalho.

Enfrente com garra esse programa. Os próximos meses, até os exames em novembro, exigirão de sua parte muita disciplina e estudo diário. Os monitores e os professores da USP, em parceria com os professores de sua escola, estão se dedicando muito para ajudá-lo nessa travessia.

Em nome da comunidade USP, desejo-lhe, meu caro aluno, disposição e vigor para o presente desafio.

Sonia Teresinha de Sousa Penin.

Pró-Reitora de Graduação.

Carta da

Secretaria de Estado da Educação

Caro aluno,

Com a efetiva expansão e a crescente melhoria do ensino médio estadual, os desafios vivenciados por todos os jovens matriculados nas escolas da rede estadual de ensino, no momento de ingressar nas universidades públicas, vêm se inserindo, ao longo dos anos, num contexto aparentemente contraditório.

Se de um lado nota-se um gradual aumento no percentual dos jovens aprovados nos exames vestibulares da Fuvest — o que, indubitavelmente, comprova a qualidade dos estudos públicos oferecidos —, de outro mostra quão desiguais têm sido as condições apresentadas pelos alunos ao concluírem a última etapa da educação básica.

Diante dessa realidade, e com o objetivo de assegurar a esses alunos o patamar de formação básica necessário ao restabelecimento da igualdade de direitos demandados pela continuidade de estudos em nível superior, a Secretaria de Estado da Educação assumiu, em 2004, o compromisso de abrir, no programa denominado Pró-Universitário, 5.000 vagas para alunos matriculados na terceira série do curso regular do ensino médio. É uma proposta de trabalho que busca ampliar e diversificar as oportunidades de aprendizagem de novos conhecimentos e conteúdos de modo a instrumentalizar o aluno para uma efetiva inserção no mundo acadêmico. Tal proposta pedagógica buscará contemplar as diferentes disciplinas do currículo do ensino médio mediante material didático especialmente construído para esse fim.

O Programa não só quer encorajar você, aluno da escola pública, a participar do exame seletivo de ingresso no ensino público superior, como espera se constituir em um efetivo canal interativo entre a escola de ensino médio e a universidade. Num processo de contribuições mútuas, rico e diversificado em subsídios, essa parceria poderá, no caso da estadual paulista, contribuir para o aperfeiçoamento de seu currículo, organização e formação de docentes.

Prof. Sonia Maria Silva

Coordenadora da Coordenadoria de Estudos e Normas Pedagógicas

Apresentação da área

A Física é tida pelos estudantes como uma área de conhecimento de difícil entendimento. Por exigir nível de raciocínio elevado e grande poder de abstração para entender seus conceitos, acaba-se acreditando que o conhecimento físico está distante do cotidiano das pessoas. No entanto, se olharmos para o mundo que nos cerca com um pouco de cuidado, é possível perceber que a Física está muito perto: a imagem no tubo de televisão só existe porque a tecnologia moderna é capaz de lidar com elétrons e ondas eletromagnéticas. Nossos veículos automotores são máquinas térmicas que funcionam em ciclos, os quais conhecemos e a partir deles produzimos energia mecânica necessária para nos locomovermos. O Sol é na verdade uma grande fonte de emissão de radiação eletromagnética de diferentes frequências, algumas visíveis e outras não, sendo que muitas delas podem fazer mal à nossa saúde.

Assim, o que pretendemos neste curso de Física é despertar em vocês a sensibilidade para re-visitare o mundo com um “olhar” físico, de forma a ser capaz entendê-lo através de suas teorias.

Serão seis módulos, cada qual tratando de um tema pertencente às seguintes áreas da Física: Luz e Som; Calor; Eletromagnetismo, Mecânica, Energia e Física Moderna. Esses módulos abordarão os conteúdos físicos, tratando aspectos teóricos, experimentais, históricos e suas relações com a tecnologia e sociedade.

A Física pode ser interessante e prazerosa quando se consegue utilizar seus conceitos para estabelecer uma nova relação com a realidade.

Bom estudo para todos!

A coordenação

Apresentação do módulo

A vida do adolescente hoje é diferente daquela que levava um adolescente há 30 ou 40 anos. Para ter certeza disso, basta perguntar como era telefonar para o Rio de Janeiro na década de 1950. Horas aguardando uma linha, sem falar no trabalho de discar para uma telefonista, ditar o número desejado e falar como se a outra pessoa se estivesse num outro mundo devido aos ruídos e chiados. A ciência e a tecnologia transformaram essa realidade: com um pequeno telefone celular temos o mundo ao alcance de nossos dedos. Porém, você já imaginou como seria um telefone celular sem os dispositivos disponíveis pelo advento de técnicas sofisticadas, que utilizam semicondutores e novos materiais de alta tecnologia? Você certamente já viu como era um rádio antigo: enorme, pois funcionava com válvulas eletrônicas. O uso de semicondutores trouxe inúmeras vantagens na vida cotidiana. Os telefones celulares, os microcomputadores, as câmeras digitais, a transmissão em tempo real de notícias via satélites artificiais, são alguns dos muitos equipamentos do cotidiano de uma pessoa dos nossos dias.

As mudanças podem ser percebidas em outras áreas de nossas vidas. Por exemplo, hoje em dia, dificilmente um diagnóstico é feito sem o auxílio de imagens feitas com o uso de raios X ou de ultra-som, seja no dentista ou no médico. Quando se trata de problemas cardíacos e vasculares muitas vezes diagnósticos e terapias são feitos com o uso de rádio isótopos ou por uma associação destes com raios X. As descobertas tanto da medicina como da física atômica e nuclear estão sendo usadas para o bem-estar da humanidade.

Talvez você não saiba que toda essa modernidade está ligada às pesquisas nas áreas de física. Muitos pesquisadores, tanto na área de pesquisa pura como na área tecnológica, têm se dedicado ao estudo do átomo e das partículas elementares. Muitos trabalhos desenvolvidos para a pesquisa acabam beneficiando a todos no cotidiano. Até mesmo facilidades existentes, como o uso de aparelhos cada vez menores, não seriam possíveis sem o desenvolvimento da pesquisa científica envolvendo o mundo atômico. Os microcomputadores de hoje são muito mais eficientes que os primeiros computadores que surgiram. Apesar do seu custo ainda alto, não se pode comparar ao custo dos primeiros computadores, caríssimos e que ocupavam salas enormes refrigeradas a 20°C.

O desenvolvimento científico vem sendo feito desde o tempo dos gregos. Embora os métodos tenham variado muito, a pergunta fundamental de como é o nosso universo permanece fascinando a humanidade.

Neste módulo veremos resumidamente como a teoria atômica foi desenvolvida com a introdução de conceitos inteiramente novos, que deram origem à teoria quântica. Veremos algumas aplicações de física atômica e nuclear na medicina, ilustrando a vasta área do conhecimento envolvendo o mundo microscópico.

Unidade 1

Estrutura da matéria

INTRODUÇÃO

Vivemos em um mundo onde as “coisas” são macroscópicas, porém o homem sempre se preocupou em desvendar um outro mundo, o chamado mundo microscópico. Para isso, teve que fazer investigações e experimentações, além de criar novas idéias e modelos.

Entre as muitas idéias que surgiram, havia a de que se dividirmos uma porção qualquer de matéria, poderíamos chegar à sua unidade fundamental, ou seja, até uma partícula que não poderia ser mais dividida. Essa idéia, muito antiga, é a da matéria descontínua. Há também a idéia da matéria contínua, no qual podemos dividir a matéria o quanto quisermos e pudermos, sem jamais encontrar sua unidade fundamental.

Essas idéias foram especuladas há 2 500 anos atrás, na Grécia antiga, gerando muita polêmica, como ainda hoje acontece com as novas teorias. Foram os gregos que inventaram o termo **átomo** (**a** = negação; **tomo** = partes, assim não há partes, e portanto, não é divisível). Essas duas escolas filosóficas gregas incitaram o homem à pesquisar a matéria, mas havia um pequeno problema de época: tudo era feito filosoficamente, sem provas experimentais, apenas na retórica.

Como você já dever estar imaginando, as idéias destes filósofos não foram universalmente aceitas. Aliás, até mais ou menos 1600, as idéias sobre a continuidade da matéria eram as mais aceitas. Após essa data, com o advento do estudo dos gases e, principalmente, com as idéias do inglês Robert Boyle (1627-1691), o estudo da natureza corpuscular da matéria evoluiu, sendo abandonada a idéia de continuidade. A nova concepção estabeleceu-se definitivamente por volta de 1803, depois da divulgação da teoria atômica de Dalton.

Da idéia inicial dos gregos até os nossos dias atuais, o átomo passou por muitas reconstruções e modelos, e a evolução desses modelos bem como as suas características estaremos vendo nos próximos capítulos. Procure aproveitar e desfrutar das idéias que esses grandes cientistas tiveram em momentos ímpares de suas vidas e que ajudaram a revolucionar e mudar os pensamentos das suas respectivas épocas.

O MODELO ATÔMICO DE DALTON (1803)



Com base em estudos de outros cientistas anteriores a ele (isso é muito comum em qualquer área do conhecimento humano), o cientista inglês John Dalton (1766-1844) desenvolveu uma teo-

Organizadores

Maurício Pietrocola

Nobuko Ueta

Elaboradores

Guilherme Brockington

Wellington Batista de Sousa

Nobuko Ueta

ria denominada Teoria Atômica de Dalton que propunha um modelo de átomo que pregava as seguintes idéias:

- Toda matéria é constituída por átomos;
- Os átomos são esferas maciças, indivisíveis e neutras;
- Os átomos não podem ser criados nem destruídos;
- Os elementos químicos são formados por átomos simples;
- Os átomos de determinado elemento são idênticos entre si em tamanho, forma, massa e demais propriedades;
- Um composto é formado pela combinação de átomos de dois ou mais elementos que se unem entre si em várias proporções simples. Cada átomo guarda sua identidade química.

A partir da divulgação das idéias de Dalton, seguiu-se um período de intensa aplicação e comprovação da sua teoria. Apesar de começarem a ser evidenciadas várias falhas, Dalton recusava sistematicamente tudo o que contrariasse suas afirmações. Graças ao seu prestígio, suas idéias mantiveram-se inalteradas por algumas décadas.

O MODELO ATÔMICO DE THOMSON (1897)

Joseph John Thomson (1856-1940) derrubou a idéia de que o átomo era indivisível. Com os dados disponíveis na época, propôs um modelo mais coerente que o de Dalton.



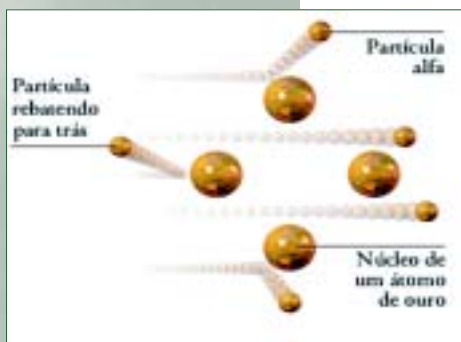
Primeiramente ele considerou que toda matéria era constituída de átomos. Estes átomos continham partículas de carga negativa, denominadas **elétrons**. Eletricamente neutros, os átomos apresentavam uma distribuição uniforme, contínua e esférica de carga positiva, no qual os elétrons distribuíam-se uniformemente, conforme a figura. Essa distribuição garante o equilíbrio elétrico, evitando o colapso da estrutura. O diâmetro do átomo seria da ordem de 10^{-10} m.

O átomo de Thomson também ficou conhecido como o Modelo do Pudim de Passas, no qual as passas representam os elétrons e a massa do pudim, a carga elétrica positiva.

O MODELO ATÔMICO DE RUTHERFORD (1911)

Em 1911 o físico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937), ganhador do prêmio Nobel em 1908, fez sua “experiência de espalhamento de partículas alfa” para suas novas descobertas sobre a estrutura do átomo, surgindo daí a base para o modelo de átomo que estudamos até os dias de hoje.

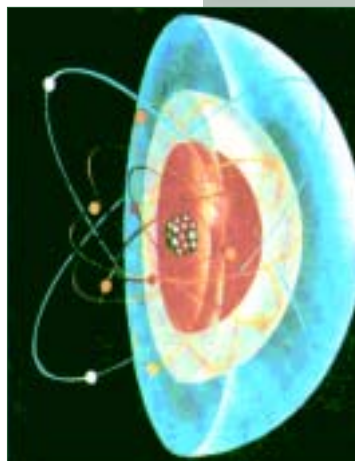
Em sua experiência, Rutherford bombardeou uma fina folha de ouro com partículas alfa (pequenas partículas radioativas portadoras de carga elétrica positiva emitidas por alguns átomos radioativos, como o polônio). Observou que a maioria atravessou a lâmina, outras mudaram ligeiramente de direção e algumas ricochetearam. Este acontecimento foi evidenciado por uma tela com material fluorescente apropriado, usado na identificação de partículas alfa. Mas o que Rutherford esperava com isso? Ele esperava que, segundo o modelo de Thomson, as partículas alfa atravessassem a folha de ouro quase sem sofrer desvios.



Vale ressaltar como nota histórica que as leis de Michael Faraday (1834) sobre a eletrólise levaram G. J. Stoney a sugerir que a eletricidade deveria ser formada por corpúsculos, aos quais ele chamou de “elétrons”. Muitos anos mais tarde, explicando a natureza dos raios catódicos, Thomson (1897) concretizou a existência dos elétrons.

Entretanto, os desvios foram muito mais intensos do que se poderia supor (algumas partículas até ricochetearam). Foi a partir dessa experiência que Rutherford levou suas idéias para o meio científico. A idéia de Thomson para o átomo foi mantida em parte, mas com modificações estruturais importantes.

Rutherford propôs que os átomos seriam constituídos por um núcleo muito denso, carregado positivamente, onde se concentraria praticamente toda a massa. Ao redor desse núcleo positivo ficariam os elétrons, distribuídos espaçadamente numa região denominada de eletrosfera. Comparou seu modelo ao do sistema solar, onde o Sol seria o núcleo, e os planetas, os elétrons. Surge então o célebre modelo planetário do átomo.



De sua experiência Rutherford também pode concluir, fazendo medidas quantitativas, que o átomo teria um núcleo com diâmetro da ordem de 10^{-13} cm e que o diâmetro do átomo seria da ordem de 10^{-8} cm. Isso significa que o núcleo é aproximadamente cem mil vezes menor que o átomo. A medida 10^{-8} cm passou a ser chamada por uma unidade de medida conhecida por angstrom ($1\text{Å} = 10^{-8}$ cm).

Portanto, as principais características do átomo de Rutherford são as seguintes:

- O átomo não é maciço, mas formado por uma região central, denominada núcleo, muito pequeno em relação ao diâmetro atômico;
- Esse núcleo concentra toda a massa do átomo e é dotado de carga elétrica positiva, onde estão os prótons;
- Na região ao redor do núcleo, denominada de eletrosfera, estão girando em órbitas circulares os elétrons (partículas muito mais leves que os prótons, cerca de 1836 vezes), neutralizando a carga nuclear.

As partículas alfa (α) são constituídas por núcleos de Hélio (dois prótons e dois nêutrons) com carga $+2$ (${}_{2}\alpha$) e massa $4u$ (${}^4\alpha$).

*Partículas do átomo
Os prótons têm carga elétrica positiva, os elétrons carga negativa e os nêutrons não têm carga nenhuma.*

Nêutrons
Prótons
NÚCLEO
Elétrons

Os prótons foram descobertos em 1904 pelo próprio Rutherford. Os nêutrons só seriam descobertos mais tarde pelo inglês James Chadwick em 1932. A partir da descoberta dos nêutrons, o modelo atômico teve de incorporar os prótons, elétrons e nêutrons. Os prótons e os nêutrons estariam no núcleo atômico e os elétrons giravam em torno deste.

Partícula	Massa relativa (u)	Carga Relativa (u.c.e)
Nêutron	1	0
Próton	1	+1
Elétron	$\frac{1}{1836}$	-1

u = unidade de massa atômica = $1,66 \cdot 10^{-24}$ gramas

u.c.e = unidade de carga elétrica = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

Pare para pensar nos avanços nos modelos atômicos desde os gregos até este de Rutherford. Quantos estudos independentes tiveram de ser feitos para que chegássemos a essas conclusões: estudo das massas, leis de conservação da energia, radioatividade, muita matemática e cálculos avançados. Os cálculos foram muitas vezes o alicerce que os cientistas tinham para que essas informações fossem divulgadas para o meio científico. Aliás, foi esta matemática associada aos estudos sobre a natureza da luz e da radiação dos corpos incandescentes que deu suporte para o desenvolvimento da teoria quântica da matéria.

Você já deve ter entendido que o átomo não foi descoberto por uma pessoa em especial. Você viu que Dalton propôs um modelo que tinha falhas, as quais foram cobertas por outras teorias, e outras, e outras, etc... Todas tentando explicar a velha indagação dos antigos gregos: a matéria é contínua ou descontínua?

