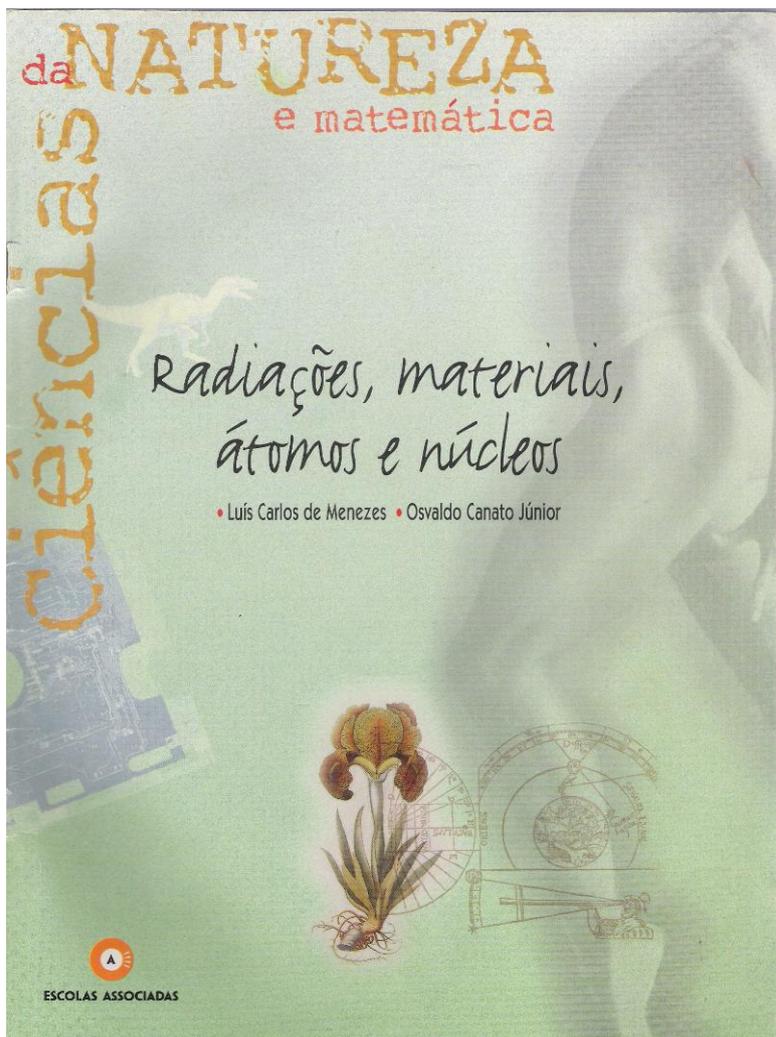


APÊNDICE A - RADIAÇÕES, MATERIAIS, ÁTOMOS E NÚCLEOS



As radiações e a matéria 3
As radiações na vida cotidiana 3
Em questão 1: Radiações eletromagnéticas 5
Atividade 1: Ondas de rádio e infravermelho dentro de casa 5
Atividade 2: A procura de radiações 6
As radiações na medicina, na indústria, na guerra e na ciência 6
Atividade 3: Radiações e medicina 7
As radiações e a matéria ao longo da história 8
Conexão: O átomo de Dalton e a lei das proporções múltiplas 9
Atividade 4: Antigas explicações para fenômenos do cotidiano 9
Conexão: A natureza granular da matéria 10
O átomo quântico 12
Energia granulada 12
Grãos de energia 12
Atividade 5: Quanto vale o quantum de energia? 13
Em questão 2: Efeito-voigt 13
Grãos de luz 13
Atividade 6: Qual luz arranca elétrons de que material? 14
"Arco-íris fatiado" dos gases incandescentes 16
Como fazer: Um "arco-íris" 14
Atividade 7: Como saber do que é feita uma estrela? 15
Conexão: O espectro do hidrogênio e os átomos de Rutherford e Bohr 15
Em questão 3: Níveis de energia 16
Ondas que são projetadas e projetos que são ondas 16
Atividade 8: Difração e interferência 16
Atividade 9: Faça sua própria análise espectral 17
Em questão 4: Saltos eletrônicos 18
Em questão 5: Quantum granulado e quantum ondulado 18
Uma nova compreensão do mundo 18
Conexão: Impacto de ondas e difração de partículas 19
Atividade 10: Recuos atômicos e foguetes fotônicos 19
Processos químicos e tabela periódica 21
Conexão: Distribuição eletrônica 22
Conexão: Elétrons que se evitam... e fótons que se imitam! 22
Atividade 11: O laser e a associatividade entre fótons iguais 23
As radiações, o núcleo atômico e suas partículas 23
As radiações nucleares e a constituição do núcleo 23
Conexão: Equivalência entre massa e energia nas reações nucleares 23
Em questão 6: Decaimento beta 26