O átomo foi sendo descoberto aos poucos através de inúmeras teorias provadas cientificamente desde 1803, com Dalton. Mas mesmo no modelo atômico proposto por Rutherford, em 1911, havia ainda certas perguntas que esse modelo não explicava, por exemplo: como explicar que partículas com cargas de mesmo sinal se concentravam no núcleo do átomo? Não deveriam os prótons repelirem-se, obedecendo à lei de Du Fay? Outro detalhe é que, segundo os trabalhos de James Clerck Maxwell (1831-1879) sobre eletromagnetismo, partículas carregadas e em movimento acelerado irradiam energia (ondas eletromagnéticas) e, portanto, “gastam” energia. Sendo assim, os elétrons não poderiam ter órbita circular estável e estariam sofrendo perda constante de energia durante seu giro em torno do núcleo, caindo rapidamente no núcleo! Contudo, isso não ocorre. Como explicar esse fenômeno?

Apesar dessas indagações não respondidas pela estrutura de Rutherford, isso não significa que tenhamos que abandoná-la por completo. O átomo de Rutherford provou a existência do núcleo, mas falhou na explicação da estabilidade do átomo. Esse problema só seria resolvido com a criação de um novo modelo proposto por Niels Bohr (1885-1965), como uma correção do modelo de Rutherford e que será vista a seguir.

RELEMBRANDO

Número atômico (Z) corresponde a quantidade de prótons presentes no núcleo do átomo; número de massa (A) é a soma do número de prótons (Z) e o de nêutrons (n). Por convenção indica-se o número de massa da seguinte maneira (utilizando como exemplo o oxigênio): ^{16}O . O número atômico é indicado dessa maneira: $_{8}\text{O}$.

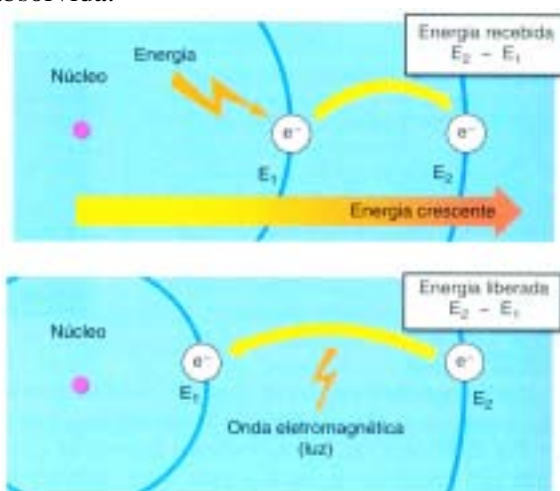
(Exercício Proposto) Leia novamente e com muita atenção o texto sobre os modelos atômicos de Dalton, Thomson e Rutherford e escreva em poucas palavras as idéias centrais sobre cada modelo. Procure notar a partir de qual modelo introduz-se as cargas elétricas no interior do átomo e a forma como elas estão distribuídas.

O MODELO ATÔMICO DE BOHR (1913)

Em 1913, o físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), ganhador do prêmio Nobel em 1922, propôs um modelo atômico explicando a estabilidade do átomo. Para isso, Bohr baseou-se na Teoria Quântica, do alemão Max Planck (1858-1947), obtendo, desse modo, um excelente resultado. Após um detalhado estudo do espectro descontínuo do átomo de hidrogênio, que possui apenas um elétron movendo-se em torno do núcleo, Bohr propõe um modelo atômico por meio dos seguintes postulados:

Em 1733, Charles François Du Fay (1698-1739), um químico francês, mostrou que duas porções do mesmo material (por exemplo âmbar) eletrizadas por atrito com um tecido, repeliam-se, mas o vidro eletrizado atraía o âmbar eletrizado. A partir dessa experiência Du Fay propôs que deveriam existir duas espécies de eletricidade, que mais tarde seriam chamados de fluidos elétricos. Esses fluidos estariam em quantidades iguais, o que tornaria os corpos neutros. A partir dessa idéia e do amadurecimento de outras chegou-se ao Princípio da Atração e Repulsão, o qual pode ser enunciado da seguinte forma: cargas de mesmo sinal se repelem e cargas de sinais opostos se atraem.

- O elétron descreve órbitas circulares ao redor do núcleo, cujos raios r_n dessas órbitas são dados pela expressão: $r_n = n^2 \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot h^2}{\pi \cdot m \cdot Z \cdot e^2}$.
- As órbitas foram chamadas por Bohr de estados estacionários. Portanto, diz-se que o elétron está em um estado estacionário ou em um nível de energia, no qual cada órbita é caracterizada por um número quântico (n), que pode assumir valores inteiros entre 1, 2, 3...
- Um elétron que permanece em um dado estado estacionário não emite energia, apresentando assim energia constante;
- A passagem de um elétron de uma órbita para outra supõe absorção ou emissão de determinada quantidade de energia, conforme o elétron se move de uma posição menos energética para outra mais energética e vice-versa;
- a energia é absorvida ou liberada na forma de radiação eletromagnética e é calculada pela expressão $\Delta E = h \cdot f$ ou $E_i - E_f = h \cdot f$, onde E_i e E_f correspondem, respectivamente, à energia do elétron nos estados de energia n_i e n_f e f corresponde à frequência da onda eletromagnética (luz) emitida ou absorvida.

**NÃO SE ESQUEÇA**

A frequência f da onda eletromagnética absorvida ou liberada é medida em Hertz (Hz) e h corresponde a constante de Planck, que equivale a $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s.

CUIDADO**Unidades de medida**

A unidade de energia, ao fazer o cálculo pela expressão $\Delta E = h \cdot f$, é expressa em Joule (J), no Sistema Internacional de Medidas. Não se esqueça que também podemos usar como unidade de energia o elétron-volt (eV), onde: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ou $1 \text{ J} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV}$; e podemos obter a constante de Planck em eV . s: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV} \cdot \text{s} = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$.

O modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio

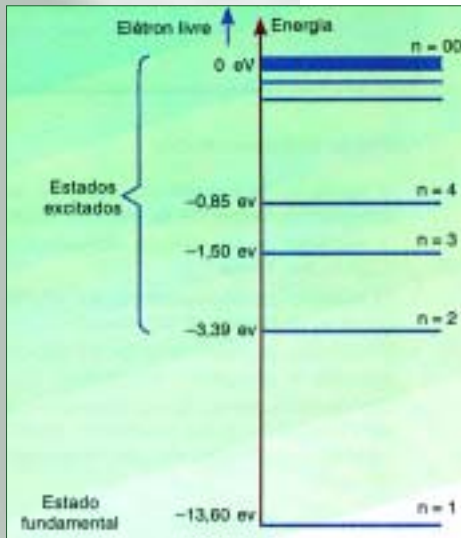
Analisando o modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, concluímos que o estado de menor nível de energia corresponde a $n = 1$, chamado de **estado fundamental**.

Quando o próprio Bohr e outros cientistas tentaram aplicar esse modelo a outros átomos com mais de um elétron, verificaram que este falhava totalmente. A conclusão é que deveria haver outros fatores a influenciar em átomos com mais de um elétron. De qualquer forma, esse modelo teve grande importância, pois introduziu a ideia de "quantização de energia" no estudo do átomo.

Pela expressão do raio r_n , descobre-se que o raio para a órbita no nível $n = 1$, chamado de raio de Bohr, é de $r_1 \cong 0,52 \cdot 10^{-10}$ m ou $0,52 \text{ \AA}$, e que os raios para as demais órbitas podem ser generalizadas pela expressão: $r_n = n^2 \cdot r_1$.

A energia no estado fundamental chamada de E_1 tem o valor $-13,60$ eV, calculada pela expressão:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{m \cdot Z^2 \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^2} = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{13,60}{n^2}$$



Nas expressões do raio r_n e da energia E_n considera-se $n = 1, 2, 3 \dots$ para cada órbita permitida. Além disso, ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo ($8,85 \cdot 10^{-12}$), h é a constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s), π é o conhecido número pi (3,14), m é a massa do elétron ($9,1 \cdot 10^{-31}$ kg) bem como e é o valor de sua carga elétrica em módulo (carga elementar = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C). Z é o número atômico (número de prótons no núcleo do átomo) do elemento considerado, no caso para o hidrogênio $Z = 1$.

No modelo de Bohr, se um elétron receber a energia adequada, ele passará para um estado de maior energia, chamado de estado excitado, mas ficará nesse estado por um curtíssimo intervalo de tempo; rapidamente ele emitirá um fóton (onda eletromagnética) e voltará para o estado fundamental. Na figura ao lado, temos o diagrama de níveis de energia para o átomo de hidrogênio.

(Exercício Resolvido) Considere que o elétron no átomo de hidrogênio “salte” do nível de energia $n = 3$ para o estado fundamental (nível $n = 1$). Baseando-se no diagrama de níveis para o átomo de hidrogênio, responda:

- Ao realizar esse “salto”, o elétron absorveu ou emitiu energia? Qual o valor, em elétron-volt, dessa energia, envolvida?
- Qual o valor da energia, em Joule, e da frequência do fóton ao realizar essa transição de níveis?

Resolução:

a) Realizando a transição do nível de maior energia ($n = 3$) para o de menor energia ($n = 1$), pelo modelo de Bohr deve ocorrer a liberação de energia na forma de luz (radiação eletromagnética, isto é, emissão de um fóton). A energia irradiada (ΔE) é calculada pela diferença entre as energias de cada nível da transição. Pelo diagrama de níveis de energia para o hidrogênio, temos:

$$E_3 = -1,50 \text{ eV} \quad \text{e} \quad E_1 = -13,60 \text{ eV}$$

$$\Delta E = E_3 - E_1$$

$$\Delta E = -1,50 - (-13,60)$$

$$\Delta E = +12,10 \text{ eV}$$

b) Como a energia do fóton emitido é igual a diferença de energia entre os níveis ΔE , temos que a energia do fóton é de $E = 12,10$ eV, e pela expressão $E = h \cdot f$ podemos calcular a frequência do fóton emitido:

$$f = \frac{E}{h} \Rightarrow f = \frac{12,10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}} \Rightarrow f = 2,92 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

NÃO FIQUE COM DÚVIDAS

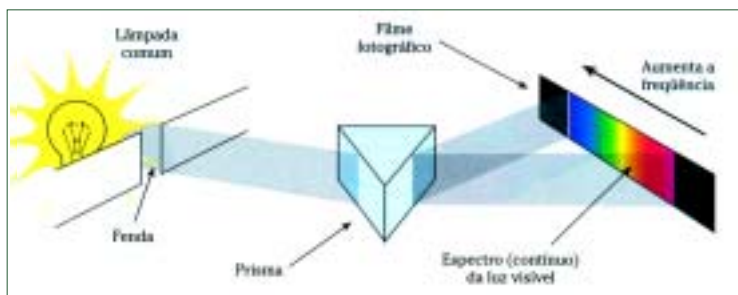
Para converter os 12,10 eV em J (Joule), o valor 12,10 foi multiplicado por $1,6 \cdot 10^{-19}$ J, que por definição 1 eV (elétron-volt) é a energia que um elétron recebe ao ser acelerado por meio de uma diferença de potencial $U = 1$ V.

(Exercício Proposto) Suponha que no átomo de hidrogênio, um elétron do nível de energia $n = 2$, volte para o estado fundamental. Baseando-se no diagrama de níveis para o átomo de hidrogênio, responda:

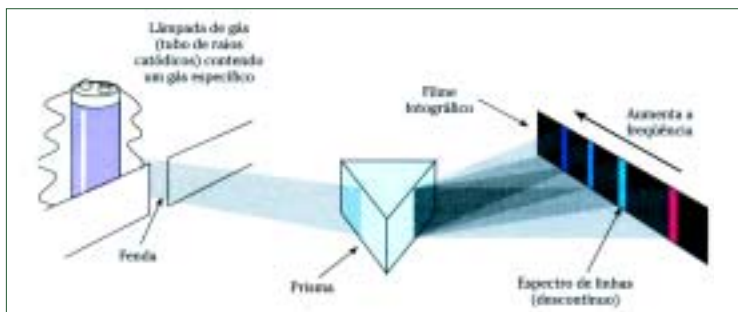
- Ao realizar essa transição, o elétron absorveu ou emitiu energia? Qual o valor, em elétron-volt, dessa energia envolvida?
- Qual o valor da energia, em Joule, e da frequência do fóton ao realizar essa transição de níveis?

ESPECTROS ATÔMICOS

Se fizermos a luz de uma lâmpada comum (de filamento incandescente) passar através de um prisma, ela será decomposta em várias cores, que são popularmente conhecidas como arco-íris. Cientificamente, o que se obtém é chamado de **espectro da luz visível**.

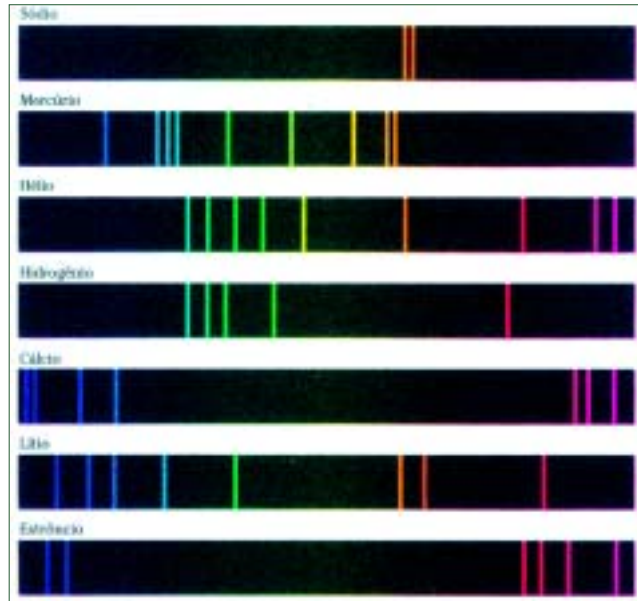


Contudo se repetirmos essa experiência utilizando a luz proveniente de uma lâmpada de gás, não obteremos o espectro completo. Apenas algumas linhas estarão presentes, correspondendo somente a algumas frequências das ondas de luz visível. Essas linhas formam o **espectro de linhas** ou **espectro atômico**.



Alguns exemplos de espectros atômicos aparecem na figura abaixo. Como você pode perceber, as linhas obtidas dependem do elemento utilizado e são descontínuas. É extremamente intrigante a razão pelo qual isso acontece. Utilizando o modelo atômico de Bohr pode-se explicar o mistério dos espectros atômicos. Conforme seus postulados, os elétrons, ao serem excitados por uma fonte externa de energia, saltam para um nível de maior energia e, ao retornarem aos níveis de menor energia, liberam energia na forma de luz (fótons). Como a cor da luz emitida depende da energia entre os níveis envolvidos na transição e como essa diferença varia de elemento para elemento, a luz apresentará cor característica para cada elemento químico.

Dentre os espectros atômicos, vale ressaltar que o espectro de emissão existe quando o elétron perde energia emitindo um fóton e o espectro de absorção existe quando o elétron ganha energia absorvendo um fóton.



Espectro Atômico de alguns elementos [legenda]

NÚMERO DE MASSA (A) E NÚMERO ATÔMICO(Z) DOS ELEMENTOS:

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| Sódio (Na: A=23 e Z=11); | Cálcio (Ca: A=40 e Z=20); |
| Mercúrio (Hg: A=201 e Z=80); | Lítio (Li: A=7 e Z=3); |
| Hélio (He: A=4 e Z=2); | Estrôncio (Sr: A=88 e Z=38). |
| Hidrogênio (H: A=1 e Z=1); | |

Espectro de emissão



Supondo que acima temos uma amostra de hidrogênio que de alguma forma foi excitada, podemos observar que um elétron saltou do nível 2 para o nível 3. Em seguida, ele retorna para seu estado inicial n = 2, emitindo um fóton. No estado n = 3 a energia é $E_3 = -1,51 \text{ eV}$ e no estado n = 2, a energia é $E_2 = -3,4 \text{ eV}$. Dessa forma, podemos calcular a frequência do fóton emitido:

$$\Delta E = h \cdot f \quad \Rightarrow \quad f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E_3 - E_2}{h}$$

$$f = \frac{-1,51 - (-3,4)}{4,1 \cdot 10^{-15}} \quad \Rightarrow \quad f = 4,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Utilizando uma chapa fotográfica podemos registrar essa linha e outras que sejam emitidas. Como houve emissão de energia pelo átomo, esse espectro recebe o nome de **espectro de emissão**.

Espectro de absorção



Supondo que agora a amostra de hidrogênio é atravessada por um feixe de luz, os elétrons do gás podem absorver a energia da luz incidente, ou melhor, os fótons. Entretanto não é qualquer fóton que interessa para os elétrons, mas apenas aqueles cuja energia for suficiente para proporcionar um salto quântico entre os níveis de energia permitidos. Assim, alguns fótons de certa energia (frequência) serão absorvidos, enquanto outros passarão e não serão absorvidos pelo gás.

Imaginando que um elétron que esteja ocupando o nível $n = 2$, com energia $E_2 = -3,4 \text{ eV}$, absorva um determinado fóton do feixe incidente, saltando para uma órbita mais afastada, por exemplo $n = 4$, com energia $E_4 = -0,85 \text{ eV}$, a frequência do fóton absorvido será:

$$\Delta E = h \cdot f \quad \Rightarrow \quad f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E_4 - E_2}{h}$$

$$f = \frac{-0,85 - (-3,4)}{4,1 \cdot 10^{-15}} \quad \Rightarrow \quad f = 6,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Mais uma vez, utilizando uma chapa fotográfica podemos registrar esse espectro. Só que agora teremos um espectro diferente do espectro de emissão, pois aparecerão linhas escuras, relativas à luz de certas frequências convenientes e que foram absorvidas do feixe incidente. Como houve absorção de energia, esse espectro recebe o nome de **espectro de absorção**.

Assim, os espectros de emissão e absorção ocupam a mesma posição, pois estão associados a uma mesma frequência, sendo que a diferença fundamental é que as linhas de emissão correspondem a fótons emitidos num salto quântico ao passo que as linhas escuras de absorção correspondem a fótons absorvidos durante um salto quântico.

(Exercício Proposto) Com base no modelo atômico de Bohr, seus postulados e espectros atômicos, procure justificar por que no espectro de emissão do hidrogênio existem cinco raias visíveis (ver figura do espectro atômico de alguns elementos), se ele é um elemento que possui apenas um elétron em seu estado fundamental.

RESUMO

- Os gregos deram a “idéia” de que tudo o que existe era formado por átomos (a = negação; tomos = partes, isto é, algo não divisível).
- Para Dalton, o átomo é uma esfera maciça e neutra, onde cada átomo possui um tamanho próprio, que permite caracterizá-lo (modelo atômico da bola de bilhar).
- Para Thomson, o átomo é uma esfera positiva com cargas negativas incrustadas, semelhante a um pudim de passas (modelo atômico do pudim de passas).
- Para Rutherford, o átomo possui partículas positivas e neutras em sua região central (núcleo) e ao seu redor, em sua periferia (eletrosfera), estariam girando partículas negativas (modelo planetário).
- Para Bohr, o átomo possui níveis de energia bem determinados, no qual o elétron podem realizar saltos “quânticos” entre esses níveis. A energia absorvida ou liberada na forma de radiação eletromagnética, quando o elétron realiza uma transição de níveis, é dada pela expressão: $\Delta E = h.f$.
- Para o átomo de hidrogênio, a energia em um determinado nível energético (n) é dada pela expressão: $E = -\frac{13,60}{n^2}$, onde a energia é medida em eV (elétron-volt).
- Cada elemento possui um espectro atômico característico. Os espectros podem ser de emissão ou absorção.

Unidade 2

Mecânica quântica

INTRODUÇÃO

A história da Mecânica Quântica surgiu em 1900 com o físico alemão Max Planck (1858-1957) como tentativa de explicar os resultados experimentais obtidos na emissão de energia por um corpo incandescente. Este problema conhecido como a **Radiação do Corpo Negro** atormentava os físicos do final do século XIX, que tentavam resolvê-lo utilizando as leis do Eletromagnetismo, porém sem obter nenhum sucesso.

A equação que resolveria esse problema só foi obtida em 1900, por Planck, que, para obtê-la, teve de fazer uma hipótese ousada. Vale ressaltar que, segundo Planck, essa hipótese foi feita por “puro desespero”, pois nem ele mesmo acreditava nela.

Ele considerou que a radiação emitida por um corpo não ocorria de maneira contínua, mas sim na forma de pequenos “pacotes” de energia, que poderia ser expresso pela equação: $E = h \cdot f$, onde E é a energia do quantum, f é a frequência da radiação emitida e h é uma constante chamada constante de Planck. Assim, qualquer que fosse a quantidade de energia emitida por um corpo, ela deveria ser sempre um múltiplo de E .

Verificou-se, logo depois, que, incidindo luz ultravioleta ou luz visível sobre determinados metais, estes perdem elétrons. Coube ao alemão naturalizado americano Albert Einstein (1879-1955), em 1905, a explicação e a medida quantitativa do fenômeno, utilizando a teoria dos quanta, que veio também a ser aplicada aos fenômenos luminosos, concluindo que o quantum é uma determinada quantidade de energia associada ao fóton da luz. A cada radiação e a cada onda eletromagnética está associada uma frequência e, segundo Planck, a cada frequência está associado um pacote de energia: o quantum.

Daí começaram a surgir perguntas: por que o espectro de elementos no estado gasoso é sempre descontínuo? Por que o espectro do hidrogênio, elemento de um só elétron, é o mais simples? Por que a complexidade do espectro aumenta à medida que aumenta o número de elétrons de um elemento?

As respostas para tais perguntas e muitas outras foram dadas pelas idéias criadas por Planck, Einstein, De Broglie e outros cientistas que se debruçaram sobre essas questões. O estudo dessas idéias, a quantização da matéria e a explicação de muitos problemas que atormentaram os físicos até o final do século XIX serão dados na continuação desta intrigante parte da Física, denominada de Mecânica Quântica.

Organizadores

Maurício Pietrocola

Nobuko Ueta

Elaboradores

Guilherme Brockington

Wellington Batista de Sousa

Nobuko Ueta

VOCABULÁRIO

quanta = pacotes de energia (plural)	quantum = pacote de energia (singular)
$h =$ constante de Planck = $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s	fóton = é o outro nome dado ao quantum
$f =$ a frequência é medida em Hertz (Hz)	$E =$ a energia é em Joule (J)

(Exercício Resolvido) A frequência da onda da radiação eletromagnética verde (luz verde) é de $6 \cdot 10^{14}$ Hz. Qual o valor de um quantum (energia) dessa radiação? (Considere a constante de Planck como $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s)

Resolução:

São dados no problema

$$f = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz (luz verde)} \quad \text{e} \quad h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s (constante de Planck)}$$

Pela expressão da energia transportada por um pacote de energia (um quantum), temos:

$$E = h \cdot f = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{14} \Rightarrow E = 3,978 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

(Exercício Proposto) Uma fonte de radiação consegue emitir ondas eletromagnéticas de frequência igual a $2,0 \cdot 10^{15}$ Hz. Calcule, em joules, a energia transportada por um quantum dessa radiação. Considere a constante de Planck como igual a $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s.

SAIBA MAIS

Absorção de fótons

Você sabe por que as folhas são verdes? Quando ocorre a fotossíntese nas folhas, parte da luz branca do Sol é usada na reação química que usa o gás carbônico do ar e a água para produzir oxigênio, na forma de gás O_2 , e alimento para a planta. Parte da luz (desde vermelha até amarela e desde azul até violeta) é usada pela planta. Fótons dessas cores são absorvidas, sobrando então a luz verde! Dependendo da planta, a luz pode ser usada de forma um pouco diferente. Somos premiados, então, com diferentes nuances de verde, dependendo das intensidades das luzes que sobram!

O EFEITO FOTOELÉTRICO

Um importante passo no desenvolvimento das concepções sobre a natureza da luz foi dado no estudo de um fenômeno muito interessante, que recebeu o nome de efeito fotoelétrico. O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons pela matéria sob a ação da luz visível ou ultravioleta. À primeira vista o efeito fotoelétrico tem uma explicação simples. A onda eletromagnética (luz) ao incidir sobre o material, transfere aos seus elétrons certa energia. Uma parte dessa energia é usada para realizar o trabalho de “arrancar” o elétron do material, o restante é transformado em energia de movimento para o elétron (energia cinética). Esse fenômeno pode acontecer com vários materiais, mas é mais facilmente observado em metais.

O real esclarecimento do efeito fotoelétrico foi realizado em 1905 por Albert Einstein, que desenvolveu a idéia de Planck. Nas leis experimentais do efeito fotoelétrico, Einstein viu uma prova evidente de que a luz tem uma estrutura descontínua e é absorvida em porções independentes. Assim, Einstein disse que a radiação é formada por quanta (fótons). Cada elétron do material sobre o qual incide a luz absorve apenas um fóton. Se a energia desse fóton

for menor do que a necessária para “arrancar” o elétron, este não será emitido, por mais tempo que a radiação incida sobre o corpo.

Considerando E a energia do fóton, $E_{\text{cin(max)}}$ a energia cinética máxima adquirida pelo elétron, W o trabalho realizado para “arrancar” o elétron do material e h , a constante de Planck, obtemos daí a denominada equação fotoelétrica de Einstein:

$$E = W + E_{\text{cin(max)}} \Rightarrow h \cdot f = W + \frac{m \cdot v_{\text{max}}^2}{2}$$

Esta equação permite esclarecer todos os fatos fundamentais relacionados com o efeito fotoelétrico. A intensidade da luz, segundo Einstein, é proporcional ao número de porções de energia contido no feixe luminoso e, por conseguinte, determina o número de elétrons arrancados da superfície metálica. A velocidade dos elétrons, conforme a equação acima, é dada apenas pela frequência da luz (f) e pelo trabalho (W). O trabalho necessário para arrancar o elétron, depende da natureza do metal e da qualidade da sua superfície, e é chamado de função trabalho. Observa-se ainda que a velocidade dos elétrons não depende da intensidade da luz.

Para uma dada substância, o efeito fotoelétrico pode observar-se apenas no caso de a frequência f da luz ser superior ao valor mínimo, chamado de frequência de corte (f_c). Convém reparar que para se poder arrancar um elétron do metal, mesmo sem lhe comunicar energia cinética, é necessário realizar a função trabalho W . Portanto, a energia de um quanta deve ser superior a esse trabalho ($h \cdot f > W$). A frequência de corte (f_c) tem o nome de limite verme-

lho do efeito fotoelétrico e calcula-se pela seguinte relação: $f_c = \frac{W}{h}$.

Como W depende de cada substância, a frequência de corte (f_c) do efeito fotoelétrico, também varia de substância para substância. Podemos citar como exemplo o limite vermelho do zinco, que corresponde ao comprimento de onda $\lambda = 3,7 \cdot 10^{-7}$ m (radiação ultravioleta).

Fótons são partículas que não possuem massa, mas não existem fótons em repouso. Eles têm apenas energia (E) e quantidade de movimento (Q) e só existem com a velocidade da luz ($c = 300.000$ Km/s ou $3 \cdot 10^8$ m/s).

A massa de um elétron vale $9,109 \cdot 10^{-31}$ Kg, de um próton $1,672 \cdot 10^{-27}$ Kg e de um nêutron $1,674 \cdot 10^{-27}$ Kg.

Outra unidade muito utilizada para energia, principalmente quando se fala de energia do elétron é o elétron-volt (eV), onde: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J ou $1 \text{ J} = 6,25 \cdot 10^{18}$ eV e podemos obter a constante de Planck em eV.s: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV.s} = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$.

PENSANDO

Assim como a luz foi “quantizada”, convém lembrar que a chuva também cai na Terra sob a forma de gotas, ou seja, em quantidades pequenas e independentes. Assim, podemos dizer que a água da chuva também é “quantizada”! Você já parou para pensar que geralmente os sorvetes são vendidos em sorveterias de forma quantizada (1 bola, 2 bolas, 3 bolas, 4 bolas, etc.)? Valores como 2,34 bolas ou 4,98 bolas não são oferecidos pelo vendedor.

(Exercício Resolvido) Um fotoelétron do cobre é retirado com uma energia cinética máxima de 4,2 eV. Qual a frequência do fóton que retirou esse elétron, sabendo-se que a função trabalho (W) do cobre é de 4,3 eV? (Considere $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)

Resolução:

Utilizando a equação fotoelétrica de Einstein, temos:

$$E_{\text{cin(max)}} = 4,2 \text{ eV} \quad \text{e} \quad W = 4,3 \text{ eV}$$

$$E = W + E_{\text{cin(max)}} \Rightarrow E = 4,3 \text{ eV} + 4,2 \text{ eV} \Rightarrow E = 8,5 \text{ eV}$$

$$E = h \cdot f \Rightarrow 8,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot f$$

$$\Rightarrow f = \frac{8,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} \Rightarrow f = 2,1 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

(Exercício Proposto) Para que a prata exiba o efeito fotoelétrico é necessário que ela tenha uma frequência de corte de $1,14 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$. Determine:

- função trabalho (W), em J e em eV, para “arrancar” um elétron de uma placa de prata.
- quando uma radiação de frequência de $f = 4 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ atinge a placa de prata, qual a energia cinética máxima dos elétrons emitidos? (massa do elétron = $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$)

SAIBA MAIS

Espalhamento de fótons

Por que o céu é azul? A luz emitida pelo Sol é branca, isto é, existem fótons de várias energias. Os fótons com energia correspondente à luz azul têm maior probabilidade de serem espalhados que os de outras cores. O Sol emite luz para todos os lados, uma parte vem direto para o observador, que enxerga quase branco, e o resto vai para diferentes lados. Todos os fótons (azuis, vermelhos e verdes) são emitidos mas os correspondentes à luz azul podem ser espalhados com maior probabilidade e chegar no olho do observador. Se a atmosfera estiver muito carregada (de partículas de poluição, por exemplo), pode haver absorção dos fótons da luz azul e não os vemos. A cor que vemos depende da energia do fóton que chega na nossa retina.

A natureza “dual” da luz

Para explicar o efeito fotoelétrico, Einstein estabeleceu que a luz, ou qualquer outra forma de radiação eletromagnética, é composta de “partículas” de energia ou fótons. Essa concepção literalmente entra em contradição com a teoria ondulatória da luz que, como já sabemos, é perfeita na explicação de uma série de fenômenos físicos como a reflexão, a refração, a interferência e a difração, apesar de falhar na explicação do efeito fotoelétrico.

Para conciliar tais fatos contraditórios, os físicos propuseram a natureza “dual” da luz, ou seja, “em determinados fenômenos ela se comporta como uma onda (natureza ondulatória) e, em outros, como se fosse uma partícula (natureza corpuscular)”.

Desse modo, uma mesma radiação pode tanto difratar ao passar por um orifício, evidenciando seu caráter ondulatório, como pode, ao incidir em uma superfície, provocar a emissão de elétrons, exibindo seu caráter corpuscular. Mas, afinal, o que é a luz? Hoje aceitamos a dupla natureza da luz, fato cha-

mado de dualidade onda-partícula. Para entender essa situação, o físico dinamarquês Niels Bohr (1855-1962) propôs o Princípio de Complementaridade: “Em cada evento a luz comporta-se como partícula ou onda, mas nunca como ambas simultaneamente”.

HIPÓTESE DE DE BROGLIE

Em 1924, o físico francês Louis de Broglie (1892-1987), mostrou que uma partícula, por exemplo, o elétron, tem um comportamento análogo à luz, ou seja, tem um caráter partícula-onda (dual). Em certos momentos nos interessa o seu comportamento ondulatório, e em outras ocasiões, o seu comportamento de partícula.

Considerando que as ondas eletromagnéticas podem ser interpretadas de forma matemática através das equações, as quais já haviam sido desenvolvidas pelos físicos ao tratar do movimento ondulatório em geral, podemos calcular a quantidade de movimento de um elétron (ou qualquer outra entidade)

quando ele tem um comportamento ondulatório, pela expressão: $Q = \frac{h}{\lambda}$.

Para um fóton que se move na velocidade da luz ($c = 300.000 \text{ km/s}$ ou 3.10^8 m/s), a direção dessa quantidade de movimento coincide com a do raio luminoso. Quanto maior for a frequência, maior será a energia e a quantidade de movimento do fóton e mais evidentes se tornam as propriedades corpusculares da luz. Dado o fato de a constante de Planck ser muito pequena, é muito pequena também a energia dos fótons da luz visível. Os fótons correspondentes à luz verde, por exemplo, possuem a energia de 4.10^{-19} J . Contudo, existem experiências em que o olho humano é capaz de reagir e distinguir diferenças de intensidade luminosa da ordem de alguns quanta.

(Exercício Proposto -UFMG) A natureza da luz é uma questão que preocupa os físicos há muito tempo. No decorrer da história da Física, houve o predomínio ora da teoria corpuscular – a luz seria constituída de partículas – ora da teoria ondulatória – a luz seria uma onda.

- Descreva a concepção atual sobre a natureza da luz.
- Descreva, resumidamente, uma observação experimental que sirva de evidência para a concepção descrita no item anterior.

(Exercício Resolvido) Imagine um elétron que tem massa de $9,1.10^{-31} \text{ kg}$, viajando a uma velocidade de 3.10^6 m/s . Agora, imagine uma pessoa adulta de massa 70 kg e que anda a uma velocidade de 1 m/s . Determine o comprimento de onda (λ) de De Broglie para o elétron e para a pessoa.