Atividade 12: Famílias radioativas naturais 27
Conexão: Como determinar a idade de múmias ou de telas de linho 27
Em questão 7: A idade de Oetzi 29
Bombas e usinas nucleares 27
Conexão: Ciência e tecnologia a serviço da guerra 29
Atividade 13: O poder destrutivo dos explosivos nucleares 30
Atividade 14: Energia nas fusões e fissões nucleares 31
Em questão 8: Potência e energia nuclear 32
Atividade 15: Energia nuclear: riscos, benefícios e uso militar 33
As partículas elementares e as forças fundamentais 33
Conexão: Criação e aniquilação de pares de partículas 35
Em questão 9: Por dentro de nêutrons e prótons 36
Conexão: Partículas elementares e forças fundamentais 36
Estrutura da matéria e propriedades dos materiais 37
Gases, líquidos e sólidos e a relação entre suas propriedades físicas 37
Atividade 16: Espelhos 39
Materiais semicondutores e dispositivos microeletrônicos 40
Atividade 17: Fotorreceptores modernos 40
Atividade 18: Cor e condução elétrica de semicondutores 41
Atividade 19: Iluminação e condução elétrica de semicondutores 42
As moléculas da vida e as radiações 44
Atividade 20: As radiações e a origem da vida 45
Atividade 21: Transparência e opacidade às radiações 46
Conexão: Equipamentos de radiodeteção e unidades de doses radiativas 47

Ciências da Natureza e Matemática
Ensino Médio
RADIAÇÕES, MATERIAIS, ÁTOMOS E NÚCLEOS
Luís Carlos de Menezes
Oswaldo Canato Júnior

Ficha técnica
 • **Diretoria:** TIBONI F. C. LANIX
 • **Coordenador de Ciências da Natureza e Matemática:** LUIS CARLOS DE MENEZES
 • **Coordenador-geral:** LILIO A. PAOLIELLO JR.
 • **Editora:** MARIA CAROLINA DE ARAUJO
 • **Projeto gráfico e capa:** ISABEL CARBALLLO
 • **Preparação de originais e revisão:** MARCIA MENIN
 • **Ilustrações:** PAULO CÉSAR PEREIRA DOS SANTOS

ESCOLAS ASSOCIADAS
 RUA BARÃO DO RIO BRANCO 283
 04753-000 SÃO PAULO SP
 T 11 5687 3511 F 11 5548 0534
 ISBN 85-7481-176-9