Resolução:

Da expressão da quantidade de movimento $Q = \frac{h}{\lambda}$, podemos escrever:

$$\text{Para o elétron: } \lambda = \frac{h}{q} = \frac{h}{m.v} = \frac{6,63.10^{-34}}{9,1.10^{-31}.3.10^6} = 2,4.10^{-10} \text{ m}$$

$$\text{Para a pessoa: } \lambda = \frac{h}{q} = \frac{h}{m.v} = \frac{6,63.10^{-34}}{70.1} = 9,4.10^{-36} \text{ m}$$

Observação: note que os valores são minúsculos, pois a constante de Planck (h) é muito pequena.

(Exercício Proposto) Um elétron, ao retornar de uma órbita mais afastada do núcleo para uma órbita mais próxima do núcleo, emite uma luz visível de frequência igual a $4,0 \cdot 10^{14}$ Hz. Qual o valor da energia dessa luz emitida?

(Exercício Proposto) Qual o comprimento de onda de De Broglie para um próton movendo-se na velocidade da luz ($3 \cdot 10^8$ m/s) e cuja massa vale $1,6 \cdot 10^{-27}$ Kg?

FÍSICA DAS PARTÍCULAS

Com as novas tecnologias, novos equipamentos foram construídos e forneceram condições para que a estrutura da matéria fosse cada vez mais estudada. Novas partículas foram descobertas e as partículas, até então ditas fundamentais, foram sendo substituídas pelas recém-descobertas.

Dessa forma, podemos dizer que tudo que conhecemos consiste em minúsculos átomos, formados por partículas ainda menores, e que a Física de Partículas é a parte da Física que estuda essas últimas, que constituem os mais básicos blocos formadores da matéria no universo.

O estudo das partículas dá aos cientistas o conhecimento amplo do Universo e da natureza da matéria. A maioria deles concorda que o universo se formou numa grande explosão, chamada de Big Bang (existem outras teorias!). Segundos após o Big Bang, acredita-se que as partículas atômicas e a radiação eletromagnética foram as primeiras coisas que passaram a existir no Universo e que deram origem a tudo que existe hoje.

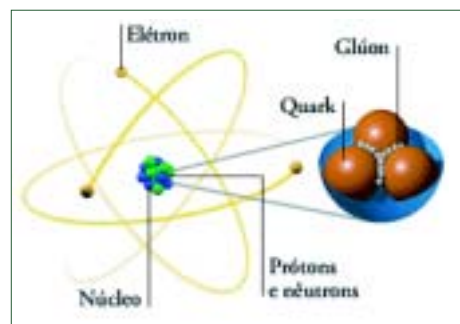
Partículas fundamentais

Hoje, os físicos dividem as partículas atômicas fundamentais em duas categorias: léptons e hádrons. Os léptons são partículas leves e que possuem o spin (número quântico magnético) fracionário. Um exemplo de lépton é o elétron. Os hádrons são partículas mais pesadas que os léptons e se subdividem em bárions e mésons, e podem possuir tanto spin inteiro ou fracionário. Prótons e nêutrons são exemplos de hádrons.

Em 1964, Murray Gell-Man (1929-) e George Zweig (1937-), em trabalhos independentes, propuseram uma teoria segundo a qual:

- os léptons seriam partículas elementares, isto é, sem estrutura;
- os hádrons (bárions e mésons) seriam formados por partículas ainda menores, batizadas de quarks, por Gell-Man.

Existem também as chamadas partículas mediadoras das interações fundamentais, chamadas de bósons. O glúon, por exemplo, é um bóson que une os quarks e estes formam os prótons e os nêutrons no núcleo atômico.



Os quarks se combinam para formar as partículas pesadas, como o próton e o nêutron. As partículas formadas pelos quarks são chamadas hádrons. Tal como outras partículas têm cargas diferentes, tipos diferentes de quarks tem propriedades distintas, chamadas “sabores” e “cores”, que afetam a forma como eles se combinam.

RESUMO

- A energia emitida por um corpo não é contínua, mas é emitida na forma de pacotes de energia (quanta).
- Um quantum possui uma energia dada pela expressão: $E = h \cdot f$, onde E é a energia do quantum, f é a frequência da radiação emitida e h é uma constante chamada constante de Planck.
- A constante de Planck é igual a $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s, no Sistema Internacional de Medidas.
- A natureza quântica da luz se manifesta através do efeito fotoelétrico, no qual um fóton é absorvido por um átomo de um metal, por exemplo, com a emissão de um elétron.
- A equação de Einstein para o efeito fotoelétrico é a seguinte: $E = W + E_{cin(max)}$, onde E é a energia do fóton, W é o trabalho necessário para arrancar o elétron do material (função trabalho) e $E_{cin(max)}$ corresponde a energia cinética máxima do elétron arrancado.
- A frequência de corte (f_c) para que ocorra o efeito fotoelétrico é dada pela expressão:

$$f_c = \frac{W}{h}, \text{ onde } W \text{ é a função trabalho do material e } h \text{ é a constante de Planck.}$$

- A luz possui uma natureza “dual”, ou seja, em determinados fenômenos ela se comporta como uma onda (natureza ondulatória) e, em outros, como se fosse uma partícula (natureza corpuscular).
- A natureza ondulatória dos elétrons foi sugerida pela primeira vez por De Broglie, que propôs a seguinte expressão: $Q = \frac{h}{\lambda}$, onde Q é a quantidade de movimento do elétron, h é a constante de Planck e λ é comprimento de onda associado ao elétron em movimento.
- Prótons, elétrons e nêutrons não são mais as partículas fundamentais (elementares) da natureza. Atualmente as partículas fundamentais são os léptons e hádrons. Os quarks que são as partículas que constituem os prótons e nêutrons são exemplos de hádrons. As partículas mediadoras das interações fundamentais são os bósons. O glúon é um exemplo de bóson.

Unidade 3

Radioatividade e medicina nuclear

Organizadores

Maurício Pietrocola

Nobuko Ueta

Elaboradores

Guilherme Brockington

Wellington Batista de
Sousa

Nobuko Ueta

Divirta-se um pouco

Num momento de folga entre os estudos relaxe assistindo a um bom filme de ficção que trata do que dissemos aqui. Este filme chama-se *Viagem insólita* e conta a história de dois pilotos que são encolhidos e injetados acidentalmente na corrente sanguínea de um ser humano.

Outra excelente pedida é uma obra clássica de ficção: o livro de Isaac Asimov, *A viagem fantástica*. Não deixe de ler este livro.

INTRODUÇÃO

Imagine se fosse possível acompanhar todo o funcionamento interno de nosso organismo em tempo real. Poderíamos ver, por exemplo, como o sangue flui através de nossas veias, irrigando nossos órgãos. Assim, seríamos capazes de perceber qualquer problema ou mau funcionamento em nosso corpo. Há alguns anos isso seria possível somente em filmes de ficção científica, no qual cientistas deveriam ser encolhidos a um tamanho suficientemente pequeno para que fossem injetados na corrente sanguínea de algum corajoso voluntário.

Não está tão longe o tempo em que as doenças só podiam ser diagnosticadas quando se manifestavam fisicamente no homem. Um simples osso quebrado não pode ser distinguido de um osso saudável apenas pelo olhar, exceto em caso de fratura.

Isso ocorre porque nossa pele envolve todo nosso corpo, protegendo-o do atrito, da perda excessiva de água, além de ser um bom protetor dos raios ultravioleta do sol. Além disso, a pele também colabora para regular nossa temperatura através da transpiração, facilitando a troca de calor com o meio ambiente.

Porém, para os médicos, nosso invólucro protetor apresenta um problema: a pele é opaca, ou seja, não somos capazes de ver através dela. Logo, olhar o que está envolvido por ela é geralmente muito doloroso.

No passado, a única forma de se fazer essas incursões no interior do corpo humano era por meio de cirurgias exploratórias, assim só depois de aberta uma parte do corpo é que se podia constatar o que de errado estava acontecendo lá dentro. Imagine isso levando em conta que a anestesia só foi desenvolvida em 1846...

Hoje, com o uso de tecnologias surgidas com desenvolvimento da Física atômica e molecular é possível fazer uso de uma série de técnicas chamadas *não-invasivas*, ou seja, técnicas que não necessitam invadir, perfurar o paciente.

Algumas dessas técnicas são muito conhecidas, como as imagens formadas por *raios X* ou através de *ressonância magnética* (MRI). Outras técnicas poderosas não são muito comuns no Brasil, como o *PET* e *SPECT*.

Iremos aqui conhecer velhas e novas técnicas e saber como todas elas funcionam, aprendendo sobre os processos físicos que regem a criação e o funcionamento dessas tecnologias. Conhecer esses processos, entendê-los bem

SAIBA MAIS

A viagem fantástica: uma pílula que fotografa

Não se engane: a cápsula na foto ao lado não é de um remédio, mas uma câmera capaz de registrar imagens do intestino. A Cápsula M2A vem equipada com microfaróis que iluminam as paredes do sistema digestivo e pode tirar mais de 50 mil fotografias digitais coloridas durante oito horas, tempo que leva para terminar seu caminho pelo trato gastrointestinal.

Pacientes engolem a pílula, que é do tamanho de um multivitamínico, e passam as oito horas usando um cinto que possui um gravador de imagens digital sem fio que recebe imagens que a câmera envia. Ao fim do dia, eles devolvem o gravador ao hospital e as imagens são baixadas para um computador para serem analisadas.

Uma melhor visão do intestino delgado de pacientes pode permitir com que os médicos diagnostiquem melhor várias doenças, inclusive o câncer. A pílula descartável deixa o corpo por si só entre um e três dias.

e reconhecer suas vantagens e desvantagens são condições necessárias para sermos capazes de medir as relações custo-benefício ao utilizar essas tecnologias, livrando-nos da posição de simples consumidores.

De alguns anos para cá a pesquisa científica se desenvolveu tanto que hoje é possível diagnosticar com boa precisão doenças que ainda nem se manifestaram! O uso da radiação, por exemplo, é comum para o tratamento do câncer e outras doenças degenerativas. O controle da utilização de radioatividade para o tratamento de doenças e criação de imagens do interior do corpo é parte de uma especialidade médica denominada medicina nuclear. Ela leva em conta a fisiologia (funcionamento) e a anatomia do corpo para estabelecer diagnósticos e tratamentos mais adequados.

Existem técnicas muito eficientes para detectar tumores, aneurismas, distúrbios em células sanguíneas e funcionamento inadequado de órgãos como a tireóide e disfunções pulmonares.

A criação de imagens do corpo através das técnicas da medicina nuclear faz uso de uma combinação de computadores, detectores e substâncias radioativas. Muitas dessas técnicas utilizam diferentes propriedades dos elementos radioativos, que começaram a ser conhecidos pelos cientistas no final do século XIX.

Você provavelmente já ouviu falar sobre radiação, seja na ficção (filmes, livros ou novelas) ou na vida real. É um tema que sempre está envolvido em uma aura de medo, pois sempre se associa a palavra radiação com algo devastador, como bombas nucleares, acidentes de Goiânia, ocorrido em 1987, e de Chernobyl, em 1986.

Porém, a radiação é extremamente útil para o homem e sua face mais bela normalmente fica escondida, deixando a impressão de ser sempre algo maléfico. Todos os temores que surgem são baseados na falta de conhecimento dos processos que ocorrem. Por isso é extremamente necessário que se compreenda melhor como são os átomos, como os processos radioativos acontecem. Só depois disso, conhecendo as vantagens e desvantagens da radiação, seremos capazes de dizer se devemos temê-la tanto.

Certamente você já ouviu em filmes ou noticiários da TV termos como:

Radioatividade	Energia nuclear	Plutônio	Urânio
Raios x	Raios alfa	Raios beta	Raios gama
Fissão nuclear	Carbono 14	Fusão nuclear	

Todas essas palavras estão ligadas aos elementos químicos radioativos, sejam naturais ou criados pelo homem. Mas por que um elemento é radioativo? Por que a radiação pode ser perigosa? Vamos voltar um pouco no tempo para entendermos o que se encontra por trás das palavras *nuclear* e *radioatividade*.

RADIOATIVIDADE

Na noite de 8 de novembro de 1895, o físico alemão Wilhelm Röntgen fez uma descoberta que mudaria para sempre os rumos da Física e, principalmente, da humanidade. Com seu laboratório totalmente escurecido, ele trabalhava com uma válvula que gerava altas descargas elétricas. Distante da válvula havia uma folha de papel tratada com uma substância química, a qual ele usava como tela. Para sua surpresa, de repente ele percebeu que a folha brilhava. Alguma coisa deveria estar saindo da válvula e chegando até a tela. Entretanto, a válvula estava totalmente coberta! Nenhuma luz, raio catódico, nada parecia sair dela. Surpreso, Röntgen resolveu então colocar vários objetos sólidos entre a tela e a válvula, porém, tudo o que colocava parecia ser transparente. De repente, sua mão escorregou para frente da válvula e ele então viu seus ossos na tela! Assim, foi descoberto, por acaso, um tipo diferente de raio. Devido a essa natureza desconhecida ele chamou esses raios de **raios X**. Ao aprofundar seus estudos sobre esses raios, ele descobriu que eles podiam atravessar materiais sólidos, podiam ionizar o ar e não sofriam reflexão no vidro, nem eram desviados por campos magnéticos. Talvez o que tornasse sua descoberta inacreditável era o fato de a pele ser transparente para esses raios. A publicação de seu trabalho provocou uma imensa agitação na comunidade científica e se espalhou rapidamente para toda a sociedade. No ano seguinte sua descoberta já agitava todo o mundo.

Imagine no final do século XIX como as pessoas reagiriam aos raios que podiam fazer com que seus ossos pudessem ser vistos sem ter que cortar a pele! Podia-se ver os ossos de cada um dos dedos de suas mãos, juntamente com seus anéis! O deslumbramento foi tanto que os raios tornaram-se inicialmente uma espécie de espetáculo, sendo quase obrigatória a sua demonstração para reis e rainhas de toda a Europa. Todos queriam ver os famosos raios X.

Não era preciso ser um cientista para que se enxergasse a grandiosidade dessa descoberta, de modo que sua utilização na medicina foi imediatamente consagrada.

O trabalho de Röntgen foi fantástico, perfeito para o conhecimento da época. Tanto que ele recebeu o prêmio Nobel de Física em 1902. O interessante é que ele mesmo não havia compreendido bem a natureza desses raios.

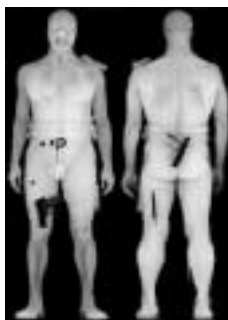


Radiografia tirada pelo próprio Röntgen

SAIBA MAIS

Câmeras de vigilância que podem enxergar através de paredes

Uma câmera fantástica parece fazer algo que só era possível para o Super-Homem: enxergar através das paredes. Os últimos instrumentos de *scanning* emitem ondas que podem atravessar uma série de materiais opacos – de roupas até o aço ou concreto. Uma empresa americana inventou um aparato chamado BodySearch, que capta os raios refletidos por objetos sólidos. Uma imagem transparente do corpo de uma pessoa é gerada em um monitor após ela ser exposta aos raios X. Como materiais diferentes absorvem os raios de maneira diferente, objetos metálicos, como facas e armas de fogo, armas de plástico ou de cerâmica podem ser claramente vistos através das roupas.



Após a publicação do trabalho de Röntgen, inúmeros físicos começaram a estudar os raios X, e já no final de 1896 havia mais de mil trabalhos sobre o tema. Alguns meses depois da descoberta dos raios X, o físico francês Antoine Henri Becquerel, fascinado pelos novos raios, tentou descobrir se algum elemento químico era capaz de emitir raios X de forma espontânea. Seus estudos revelaram que a maior parte dos elementos não produzia os raios X, mas mostrou que o sal de urânio era capaz de emití-los.

Dois anos após o trabalho de Becquerel, entram em cena os físicos Pierre e Marie Curie. A brilhante física polonesa constatou que a emissão dos raios era uma propriedade atômica do urânio, de modo que não havia diferença se a amostra examinada era um sal, um óxido ou um metal de urânio.

Impulsionada por essa descoberta, ela então resolve examinar todos os elementos químicos conhecidos naquela época. Através de seus estudos ela descobre que outros elementos também emitiam radiação espontânea, como o *Tório*. Foi Marie Curie quem propôs a palavra **radioatividade**.

Seu trabalho, realizado em conjunto com o marido Pierre, rendeu a descoberta de dois outros elementos radioativos, chamado por eles de *Rádio* e *Polônio*. Eles também descobriram que uma substância radioativa desaparece espontaneamente, reduzindo-se à metade. O intervalo de tempo que leva para que essa redução ocorra é chamado de **meia-vida**.

Em 1903, o casal Curie e Henri Becquerel foi agraciado com o prêmio Nobel. Marie Curie ainda ganharia sozinha outro Nobel em 1911.

Em 1897, após a descoberta da radioatividade, o físico neozelandês Ernest Rutherford começou a medir a ionização pelo Urânio. Ao término de seu trabalho, Rutherford constata a emissão de dois tipos distintos de radiação emitidos pelo Urânio. Ele chama essas radiações, também desconhecidas, de Alfa (α) e Beta (β).

Enquanto isso, na França, P.V. Villard descobriu um tipo de radiação ainda mais penetrante que os raios X, denominada radiação Gama (γ).

Esse resgate histórico pretende mostrar a importância que essa descoberta teve para o desenvolvimento do conhecimento sobre o interior do átomo. Também é preciso que se perceba como a Física é construída por pessoas comuns como você. Trata-se de uma grande e bela construção do ser humano, fruto exclusivo do trabalho de pessoas com uma profunda vontade de conhecer a natureza das coisas.

Exercícios

1. Uma mostra de um isótopo radioativo possui uma meia-vida de 1 dia e você inicia seus estudos com 2 gramas desse isótopo. Quanto da amostra resta ao final do segundo dia? E do terceiro dia?
2. Os detectores de radiação medem a taxa de radiação em um ambiente. Qual material radioativo produz uma contagem mais alta de radiação em um detector: um grama de material com meia-vida curta ou um grama de material com meia-vida longa? Explique sua resposta.

DECAIMENTOS RADIOATIVOS

Vimos que muitos núcleos são **radioativos**, ou seja, transformam-se em outros núcleos emitindo partículas e radiação. Esse processo de transmutação é chamado de **decaimento**.

São os prótons no núcleo que determinam o comportamento do átomo. Assim, quando um núcleo emite uma partícula ele não é mais o mesmo elemento, transmutando-se em outro. Esse é um processo natural no qual um átomo radioativo decairá espontaneamente em outro elemento através de três processos: **decaimento α (alfa)**, **decaimento β (beta)** e **fissão espontânea**.

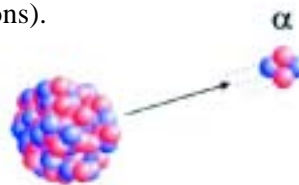
Neste processo, 4 tipos diferentes de radiação são produzidos: raios alfa, beta, gama e nêutron.

Os termos decaimento α , decaimento β e decaimento γ (gama), que estudaremos agora, foram usados bem antes que se soubesse realmente do que se tratavam. Isso quer dizer que os cientistas se debruçavam arduamente em seus trabalhos tentando conhecer a estrutura do átomo, mas não sabiam ao certo como era o núcleo, muito menos se existia um núcleo!!

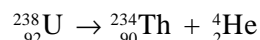
O decaimento α (alfa)

Como vimos, Rutherford e sua equipe estudavam substâncias radioativas que emitiam certas partículas. Essas partículas receberam o nome de partículas alfa. Inicialmente, pensava-se que elas fossem um gás ionizado, porém as experiências que foram feitas não confirmavam essa hipótese.

Becquerel e Rutherford verificaram que essas partículas eram carregadas positivamente e que sua carga elétrica era idêntica à do Hélio ionizado. Em 1908, provou-se que as partículas α são, de fato, íons de Hélio (constituído de dois prótons e dois nêutrons).



Desse modo, o U-238, ao emitir uma partícula alfa (dois prótons e dois nêutrons), transforma-se em Tório, já que agora só possui 90 prótons e 144 nêutrons.



A seta indica que o Urânio se transformou em dois elementos: Tório e uma partícula alfa. Quando essa transmutação acontece, a energia é liberada de três formas: parcialmente, como radiação gama; a maior parte como energia cinética da partícula alfa; e parcialmente, como energia cinética do tório.

Exercício

Quando um núcleo ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ decai emitindo uma partícula alfa, qual será o número atômico do elemento resultante? E a massa atômica resultante?

O decaimento β (beta)

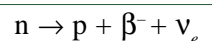
O decaimento beta ocorre quando um núcleo atômico tem um número insuficiente ou excessivo de nêutrons para se manter estável. O exemplo mais simples de decaimento beta é o de um nêutron livre, que decai em um próton e um elétron.



O Tório avança ou recua?
Você pode explicar?

Experimentos mostravam que a energia cinética dos elétrons emitidos no decaimento β não era compatível com a energia prevista pela teoria, o que violava o sagrado princípio da conservação de energia. Para explicar essa aparente violação, W. Pauli, em 1930, propôs a existência de uma terceira partícula, denominada **neutrino** (**n**), que também estaria sendo emitida no decaimento beta. Somente em 1957 o neutrino foi pela primeira vez observado. Hoje sabe-se da existência de três tipos de neutrino: um associado ao elétron (ν_e), um associado ao múon (ν_μ), e um associado ao táuon (ν_τ), sendo que este último ainda não foi observado experimentalmente.

O decaimento do nêutron livre pode ser representado da seguinte maneira:



Logo, as partículas β são elétrons (e^-) e pósitrons (e^+), que são partículas idênticas ao elétron exceto pelo sinal de sua carga.

Exercício

Quando um núcleo de ${}^{218}_{84}\text{Po}$ emite uma partícula beta, ele se transforma no núcleo de outro elemento. Quais serão os números atômico e de massa desse novo elemento? Qual seriam eles se o núcleo de Polônio emitisse uma partícula alfa em vez de uma partícula beta?

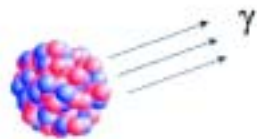
SAIBA MAIS

O misterioso neutrino

Essa partícula teve uma existência somente teórica! Para manter válido o sagrado princípio da conservação de energia, deveria aparecer uma partícula com energia suficiente para equilibrar as energias no decaimento beta. Como essa partícula não era detectada, ela era tida como uma solução desesperada para salvar as leis da conservação. Essa partícula deveria ser neutra e ter um tamanho muito menor que o nêutron. Assim, o físico italiano Enrico Fermi a chamou de *neutrino*, "neutronzinho", em seu idioma natal. A teoria de Fermi era tão bem formulada que mesmo não sendo detectado, a partir de 1933, os físicos não duvidavam mais de sua existência. Como não tem carga, o neutrino não deixa rastro. Para se chocar com outra partícula ele deve atravessar uma parede de chumbo com cerca de 50 anos-luz de espessura!! Com toda essa dificuldade em se mostrar, ele só foi detectado, de maneira indireta, em 1956, comprovando 23 anos depois a teoria de Fermi.

O decaimento γ (gama)

No decaimento gama, um núcleo em um estado excitado decai para um estado de menor energia, emitindo um fóton. Ao contrário do que ocorre nos decaimentos α e β , o núcleo atômico continua a ser o mesmo depois de sofrer um decaimento γ .



Os raios gama são ondas eletromagnéticas com as frequências mais altas que conhecemos.

SAIBA MAIS

Raios gama operam o cérebro sem cortes

Em um trabalho em parceria com uma universidade americana, pesquisadores brasileiros estão conduzindo no país as primeiras cirurgias de cérebro feitas com radiação gama, dispensando abrir a cabeça do paciente. O objetivo é oferecer

uma nova arma no combate a casos de transtorno obsessivo-compulsivo (TOC) que não respondam aos tratamentos convencionais, com medicamentos.

A operação é bem mais simples do que as neurocirurgias tradicionais. Os pesquisadores usam tomografias para identificar o ponto exato do cérebro que deve ser atingido pelos raios gama. Uma vez determinado o alvo no cérebro, o paciente fica em uma câmara de cobalto radioativo, parecida com uma câmara de ressonância magnética, onde sua cabeça fica envolvida por uma espécie de redoma com 201 pequenos furos. Na região do cérebro em que os raios gama vindos dos furos se cruzam acontece uma pequena lesão que mata os neurônios causadores do transtorno.

Essa técnica não é livre de efeitos colaterais. O mais comum são dores de cabeça, mas outros efeitos podem aparecer. No caso de cirurgias com abertura do crânio, os danos são mais frequentes, podendo ocorrer infecções ou até inchaço do cérebro.

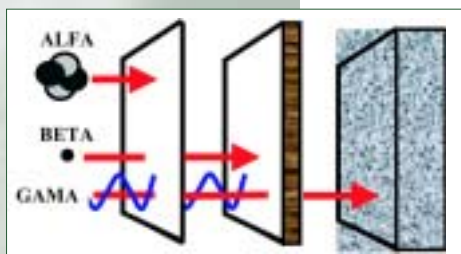
PODER DE PENETRAÇÃO

A distância que uma partícula percorre até parar é denominada **alcance**.

O alcance das partículas alfa é muito pequeno, ou seja, as partículas alfa possuem um pequeno poder de penetração. Elas podem ser detidas por uma camada de 7 cm de ar, uma folha de papel ou uma chapa de alumínio de 0,06 milímetros de espessura. Ao incidir sobre o corpo humano, são detidas pela camada de células mortas da pele, podendo, no máximo, causar queimaduras.

As partículas beta têm poder médio de penetração, porém, muito maior que o das partículas alfa, de 50 e 100 vezes mais penetrantes. Atravessam alguns metros de ar e até 16 mm de madeira. Podem ser detidas por lâminas de alumínio com 1 cm de espessura ou por lâminas de chumbo com espessura maior que 2 mm. Ao passar por um meio material, a radiação beta perde energia, ionizando os átomos que encontra no caminho. Ao incidirem sobre o corpo humano, podem penetrar até 2 cm e causar sérios danos.

Os raios gama têm alto poder de penetração. São mais penetrantes que os raios X, pois possuem comprimentos de onda bem menores, variando entre 0,1 e 0,001 angstroms. Podem atravessar milhares de metros de ar, até 25 cm de madeira ou 15 cm de espessura de aço. São detidos por placas de chumbo com mais de 5 cm de espessura ou por grossas paredes de concreto. Um fóton de radiação γ pode perder toda (ou quase toda) energia numa única interação e a distância que ele percorre até interagir não pode ser prevista. Podem atravessar completamente o corpo humano, causando danos irreparáveis.



ISÓTOPOS DOS ELEMENTOS

A existência de diferentes elementos na natureza e o estudo das possíveis interações entre eles têm sido amplamente estudados, como vemos em aulas de química. A divisão da ciência em diferentes ramos como química, física, biologia etc. é artificial e arbitrária, o que pode nos levar a pensar que o átomo que estudamos em uma aula de química não é o mesmo átomo da aula de física. Essa fragmentação da ciência tem uma origem histórica e o mais importante é percebermos os muitos pontos onde há uma convergência de interesses e, principalmente, como essas partes do conhecimento se comunicam.

Na tabela periódica, os diferentes átomos existentes na natureza estão dispostos de modo que são facilmente agrupados por apresentarem numa reação química características semelhantes. Cada elemento fica bem identificado pelo

número de elétrons e de prótons, que é o número atômico do elemento. Sob o ponto de vista de cargas elétricas o átomo é neutro e parece ser estável.

O número de prótons, como já dissemos, é igual ao de elétrons e define o número atômico do elemento, que é representado pela letra Z. O número de nêutrons pode variar e um elemento pode aparecer na natureza com diferente número de nêutrons, que são chamados de **isótopos** naturais do elemento. Isótopo quer dizer mesmo lugar (iso = mesmo; topo = lugar, em grego) pois ocupam a mesma posição do elemento que o origina na tabela periódica, visto que possuem o mesmo número de prótons.

Existe uma tabela que mostra todos os elementos conhecidos classificados pelo número de prótons no eixo vertical e pelo número de nêutrons no eixo horizontal, denominada tabela de isótopos, ou tabela de nuclídeos. Uma pequena parte dessa tabela está mostrada abaixo.

O que não se entendia 100 anos atrás era que alguns elementos que não possuíam características radioativas originavam isótopos que eram radioativos.

O hidrogênio é um bom exemplo. Ele possui vários isótopos e um deles é radioativo: o **trítio**, ou **hidrogênio-3**. O trítio possui um próton e dois nêutrons, o que o torna um isótopo instável. Isso quer dizer que se uma caixa é lacrada cheia de *trítio* e é aberta um milhão de anos depois, não haverá lá dentro mais nenhum *trítio*, somente se encontrará o *hélio-3* (dois prótons e um nêutron) que é estável. O trítio “virou” hélio-3, ou seja, um elemento se transmuta em outro! Ocorreu, assim, o decaimento radioativo.

Alguns elementos são naturalmente radioativos e todos os seus isótopos também o serão. O **urânio** é o melhor exemplo desse tipo de elemento, e é o elemento radioativo mais pesado encontrado na natureza.

Existem outros oito elementos que são radioativos naturalmente: **polônio**, **astato**, **radônio**, **frâncio**, **radio**, **actínio**, **tório** e o **protactínio**. Todos os outros elementos feitos pelo homem e que são mais pesados que o urânio são radioativos.

Assim, emissão desses raios evidenciou que existiam processos atômicos muito mais complexos do que se imaginava e, principalmente, que esses raios eram resultado de mudanças que ocorriam no interior do átomo, ou seja, no núcleo atômico.

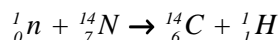
Hoje sabe-se que todos os elementos com números atômicos maiores que 82 (chumbo) são radioativos. A grande questão é por que isso ocorre?

DATAÇÃO POR CARBONO-14

Você certamente já ouviu histórias sobre artefatos arqueológicos de milhares de anos, como os Manuscritos do mar Morto, encontrados por acidente em grutas do Oriente Médio, e que trazem os primeiros estudos da Bíblia, datando do século III a.C. Você também deve ter ouvido falar sobre múmias ou fósseis de animais e plantas com milênios de idade, ou sobre pinturas rupestres, feitas por homens das cavernas durante a Pré-história. Você já se perguntou como um cientista pode saber a idade desses artefatos? Iremos agora aprender sobre uma técnica utilizada pelos cientistas para determinar a idade de objetos antigos. Ela é chamada de **datação por carbono-14**.

Raios cósmicos entram na atmosfera terrestre em um número gigantesco. Por exemplo, você agora está sendo atingido por milhares desses raios, de modo que a cada hora cerca de um milhão deles atravessam você.

Ao colidir com um átomo da atmosfera, são liberados vários prótons e nêutrons com uma boa quantidade de energia. A maior parte dos prótons “captura” elétrons e transforma-se em átomos de hidrogênio. Já os nêutrons, que não possuem carga, continuam em movimento por não interagirem com a matéria. Muitos deles acabam por colidir, então, com átomos de nitrogênio presentes na atmosfera. Quando o nêutron colide, o nitrogênio-14 (sete prótons e sete nêutrons) transmutam-se em carbono-14 (seis prótons e oito nêutrons) em um átomo de hidrogênio (um próton e nenhum nêutron).



Assim, tem-se na natureza um isótopo radioativo, o carbono-14, com meia-vida em torno de 5.700 anos.

Tanto o isótopo comum e estável carbono-12 como o radioativo carbono-14 combinam com o oxigênio, formando o dióxido de carbono, o qual é absorvido naturalmente pelas plantas durante a fotossíntese. Como os seres humanos e animais comem plantas, ingere-se assim esse isótopo radioativo. Neste momento, em seu corpo, há um percentual de carbono-14, e todas as plantas e animais vivos têm essa mesma porcentagem.

Como as plantas absorvem o dióxido de carbono enquanto estão vivas, qualquer carbono-14 perdido por decaimento é imediatamente substituído por carbono-14 da atmosfera. Quando a planta morre, essa substituição pára de ser feita. Dessa forma, a porcentagem de carbono-14 passa a diminuir a uma taxa constante, que é dada pela sua meia-vida. Quanto mais tempo se deu a morte, menor é a quantidade de carbono-14 contida. Assim, os cientistas conseguem calcular a idade de artefatos que contêm esse isótopo. Com esse método é possível olhar para o passado até 50 mil anos atrás! A datação por esse método tem uma incerteza de 15%, aceitável para muitas finalidades.

Exercício

1. Um arqueólogo extrai um grama de carbono de um osso e descobre que ele tem um quarto da radioatividade de um grama de carbono extraído de um osso nos dias de hoje. Considere que a razão entre a quantidade de carbono-

^{14}C e carbono-12 $\left(\frac{C-14}{C-12}\right)$ permanece constante com o passar do tempo e diga aproximadamente qual a idade do osso.

SAIBA MAIS

O sítio arqueológico do Piauí

O parque nacional Serra da Capivara está localizado no sudeste do estado do Piauí, foi criado para proteger uma área na qual se encontra o mais importante patrimônio pré-histórico do Brasil. Trata-se de um parque arqueológico com uma riqueza de vestígios que se conservaram durante milênios. As pinturas encontradas na Serra da Capivara foram gravadas sobre pedras por homens da caverna. Trata-se de imagens humanas desenhadas por paleoíndios, os índios pré-históricos que habitavam o Brasil milhares de anos antes de os portugueses por aqui chegarem.

Há uma enorme polêmica acerca da idade desses desenhos. Arqueólogos e cientistas brasileiros datam as gravuras em torno de 30 mil anos. Laboratórios americanos as dataram com cerca de 3 mil anos. A polêmica se dá, pois até então se achava que o homem existia no continente americano há meros 11 ou 12 mil anos, vindos da Ásia sobre o mar congelado do estreito de Bering, entre a Sibéria e o Alasca. O maior problema surge do fato que as datações são inerentemente difíceis, em razão da possibilidade de contaminação, ou pelo tipo de amostra coletado, de modo que as evidências sempre foram polêmicas entre os pesquisadores, tanto no Brasil como no exterior.



FORÇAS NUCLEARES

Tudo é feito de átomos, que se juntam em moléculas e passam a construir tudo o que nos cerca. Na natureza, qualquer átomo que encontrarmos estará entre os 92 tipos diferentes de átomos, também chamados de elementos. Qualquer substância terrestre (metais, plástico, roupas, cabelos...) é uma combinação de vários desses 92 elementos encontrados na natureza. Como dissemos, a tabela periódica, tão conhecida quando se estuda química, organiza esses 92 elementos naturais mais alguns criados pelo homem.

Dentro de cada átomo existem as chamadas partículas subatômicas, tais como prótons, elétrons e nêutrons, entre outras. A cada ano, quanto mais avançam os estudos em Física de Partículas, mais se conhece a estrutura atômica, surgindo sempre novas partículas.

As partículas constituintes do núcleo atômico são chamadas de nucleons. Os nucleons carregados são os conhecidos prótons e os sem carga são os nêutrons.

Os prótons e nêutrons ficam unidos formando o núcleo atômico. Como você já viu no Módulo 4, cargas de sinal oposto se atraem e de mesmo sinal se repelem, de forma que um próton e um elétron se atraem e dois elétrons ou dois prótons se repelem.

Assim, surge uma pergunta: por que os prótons, que são carregados positivamente, podem ficar próximos um dos outros no interior do núcleo? Ou melhor, por que os prótons no interior do núcleo não se repelem devido às intensas forças elétricas de repulsão que atuam em cargas de mesmo sinal?

O que ocorre é que existe no interior do núcleo atômico a presença de uma força muito mais intensa que a força elétrica, a força nuclear. Tanto os prótons quanto os nêutrons se ligam através dessa extraordinária força atrativa. Essa força é muito mais complexa que a força elétrica e os físicos ainda não a compreendem totalmente. A força nuclear que faz com que o núcleo

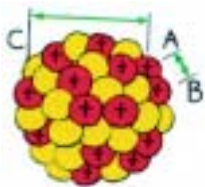
permaneça unido é chamada de **interação forte**. Sua característica mais marcante é que se trata de uma força de curto alcance, ou seja, ela só atua em distâncias muito, muito pequenas. Ela é extremamente forte para nucleons muito próximos ou em contato (afastados cerca de 10^{-15} m), mas é praticamente nula para distâncias maiores que essa.

A força elétrica, que atua em corpos carregados eletricamente, tem sua intensidade diminuída com o aumento da distância, ou seja, quanto mais distante menos intensa é a força. Na realidade, essa força diminui com o quadrado da distância, sendo então proporcional a $\frac{1}{r^2}$.

A força nuclear decresce muito mais rapidamente que $\frac{1}{r^2}$ e isso tem uma importante consequência: se um núcleo tem muitos prótons ele deverá ser grande. Como a força nuclear decresce com a distância, esse núcleo grande não se mantém unido facilmente, sendo assim um núcleo instável.

A força de repulsão elétrica tem um alcance maior, de modo que quanto maior a quantidade de prótons no núcleo, maior será a intensidade da força de repulsão elétrica, fazendo com que haja um equilíbrio muito frágil. Assim, se bombardearmos um núcleo grande com um nêutron, este núcleo poderá se romper, e essas partes, ao se dividirem, se distanciam de modo que a força de repulsão elétrica supera a nuclear e afasta ainda mais as partes rompidas do núcleo. A energia liberada nesse processo (bombas atômicas ou usinas nucleares) é chamada de nuclear, mas na verdade é energia de origem elétrica, que é liberada quando as forças elétricas superam as forças de atração nuclear.

Quando os prótons estão muito próximos, como em núcleos pequenos, a intensidade da força nuclear supera com facilidade a força elétrica de repulsão, mantendo assim o núcleo unido.



O próton A atrai, devido à força nuclear, o próton B, ao mesmo tempo que o repele devido à força elétrica. E a relação entre os prótons A e C? Como a força nuclear é fraca para grandes distâncias, o próton C sente muito a repulsão devido à força elétrica. Assim, quanto maior for a distância entre os prótons A e C, mais importante será o papel da força elétrica, tornando o núcleo mais instável. Isso mostra que os núcleos maiores são mais instáveis que os menores.

O nêutron também desempenha um papel fundamental na estabilidade do núcleo atômico. Um próton e um nêutron podem se ligar mais fortemente que um par de prótons com um par de nêutrons. Assim, a maioria dos primeiros vinte elementos da tabela periódica possui o mesmo número de prótons e de nêutrons. Em elementos mais pesados, tudo muda, já que os nêutrons não se repelem eletricamente, mas os prótons sim.

O balanceamento entre o número de prótons e o de nêutrons colabora para a estabilidade nuclear. Um núcleo com menos prótons que nêutrons torna-se muito mais estável.

O urânio-238 possui 92 prótons e 146 nêutrons. Esses 54 nêutrons em excesso são necessários para aumentar a estabilidade do núcleo. Caso houvesse o mesmo número de prótons e nêutrons (92), o urânio seria tão instável que se partiria em pedaços, liberando muita energia.

É justamente com esses elementos instáveis que se dão as emissões alfa, beta e a transmutação dos elementos.

FISSÃO E A ENERGIA NUCLEAR

Quando Einstein formulou a sua famosa teoria da relatividade, muitos conceitos anteriormente aceitos foram revistos de forma espetacular. Uma dessas “revoluções” ocorreu como consequência da formulação da equivalência entre massa e energia:

$$E = m.c^2$$

Logo se percebeu a energia contida nas massas dos elementos, como na fusão de quatro átomos de hidrogênio para dar um de hélio, ou então na divisão ou fissão de átomos pesados.

Sabe-se que na natureza não existem átomos mais pesados que o urânio, de forma estável. Átomos muito grandes têm o seu núcleo instável, apesar da existência dos nêutrons que contribuem com forças nucleares atrativas. Quanto maior o núcleo, maior é o número de massa A e a quantidade de nêutrons fica cada vez maior. Isto é, o número de nêutrons é maior que o de prótons.

Hoje em dia, são conhecidos muitos núcleos maiores que o urânio, mas com meia vida curta. Eles decaem sucessivamente por emissão das partículas alfa ou beta e se transformam em outros até chegarem a algum isótopo estável conhecido desde o século passado.

Na tentativa de se conseguir núcleos cada vez maiores, os cientistas fizeram tentativas bombardeando núcleos com nêutrons. Se houver a captura de nêutrons, o número de massa aumenta cada vez mais, mas pode haver um decaimento beta, com a transformação em outro átomo, depois sucessivamente com a adição de nêutrons subir o número de massa novamente. Esse processo poderia ser continuado, mas as vidas médias muito curtas dos produtos limitam a possibilidade de detecção.

Ao bombardear urânio com nêutrons, verifica-se a quebra em dois elementos com número de massa bem menor e a liberação de muita energia, como previsto pela teoria da relatividade de Einstein.

Essa energia logo foi usada para fins bélicos, como no caso das bombas atômicas lançadas sobre Hiroshima e Nagasaki, em 1945, durante a II Guerra Mundial, lembradas em todo agosto pelos meios de comunicação. A energia nuclear pode ser usada para geração de energia em países que não têm reservas hídricas com quedas d'água em quantidade suficiente. A energia nuclear é usada para aquecer a água em geradores de eletricidade por processos térmicos.

O grande problema com o uso da energia nuclear é o processo de enriquecimento do urânio, pois se usa o urânio-235. Além disso, o material radioativo que sobra no processo deve ser cuidadosamente armazenado, para evitar contaminação. Existem ainda riscos de acidentes com vazamento de material radioativo, que pode contaminar extensas áreas urbanas.

Nós temos um exemplo negativo de descuido com material radioativo de meia vida muito longa: todos devem se lembrar do caso da fonte de ^{137}Cs em Goiânia. Uma fonte radioativa desativada foi descuidada e jogada num depósito de materiais, onde ocorreu a manipulação errada que causou a desastrosa contaminação.

FUSÃO NUCLEAR E O SOL

Na Antiguidade, a origem do universo foi atribuída a ordens divinas nas mais diferentes civilizações, de formas muito interessantes. Os cientistas tam-

bém têm se dedicado a esse ramo do conhecimento ao longo da história. A composição do Sol foi determinada pela análise dos espectros de raias emitidas pelo astro rei, como as que são mostradas na unidade anterior.

Estudando o espectro da luz solar, observou-se a existência do gás hélio. E como se formou hélio no Sol? No início, havia apenas partículas separadas, as mais simples. É razoável pensar que os elementos mais simples tenham se formado primeiro. Vocês viram que o átomo mais simples é o hidrogênio. Um nêutron pode ser capturado dando origem a um deutério, o hidrogênio-2. Dois átomos de deutério podem se fundir e dar o hélio. Esse processo é chamado fusão nuclear. Pode-se mostrar, considerando as energias inerentes à massa, que no processo de fusão de dois nêutrons e dois prótons há uma sobra de energia, um excesso de energia. É a energia nuclear decorrente da fusão de núcleos ou de partículas. A existência do hélio e de alguns elementos no Sol já era conhecida por Fraunhofer.

A energia emitida pelo Sol é composta de energia nuclear! Quanta energia à nossa disposição! Você já pensou que o Sol é apenas *uma* estrela da Via Láctea?

ELEMENTOS RADIOATIVOS E SUAS APLICAÇÕES NA MEDICINA NUCLEAR

O uso de isótopos radioativos cria uma maneira extremamente simples de se detectar e contar os átomos em amostras de materiais (orgânico, plástico etc.) pequenas demais para serem observadas com um microscópio. Quando os isótopos são utilizados dessa forma, eles são chamados de traçadores. Esses traçadores são amplamente utilizados na medicina para construir imagens do corpo e diagnóstico de doenças.

SAIBA MAIS

Alimentos irradiados

A irradiação dos alimentos tem por objetivo matar insetos presentes em grãos, farinhas, frutas e vegetais. Aplicada em pequenas doses, ela impede batatas, feijões, cebolas e alhos armazenados de brotarem, aumentando sua durabilidade. Doses maiores matam micróbios e parasitas encontrados em carnes e aves. A radiação pode penetrar latas e pacotes lacrados. O que a radiação certamente *não* faz é deixar os alimentos radioativos. Os raios gama atravessam os alimentos, assim como a luz passa pelo vidro. Porém, ao atravessar a comida, eles destroem a maior parte das bactérias causadoras de doenças. Como não há energia necessária para arrancar nêutrons dos núcleos atômicos, os alimentos não se tornam radioativos após a irradiação.

Por outro lado, toda emissão radioativa é perigosa para os seres vivos. Alfa, beta, gama etc. são chamadas de *radiação ionizante*. Isso significa que, quando esses raios interagem com a matéria, são capazes de retirar um elétron do átomo que a constitui. A perda de um elétron pode causar sérios danos, desde a morte da célula até mutações genéticas, como o câncer.

Como vimos, a radioatividade é natural, e todos nós temos elementos radioativos, como o carbono 14. Em nosso ambiente, há também um número grande de elementos feitos pelo homem que são perigosos. A radiação nuclear trouxe, e traz, enormes benefícios para a humanidade. É o caso da energia nuclear, que é uma excelente fonte de geração de energia elétrica, e da medicina nuclear, capaz de detectar e tratar doenças. A ignorância acerca dos mecanismos que regem os processos atômicos gera medo e pavor. Só o conhecimento pode fazer com que esse medo seja compreendido e dissipado.

Materiais nucleares são usados para criar esses *traçadores radioativos*, que podem ser ingeridos ou injetados na corrente sanguínea. Eles fluem atra-

vés do sangue e se alojam nas estruturas dos vasos sanguíneos que se deseja observar. Por meio desses traçadores, qualquer anormalidade no sistema circulatório pode ser facilmente detectada.

Também alguns órgãos do corpo têm a capacidade de concentrar algumas substâncias químicas. Por exemplo, a glândula tireóide concentra o iodo. Assim, pela ingestão de iodo radioativo, seja por um líquido ou por uma pílula, os principais tipos de tumores na tireóide podem ser identificados e tratados. Da mesma forma, alguns tumores cancerígenos concentram fósforo. Assim, através da injeção do isótopo radioativo fósforo-32 na corrente sanguínea, os tumores podem ser detectados devido ao aumento de sua atividade radioativa.

Na medicina nuclear, seja na produção de imagem ou no tratamento, a ingestão ou injeção de substâncias radioativas não causam dano ao corpo humano. Isso porque os radioisótopos utilizados decaem rapidamente, em minutos ou horas, tendo assim níveis de radiação muito menores que o raio X, e são eliminados na urina ou pelo próprio corpo.

As terapias com radiação diferem muito do que dissemos até agora. As células dos organismos vivos se reproduzem com velocidades diferentes, de maneira que uma se multiplica muito mais rápido que outras. Acontece que algumas células são severamente afetadas pela radiação ionizante – alfa, beta, gama e raios X – e as células que se reproduzem mais rapidamente são mais fortemente afetadas que outras devido a duas propriedades fundamentais das células:

- 1) As células têm um mecanismo que as possibilita reparar o DNA danificado. Se a célula detecta que o DNA está danificado até ela se dividir, então ela se auto-destrói.
- 2) As células que se multiplicam rapidamente têm menos tempo para que o mecanismo de reparo detecte e fixe o DNA danificado antes de se dividir; então, é muito mais provável que elas se autodestruam quando já bombardeadas pela radiação nuclear.

Muitas formas de câncer são caracterizadas justamente por células que se dividem em uma velocidade muito grande, de forma que se pode fazer uso da terapia com radiação para o tratamento dessa doença.

Geralmente, frascos com material radioativo são colocados próximos ou ao redor do tumor. Para tumores mais profundos, ou que se situam em lugares impossíveis de serem operados, se faz o uso de raios X de alta intensidade, que são focalizados no tumor. O problema que surge com esses tipos de tratamento é que as células normais, que também se reproduzem rapidamente, podem ser afetadas juntamente com as células anormais.

As células do cabelo, do estômago, do intestino, da pele e sanguíneas também se reproduzem rapidamente, sendo então fortemente afetadas pela radiação *ionizante*. Isso explica porque as pessoas que fazem radioterapia sofrem de náuseas e perda de cabelo.

AA TÉCNICAS DE CRIAÇÃO DE IMAGENS DO INTERIOR DO CORPO HUMANO

Os raios X

Devido ao seu grande poder de penetração, os raios X logo foram utilizados pelos médicos para poder visualizar os ossos. Ver através da pele passou a ser uma realidade. Mais tarde, eles também começaram a ser utilizados para a visualização de órgãos, veias e artérias.



Você agora aprenderá como eles são produzidos:

Os raios X são basicamente o mesmo que a luz, ou seja, ondas eletromagnéticas. A diferença entre a luz e os raios X está na quantidade de energia de seus fótons, ou pode ser expressa também pelo seu comprimento de onda ou frequência.



Tanto a luz visível quanto os raios X são produzidos pelos saltos dos elétrons em suas órbitas atômicas. Os elétrons ocupam diferentes níveis de energia (órbitas) ao redor do átomo. Ao receber uma quantidade determinada de energia, um elétron muda de nível, levando o átomo para um estado excitado. Ao voltar para o nível no qual se encontrava, ele deve emitir a energia que recebeu, como foi visto na unidade 2.

Assim, usando válvulas que geram altas descargas elétricas, é possível retirar elétrons do cátodo e acelerá-los em direção ao ânodo, com altíssimas velocidades. No ânodo existe um alvo metálico, onde os elétrons colidem com os átomos desse alvo. Neste processo, os elétrons das órbitas mais internas dos átomos do alvo são excitados, de maneira que, ao voltarem aos seus antigos níveis de energia, eles emitem os raios X.



Os raios X são absorvidos de maneira diferente por diferentes materiais. Os átomos maiores e mais pesados, como os de cálcio, que formam nossos ossos, absorvem muito mais os raios X que os átomos menores e mais leves, como os que formam os tecidos de nosso corpo.

Assim, os raios X conseguem atravessar a pele e a carne, mas o osso, por ser constituído de material de número de massa maior, não permite a transmissão do feixe. Então, é possível ver regiões claras e escuras numa chapa fotográfica colocada atrás do que se quer examinar.

Em uma chapa de raio X normal, os tecidos moles de nosso corpo não aparecem de modo muito nítido. Para examinar bem os órgãos, vasos sanguíneos ou o sistema circulatório, é necessário que o paciente ingira ou que nele seja injetado um tipo de substância chamada de *contraste*. O contraste é um líquido, como um composto de bário ou iodo, por exemplo, que absorve os raios X de maneira mais eficiente.

Estas substâncias têm esse nome pelo fato de serem opacas aos raios X, formando assim um contraste na chapa radiográfica.

Temos abaixo a fotografia de uma mesa de raios X e algumas reproduções de radiografias:



SAIBA MAIS

Auto-retrato de Rembrandt é vendido por US\$ 11,3 milhões

Séculos depois de ficar coberto por uma pintura de um de seus discípulos, um auto-retrato de Rembrandt foi vendido por US\$ 11,3 milhões pela casa de leilões Sotheby's. Durante trezentos anos, o quadro teve vários donos. Um deles, suspeitando de que a pintura tratava-se de um Rembrandt, submeteu-a a uma investigação no Rijksmuseum de Amsterdam. Lá, testes com raios-X mostraram que havia outra figura por baixo, revelando assim a milionária obra de arte.

Cintilografia

A radiação gama, por ter um poder de penetração ainda maior que o dos raios X, é utilizada em uma técnica chamada *cintilografia*. Nesse caso, o paciente recebe uma dose de substâncias radioativas que se concentra nos tecidos lesionados. Ali alojada, essa substância decai, emitindo raios gama detectados por uma câmera especial que transforma os pulsos eletrônicos em uma imagem digitalizada.

A cintilografia revela como funciona determinada estrutura. A sensibilidade avançada dessa técnica permite detectar alterações na função de órgãos, muitas vezes superior a de outros exames, pois identifica alterações muito antes do problema se tornar aparente para outros métodos investigativos.

Os raios gama são emitidos do núcleo atômico, enquanto os raios X se originam da nuvem eletrônica mais externa. Assim, os raios gama fornecem preciosas informações acerca da estrutura do núcleo, da mesma maneira que os raios X, ou mesmo a luz visível, trazem informações sobre a estrutura eletrônica do átomo.

SAIBA MAIS

A gamagrafia

A radiação gama também é muito usada na indústria. No automobilismo, por exemplo, é comum o uso da *gamagrafia*, que consiste em usar os raios gama para se obter radiografias das peças metálicas de um motor, checando as falhas estruturais e os resíduos metálicos que podem prejudicar seu desempenho.

Imagem por ressonância magnética - MRI (Magnetic resonance image)

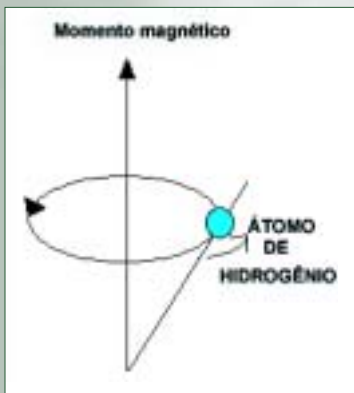
A ressonância magnética produz imagens em todos os planos do corpo, mostrando em detalhes o que se passa nos órgãos ou tecidos do paciente através de um grande ímã e do uso de ondas de rádio captadas por uma antena especial e enviadas a um computador.

Os scanners de ressonância magnética varrem pequenos pontos do interior do paciente, identificando o tipo de tecido daquele ponto. Este ponto pode ter até de meio milímetro de lado! Assim, pode-se construir uma imagem em 2-D ou 3-D do interior de um organismo.

MRI gera imagens sem precedentes do interior do corpo humano. O nível de detalhe é extraordinário, comparado com qualquer outra forma de criação de imagens. Devido ao seu alto grau de definição, é uma técnica que auxilia muito os radiologistas a determinarem se é normal ou não o que se vê em uma radiografia.

O corpo humano é formado por bilhões de átomos. Os núcleos desses átomos giram ao redor de um eixo, como um peão. Imagine bilhões de núcleos girando aleatoriamente, em todas as direções. Há vários tipos de átomos em nosso corpo, mas para o MRI o mais relevante é o átomo de hidrogênio,

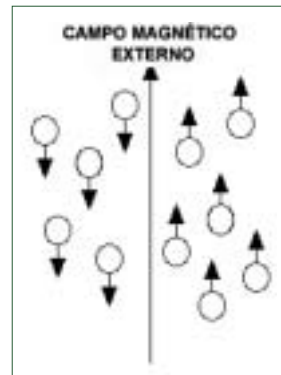




pois esse possui apenas um próton e tem um grande momento magnético. O fato de possuir um grande momento magnético significa que, quando imerso em um campo magnético externo, o hidrogênio tende a se alinhar com a direção desse campo.

Um intenso campo magnético é gerado dentro do tubo onde o paciente se deita para ser examinado.

Esse campo “varre” o corpo da pessoa, de modo que os prótons de seus átomos de hidrogênio se alinham. A grande maioria desses prótons tem seus momentos magnéticos cancelados. Isso quer dizer que, para cada momento apontando em um sentido, temos outro próton com momento apontando no sentido oposto, de modo que sua soma é nula (lembra-se da soma de vetores?).



Para cada um milhão, apenas um par de prótons não se cancelam. Como o número de átomos em nosso corpo é enorme, temos sempre bilhões de prótons que não se alinham e que depois formarão as imagens.

O aparelho de MRI amplia a frequência de vibração do hidrogênio. O sistema então direciona uma onda através da área do corpo que se deseja examinar. Este pulso faz com que os prótons desta área absorvam a energia necessária para fazer com que eles girem em outra direção. Essa é a parte da ressonância nessa técnica. Esta onda eletromagnética força apenas esses prótons que não haviam se alinhado a girar em uma frequência bem determinada, a frequência de ressonância. Quando o pulso é desligado, o próton retorna ao seu alinhamento natural e emite o excesso de energia armazenada. Essa energia é então captada e convertida em imagens.

SAIBA MAIS

A água em nosso corpo fornece pistas das doenças

A água compõe cerca de 2/3 da massa corporal de um indivíduo adulto e é composta por átomos de oxigênio e hidrogênio. O hidrogênio atua como agulha de uma bússola quando sensibilizado por um campo magnético. Em muitas doenças, a direção para onde esses átomos migram quando submetidos ao campo muda, o que permite identificar grande parte das alterações fisiológicas.

Por isso é que as imagens por ressonância magnética são tão eficientes na detecção de tumores cancerosos e distúrbios cerebrais, por exemplo. Por um lado, elas são capazes de indicar o quão profunda foi a contaminação de um tecido e se os nódulos linfáticos – responsáveis pela defesa do organismo – foram ou não afetados. Por outro lado, praticamente qualquer disfunção no funcionamento do cérebro acarreta mudança na composição da água de suas células. Mesmo que essa alteração seja da ordem de apenas 1%, a técnica é capaz de identificá-la. A ressonância magnética é um fenômeno físico-químico regido pela relação entre a intensidade do campo magnético e a frequência de ondas de rádio.



Tomografia computadorizada (TC)

Ao contrário da maioria dos exames de raios X, a TC pode detectar até as menores alterações nos tecidos. Isto naturalmente simplifica o tratamento e melhora as chances de recuperação. A TC também torna possível retratar as partes do corpo em três dimensões e, deste modo, certas áreas que estão superpostas podem ser examinadas.

O paciente se deita numa mesa de exame que, muito lenta e suavemente, vai passando através de uma abertura na unidade de TC. Ao mesmo tempo, o anel de raios X no interior do tomógrafo vai girando à volta da mesa de exa-

me, tirando fotos altamente detalhadas que podem posteriormente ser exibidas em imagens de três dimensões. Deste modo, a TC pode cobrir extensas seções do corpo num só exame. Normalmente, uma ou duas áreas de um órgão são examinadas, como o pulmão e a região abdominal, a cabeça e o pescoço etc. Os parâmetros adquiridos através das medições podem ser traduzidos em fotografias, que são imagens transversais de planos extremamente finos do interior do corpo. Portanto, em muitos casos, mesmo o mais minúsculo processo patológico pode ser identificado.

SAIBA MAIS

Dinossauro tinha cérebro de passarinho

Uma tomografia feita em um dos fósseis mais famosos do mundo revela que o elo perdido entre aves e répteis tinha um cérebro surpreendentemente desenvolvido e adaptado para o voo. O exame também sugere que as aves modernas são mesmo descendentes dos dinossauros. O fóssil em questão é um dos sete únicos exemplares de *Archaeopteryx*, um dinossauro alado também classificado como a ave mais antiga do mundo. O animal viveu na Europa no final do Período Jurássico (205 milhões a 144 milhões de anos atrás). Cientistas resolveram buscar a identidade do elo perdido num lugar insuspeito: dentro da sua cabeça. E descobriram que o bicho tinha literalmente um cérebro de passarinho. O cérebro em si decompôs e desapareceu há milhões de anos. Mas o exemplar preservado no museu britânico tem um crânio intacto, que o grupo submeteu a uma tomografia computadorizada. O exame montou uma imagem tridimensional do sistema nervoso do dinopássaro, mostrando que ele possuía um sistema neural extremamente adaptado para o voo.

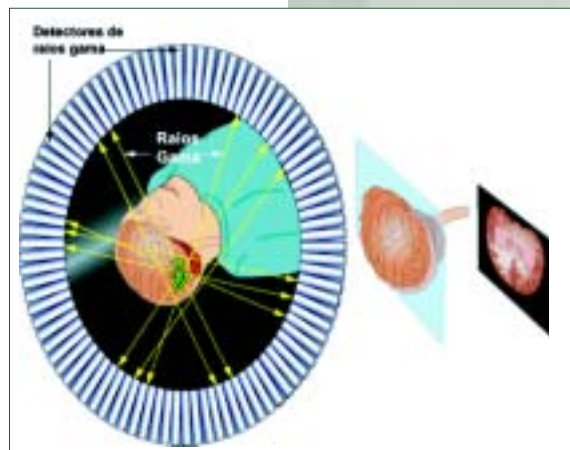
Tomografia por emissão de pósitron – PET (Positron Emission Tomography)

A PET produz imagens do corpo pela detecção da radiação emitida por determinadas substâncias radioativas. Estas substâncias são “marcadas” com um isótopo radioativo (como o carbono-11, o oxigênio-15 ou o nitrogênio-13) e depois injetadas no corpo do paciente a ser examinado. Estes isótopos têm um curtíssimo tempo de decaimento, e um aparelho detecta os raios gama liberados do local onde um pósitron emitido pela substância radioativa colide com um elétron do tecido do corpo do paciente. A PET fornece imagens do fluxo sanguíneo, bem como de funções bioquímicas, como o metabolismo da glicose no cérebro, ou as rápidas mudanças nas atividades de várias partes do organismo humano. A desvantagem surge da necessidade de haver, nas proximidades do hospital, um acelerador de partículas, visto que os isótopos utilizados possuem uma meia-vida de minutos, no máximo, poucas horas.

Tomografia por emissão de um fóton – SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)

A SPECT é uma técnica semelhante à PET. Contudo, as substâncias radioativas utilizadas na SPECT (xenônio-133, Iodo-123) têm um tempo de decaimento maior que as utilizadas na PET e emitem raios gama. SPECT produz imagens menos detalhadas que a PET, mas o uso dessa técnica é bem mais barato que o uso da PET.

Os aparelhos para SPECT são bem mais acessíveis e não têm o problema de estarem localizados próximos a aceleradores de partículas, devido ao maior tempo de meia-vida dos isótopos utilizados.



Imagens cardiovasculares

Essa técnica consiste em fazer com que substâncias radioativas sejam carregadas pela corrente sanguínea, através do coração, veias e artérias. É comum injetar no paciente um composto de tálio e fazer com que ele pratique algum exercício físico durante o tempo em que um detector capta os raios gama que são emitidos pelo decaimento radioativo. Depois de um período de descanso, o paciente passa novamente pelo detector de raios gama só que sem fazer qualquer tipo de exercício. Assim, pode-se comparar as mudanças que ocorrem no fluxo sanguíneo quando o coração está trabalhando. Essa técnica é muito eficiente para detectar artérias bloqueadas ou disfunções no coração e outros tecidos.

São usados detectores chamados de contadores de cintilações: um contador de cintilações faz uso de substâncias que funcionam como minúsculos flashes de uma máquina fotográfica. Essas substâncias são facilmente excitadas e emitem luz quando é atravessada por partículas carregadas ou raios gama. Essas cintilações são transformadas em sinais elétricos através de um aparelho que amplifica essa luz emitida.

SAIBA MAIS

Relógio que brilha no escuro

Alguns relógios de pulso, ou pequenos relógios despertadores, possuem ponteiros que brilham constantemente. Pegue um destes relógios e leve-o para um quarto bem escuro. Fique ali um tempinho para que seus olhos se acostumem com a escuridão. Com uma lente de aumento, olhe atentamente para os ponteiros do relógio. Você poderá perceber que aquela luz contínua que se enxerga sem a lente, ou seja, a olho nu, é na verdade constituída de uma série de minúsculos flashes individuais, as cintilações. Cada um desses flashes ocorre quando uma partícula alfa, ejetada por um núcleo de rádio colide com uma molécula de sulfeto de zinco.

Por questões de segurança, hoje é mais comum encontrar relógios que, ao invés de utilizarem o decaimento radioativo, utilizam a própria luz como forma de excitação. Estes relógios têm seu brilho cada vez mais fraco, sendo necessário sempre expô-los a uma fonte de luz, como uma lâmpada, para que ele volte a brilhar.

QUESTÕES DE REVISÃO DA UNIDADE

1. Qual é a semelhança e a principal diferença entre um feixe de raio X e um feixe de luz?
2. Por que os raios alfa e beta são desviados em sentidos opostos por um campo magnético? Por que os raios gama não são desviados?
3. Qual é a origem de um feixe de raios gama? E de um feixe de raios X?
4. Explique com suas palavras por que um núcleo maior é normalmente menos estável do que um núcleo menor?
5. O que significa meia-vida radioativa?
6. Por que existe mais C-14 em ossos novos do que em ossos antigos de mesma massa?

Exercícios

1. (Ufrn 2002) No Brasil, a preocupação com a demanda crescente de energia elétrica vem gerando estudos sobre formas de otimizar sua utilização. Um dos mecanismos de redução de consumo de energia é a mudança dos tipos de lâmpadas usados nas residências. Dentre esses vários tipos, destacam-se dois:

a lâmpada incandescente e a fluorescente, as quais possuem características distintas no que se refere ao processo de emissão de radiação.

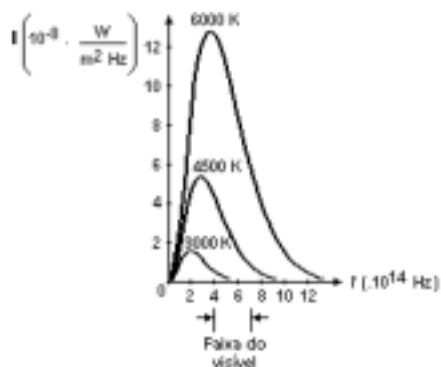
- A lâmpada incandescente (lâmpada comum) possui um filamento, em geral feito de tungstênio, que emite radiação quando percorrido por uma corrente elétrica.
- A lâmpada fluorescente em geral utiliza um tubo, com eletrodos em ambas as extremidades, revestido internamente com uma camada de fósforo, contendo um gás composto por argônio e vapor de mercúrio. Quando a lâmpada é ligada se estabelece um fluxo de elétrons entre os eletrodos. Esses elétrons colidem com os átomos de mercúrio transferindo energia para eles (átomos de mercúrio ficam excitados). Os átomos de mercúrio liberam essa energia emitindo fótons ultravioleta. Tais fótons interagem com a camada de fósforo, originando a emissão de radiação.

Considerando os processos que ocorrem na lâmpada fluorescente, podemos afirmar que a explicação para a emissão de luz envolve o conceito de

- a) colisão elástica entre elétrons e átomos de mercúrio.
- b) efeito fotoelétrico.
- c) modelo ondulatório para radiação.
- d) níveis de energia dos átomos.

2. As lâmpadas incandescentes são pouco eficientes no que diz respeito ao processo de iluminação. Com intuito de analisar o espectro de emissão de um filamento de uma lâmpada incandescente, vamos considerá-lo como sendo semelhante ao de um corpo negro (emissor ideal) que esteja à mesma temperatura do filamento (cerca de 3000 K).

Na figura a seguir, temos o espectro de emissão de um corpo negro para diversas temperaturas.



Intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função da frequência para diferentes valores de temperatura.

Diante das informações e do gráfico, podemos afirmar que, tal como um corpo negro,

- a) os fótons mais energéticos emitidos por uma lâmpada incandescente ocorrem onde a intensidade é máxima.
- b) a frequência em que ocorre a emissão máxima independe da temperatura da lâmpada.
- c) a energia total emitida pela lâmpada diminui com o aumento da temperatura.

d) a lâmpada incandescente emite grande parte de sua radiação fora da faixa do visível.

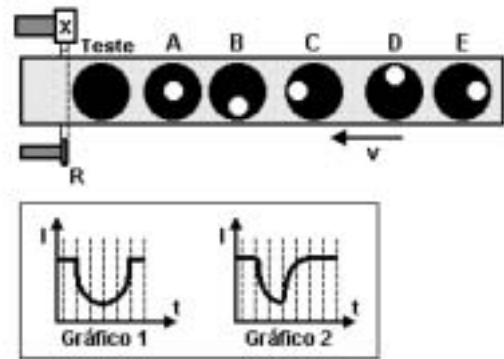
3. (Ufc 2002) Uma fábrica de produtos metalúrgicos do Distrito Industrial de Fortaleza consome, por mês, cerca de $2,0 \times 10^6$ kWh de energia elétrica ($1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$). Suponha que essa fábrica possui uma usina capaz de converter diretamente massa em energia elétrica, de acordo com a relação de Einstein, $E = m_0 c^2$. Nesse caso, a massa necessária para suprir a energia requerida pela fábrica, durante um mês, é, em gramas:

- a) 0,08 b) 0,8 c) 8 d) 80 e) 800

4. (Fuvest 2004) Uma unidade industrial de raios-X consiste em uma fonte X e um detector R, posicionados de forma a examinar cilindros com regiões cilíndricas ocas (representadas pelos círculos brancos), dispostos em uma esteira, como vistos de cima na figura. A informação é obtida pela intensidade I da radiação X que atinge o detector, à medida que a esteira se move com velocidade constante. O Gráfico 1 representa a intensidade detectada em R para um cilindro teste homogêneo.

Quando no detector R for obtido o Gráfico 2, é possível concluir que o objeto em exame tem uma forma semelhante a

- a) A
b) B
c) C
d) D
e) E



5. (Ita 2002) Um átomo de hidrogênio tem níveis de energia discretos dados pela equação $E_n = (-13,6/n^2) \text{ eV}$, em que $\{n \in \mathbb{Z} / n \geq 1\}$. Sabendo que um fóton de energia $10,19 \text{ eV}$ excitou o átomo do estado fundamental ($n = 1$) até o estado p , qual deve ser o valor de p ? Justifique.

6. (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 a 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 absor-

ção. 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 , ($L=n.h/2\pi$, 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 $P = E/c$, 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

7. (Unirio 2002) Os raios X, descobertos em 1895 pelo físico alemão Wilhelm Rontgen, são produzidos quando elétrons são desacelerados ao atingirem um alvo metálico de alto ponto de fusão como, por exemplo, o Tungstênio. Essa desaceleração produz ondas eletromagnéticas de alta frequência denominadas de Raios X, que atravessam a maioria dos materiais conhecidos e impressionam chapas fotográficas. A imagem do corpo de uma pessoa em uma chapa de Raios X representa um processo em que parte da radiação é:

- refletida, e a imagem mostra apenas a radiação que atravessou o corpo, e os claros e escuros da imagem devem-se aos tecidos que refletem, respectivamente, menos ou mais os raios X
- absorvida pelo corpo, e os tecidos menos e mais absorvedores de radiação representam, respectivamente, os claros e escuros da imagem
- absorvida pelo corpo, e os claros e escuros da imagem representam, respectivamente, os tecidos mais e menos absorvedores de radiação
- absorvida pelo corpo, e os claros e escuros na imagem são devidos à interferência dos Raios X oriundos de diversos pontos do paciente sob exame
- refletida pelo corpo e parte absorvida, sendo que os escuros da imagem correspondem à absorção e os claros, aos tecidos que refletem os raios X

8. (Ufrs 2001) Selecione a alternativa que preenche corretamente as lacunas no texto abaixo.

A chamada experiência de Rutherford (1911-1913), consistiu essencialmente em lançar, contra uma lâmina muito delgada de ouro, um feixe de par-

tículas emitidas por uma fonte radioativa. Essas partículas, cuja carga elétrica é, são conhecidas como partículas

- a) positiva - alfa
- b) positiva - beta
- c) nula - gama
- d) negativa - alfa
- e) negativa - beta

9. (Ufrs 2001) A experiência de Rutherford (1911-1913), na qual uma lâmina delgada de ouro foi bombardeada com um feixe de partículas, levou à conclusão de que

- a) a carga positiva do átomo está uniformemente distribuída no seu volume.
- b) a massa do átomo está uniformemente distribuída no seu volume.
- c) a carga negativa do átomo está concentrada em um núcleo muito pequeno.
- d) a carga positiva e quase toda a massa do átomo estão concentradas em um núcleo muito pequeno.
- e) os elétrons, dentro do átomo, movem-se somente em certas órbitas, correspondentes a valores bem definidos de energia.

10. (Ufrs 2001) Considere as seguintes afirmações sobre o efeito fotoelétrico.

I - O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons por uma superfície metálica atingida por radiação eletromagnética.

II - O efeito fotoelétrico pode ser explicado satisfatoriamente com a adoção de um modelo corpuscular para a luz.

III - Uma superfície metálica fotossensível somente emite fotoelétrons quando a frequência da luz incidente nessa superfície excede um certo valor mínimo, que depende do metal.

Quais estão corretas?

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

11. (Ufrs 2002) Selecione a alternativa que preenche corretamente as lacunas no parágrafo a seguir, na ordem em que elas aparecem.

Na partícula alfa - que é simplesmente um núcleo de Hélio - existem dois, que exercem um sobre o outro uma força de origem eletromagnética e que são mantidos unidos pela ação de forças

- a) nêutrons - atrativa - elétricas
- b) elétrons - repulsiva - nucleares
- c) prótons - repulsiva - nucleares
- d) prótons - repulsiva - gravitacionais
- e) nêutrons - atrativa - gravitacionais

12. (Ufrs 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 raias distintas, de frequências bem definidas.

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

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

13. (Ufrs 2002) O decaimento de um átomo, de um nível de energia excitado para um nível de energia mais baixo, ocorre com a emissão simultânea de radiação eletromagnética.

A esse respeito, considere as seguintes afirmações.

I - A intensidade da radiação emitida é diretamente proporcional à diferença de energia entre os níveis inicial e final envolvidos.

II - A frequência da radiação emitida é diretamente proporcional à diferença de energia entre os níveis inicial e final envolvidos.

III - O comprimento de onda da radiação emitida é inversamente proporcional à diferença de energia entre os níveis inicial e final envolvidos.

Quais estão corretas?

- Apenas I.
- Apenas II.
- Apenas I e III.
- Apenas II e III.
- I, II e III.

14. (Puccamp 2002) Certa fonte radioativa emite 100 vezes mais que o tolerável para o ser humano e a área onde está localizada foi isolada. Sabendo-se que a meia vida do material radioativo é de 6 meses, o tempo mínimo necessário para que a emissão fique na faixa tolerável é, em anos, de

- 4
- 6
- 8
- 10
- 12

15. (Ufc 2002) De acordo com a teoria da relatividade, de Einstein, a energia total de uma partícula satisfaz a equação $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$, onde p é a quantidade de movimento linear da partícula, m_0 é sua massa de repouso e c é a velocidade da luz no vácuo. Ainda de acordo com Einstein, uma luz de frequência ν pode ser tratada como sendo constituída de fótons, partículas com massa de repouso nula e com energia $E = h\nu$, onde h é a constante de Planck. Com base nessas informações, você pode concluir que a quantidade de movimento linear p de um fóton é:

- $p = hc$
- $p = hc/\nu$
- $p = 1/hc$
- $p = h\nu/c$
- $p = c\nu/h$

16. (Ufc 2002) O gráfico mostrado a seguir resultou de uma experiência na qual a superfície metálica de uma célula fotoelétrica foi iluminada, separada-

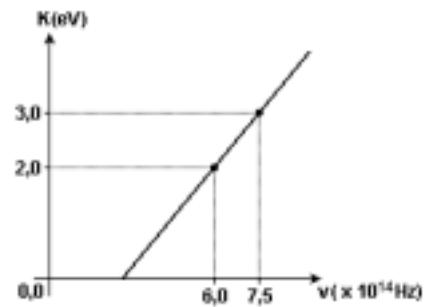
mente, por duas fontes de luz monocromática distintas, de frequências $\nu_1 = 6,0 \times 10^{14}$ Hz e $\nu_2 = 7,5 \times 10^{14}$ Hz, respectivamente. As energias cinéticas máximas, $K_1 = 2,0$ eV e $K_2 = 3,0$ eV, dos elétrons arrancados do metal, pelos dois tipos de luz, estão indicadas no gráfico. A reta que passa pelos dois pontos experimentais do gráfico obedece à relação estabelecida por Einstein para o efeito fotoelétrico, ou seja,

$$K = h\nu - \phi,$$

onde h é a constante de Planck e ϕ é a chamada função trabalho, característica de cada material.

Baseando-se na relação de Einstein, o valor calculado de ϕ , em elétron-volts, é:

- 1,3
- 1,6
- 1,8
- 2,0
- 2,3



17. (Ufc 2002) A função trabalho de um dado metal é 2,5 eV.

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

18. (Ufc 2003) O urânio -238 $\{_{92}\text{U}^{238}$, número de massa $A = 238$ e número atômico $Z = 92$ é conhecido, entre outros aspectos, pela sua radioatividade natural. Ele inicia um processo de transformações nucleares, gerando uma série de elementos intermediários, todos radioativos, até resultar no chumbo-206 $\{_{82}\text{Pb}^{206}$ que encerra o processo por ser estável. Essas transformações acontecem pela emissão de partículas α {núcleos de hélio ${}^4_2\text{He}$ } e de partículas β (a carga da partícula β é a carga de um elétron). Na emissão α , o número de massa A é modificado, e na emissão β , o número atômico Z é modificado, enquanto A permanece o mesmo. Assim, podemos afirmar que em todo o processo foram emitidas:

- 32 partículas α e 10 partículas β .
- 24 partículas α e 10 partículas β .
- 16 partículas α e 8 partículas β .
- 8 partículas α e 6 partículas β .
- 4 partículas α e 8 partículas β .

19. (Ufrn 2003) A natureza do processo de geração da luz é um fenômeno essencialmente quântico. De todo o espectro das ondas eletromagnéticas, sabemos que a luz visível é a parte desse espectro detectada pelo olho humano. No cotidiano vemos muitas fontes de luz BRANCA, como o Sol e as lâmpadas incandescentes que temos em casa. Já uma luz VERMELHA monocromática - por exemplo, de um laser - temos menos oportunidade de ver. Esse tipo de luz laser pode ser observada tanto em consultório de dentistas quanto em

leituras de códigos de barras nos bancos e supermercados. Nos exemplos citados, envolvendo luz branca e luz vermelha, muitos átomos participam do processo de geração de luz.

Com base na compreensão dos processos de geração de luz, podemos dizer que a

- luz vermelha monocromática é gerada pelo decaimento simultâneo de vários elétrons entre um mesmo par de níveis atômicos.
- luz branca é gerada pelo decaimento simultâneo de vários elétrons entre um mesmo par de níveis atômicos.
- luz vermelha monocromática é gerada pelo decaimento simultâneo de vários elétrons entre vários pares de níveis atômicos.
- luz branca é gerada pelo decaimento sucessivo de um elétron entre vários pares de níveis atômicos.

20. (Ufc 2004) Quanto ao número de fótons existentes em 1 joule de luz verde, 1 joule de luz vermelha e 1 joule de luz azul, podemos afirmar, corretamente, que:

- existem mais fótons em 1 joule de luz verde que em 1 joule de luz vermelha e existem mais fótons em 1 joule de luz verde que em 1 joule de luz azul.
- existem mais fótons em 1 joule de luz vermelha que em 1 joule de luz verde e existem mais fótons em 1 joule de luz verde que em 1 joule de luz azul.
- existem mais fótons em 1 joule de luz azul que em 1 joule de verde e existem mais fótons em 1 joule de luz vermelha que em 1 joule de luz azul.
- existem mais fótons em 1 joule de luz verde que em 1 joule de luz azul e existem mais fótons em 1 joule de luz verde que em 1 joule de luz vermelha.
- existem mais fótons em 1 joule de luz vermelha que em 1 joule de luz azul e existem mais fótons em 1 joule de luz azul que em 1 joule de luz verde.

ÚLTIMAS PALAVRAS AOS ALUNOS

Caros alunos!

Neste pouco tempo de convívio com vocês, quisemos mostrar algumas facetas do que pode ser estudado em Física.

Muitos assuntos importantes amplamente descritos em outros livros didáticos foram deixados nos módulos de Física, mas de forma alguma podem ser esquecidos. Pelo contrário, a união dos diferentes modos de abordar a Física pode mostrar a vocês a abrangência e a importância dessa matéria no cotidiano. Diversos fenômenos observados na natureza podem ser explicados através de leis e formulações elaboradas ao longo dos séculos. Percebam a ligação entre a vida cotidiana e a ciência, como é tudo fabuloso!

O conteúdo dos módulos apresentados são, muitas vezes, complementares aos livros textos, que devem ser também usados na recordação do que aprenderam nos anos do segundo grau, para se prepararem para os exames de ingresso no nível superior.

Nos diversos ramos da Física, muita coisa ainda precisa ser profundamente estudada. Uma teoria só é sustentável se ela puder ser confirmada nos mais diferentes casos existentes, considerando-se sempre os limites de validade.

A continuidade do desenvolvimento científico e tecnológico depende sempre de uma nova geração, da qual hoje vocês fazem parte! Para chegar lá, é

preciso estudar muito, pois se de um lado já se tem muita coisa desvendada, por outro lado temos um vasto conhecimento a adquirir... Não deixem nunca de se aprimorar , de avançar nos conhecimentos , cada qual na sua área de trabalho, qualquer que ela seja. Boa escolha, bons estudos e boa sorte! Até breve,

Os coordenadores da Física

Referências Bibliográficas

- ALONSO, M. & FINN, E. J. *Física*. Wilmington, Addison-Wesley Iberoamericana, 1995.
- AMALDI, E. & AMALDI, G. *Corso di Fisica*. Bologna, N. Zanichelli, 1956.
- AMALDI, U. “Imagens da Física” Curso Completo. Editora Scipione ,1997
- EINSTEIN, A. & INFELD, L. *A evolução da física*. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara, 1988.
- FEYNMAN, R. P. *QED A estranha teoria da natureza da luz e da matéria*. Lisboa, Ed. Gradiva, 1992.
- GASPAR, A. *Eletromagnetismo e Física Moderna*. São Paulo, Ed. Ática, 2000.
- GRAF (Grupo de Reelaboração do Ensino de Física). *Física 3: Eletromagnetismo*. São Paulo, Edusp, 1999.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. & WALKER, J. *Fundamentals of physics*. 5ª ed. New York, JohnWiley, 1997.
- JÚNIOR, D. B. *Tópicos de Física Moderna*. São Paulo, Ed. Companhia da Escola, 2002.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica 4*. 1ª ed. São Paulo, Ed. Edgar Blücher, 1998.
- OLDENBERG, O. “Introduction to Atomic Physics “ , Mc Graw-Hill Book Company, Inc. 1954.
- SEARS, F.; YOUNG, H. D.; ZEMANSKY, M. W. *Física 4 LTC*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1995.
- TIPLER, P.A. *Física Moderna*. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara, 1995.
- USBERCO, J. & SALVADOR, E. *Química*. 5ª ed. São Paulo, Ed. Saraiva, 2002.

Sobre os autores

Guilherme Brockington

Licenciado em Física desde 2000 pela UFJF. Foi professor de Física do Ensino Médio da rede pública. Atualmente faz Mestrado em Ensino de Ciências no Instituto de Física e na Faculdade de Educação da USP, além de participar de outras atividades voltadas para o ensino sendo professor em cursos de formação continuada de professores. Dedicar-se também à produção de material didático sobre Física Moderna para alunos do Ensino Médio.

Wellington Batista de Sousa

Licenciado em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo, professor de Física na rede estadual e rede particular de ensino e professor de Física no curso MED Vestibulares. É integrante do grupo de pesquisa sobre ensino de Física Moderna no ensino médio de escolas estaduais

Nobuko Ueta

Docente do IFUSP e doutora em Física Nuclear . Desenvolve pesquisa em Física Nuclear Experimental. Participou de atividades didáticas no bacharelado e na licenciatura em Física .

Anotações

Anotações

Anotações