SUMÁRIO

Bibliografia

ALVAREZ, B.; MÁXIMO, A. *Curso de física*. São Paulo: Scipione, 2000.
 BLOOMFIELD, L. A. *How things work*. Nova York: John Wiley, 1997.
 CHASSOT, A. *A ciência através dos tempos*. São Paulo: Moderna, 1994.
 FERREI, J. *O despertar na Via Láctea: uma história da astronomia*. Rio de Janeiro: Campus, 1990.
 GREF (Grupo de Reclamação do Ensino de Física). *Física 2: física térmica e óptica*. São Paulo: Edusp, 1993. *Física 3: eletromagnetismo*. São Paulo: Edusp, 1993.
 HOKBESS, J. *Os mistérios da ciência: o desenvolvimento científico em função das exigências sociais*. Porto Alegre: Globo, 1982.
 ORSONI, E. et al. *Física para ciências biológicas e biomédicas*. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982.
 PONDOMAREN, L. I. *The quantum dice*. Londres: Institute of Physics Publishing, 1993.
 ROSAN, C. A. *História ilustrada da ciência*. São Paulo: Circulo do Livro, 1987.
 SALZBERG, H. W. *From carmen to chemist*. Washington: American Chemical Society, 1991.
 SIEGAL, E. *Do raio X aos quarks: física moderna e suas descobertas*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1980.
 SIKSANT, R. A. et al. *Modern physics*. Flakófia: Saunders College Publishing, 1997.
 THOMAS, E. *From quarks to quaxors: an outline of modern physics*. Londres: The Athlone Press of the University of London, 1977.
 WILKIN, M. R. *Física de átomos*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1965.

Sítio
Internacionais
 Acelerador de partículas CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire): <http://public.web.com.ch/public>
 Acelerador de partículas Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory): www.fnal.gov
 Acelerador de partículas LEP (Laboratory for Elementary Particle Physics of CERN University): <http://www.lns.cornell.edu/public/lab-info/quark.html>
 Acelerador de partículas SLA (Stanford Linear Accelerator): www2.slac.stanford.edu/rel
 Contemporary Physics Education Project (CPEP): www.cpepweb.org
 How things work: <http://howthingswork.virginia.edu>
 Visual quantum mechanics: <http://phys.educ.knu.edu>

Nacionais
 A aventura das partículas: www.aventuradasparticulas.ufv.br
 Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará: www.fisica.ufc.br
 Grupo de Pesquisa em Ensino de Física (GoPEF) - PUC-SF: <http://mesonpuc.caf.puc.br/maria/GoPEF.html>
 Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS): www.lnls.br
 Página sobre astronomia e astrofísica do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: <http://astro.ifcgrs.br>



Radiações materiais átomos e núcleos

As radiações e a matéria

AS RADIAÇÕES NA VIDA COTIDIANA

O primeiro contato que temos com os objetos se dá pela luz, radiação luminosa, com suas cores e seu brilho. Isso vale tanto para objetos com luz própria, como lâmpadas, velas, semáforos, telas de TV, Sol e outras estrelas, quanto para objetos iluminados, como roupas, livros, cartazes, nuvens, Lua, paisagens e também pessoas. A luz tem a ver, ainda, com sentimentos e humores; luzes e fogos são festa, ao passo que o luto é negro.

4

Radiações, materiais, átomos e núcleos

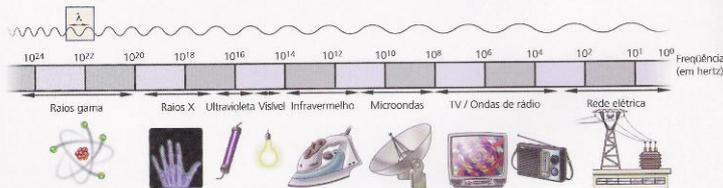
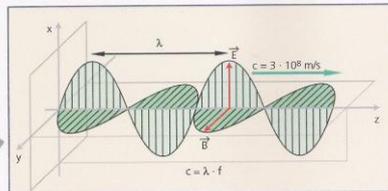


Figura 1
Luz, nosso primeiro contato com os objetos.



Figura 2
É amplo o uso da radiação térmica em nosso dia-a-dia.

Figura 3
Toda radiação é uma onda eletromagnética, luz, que se propaga, no vácuo, com velocidade $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Nossa "antena", o olho, consegue captar apenas frequências dentro da faixa da luz visível, uma estreita porção do espectro eletromagnético.



ESCOLAS ASSOCIADAS
ENSINO MÉDIO

Nossa relação com o mundo é também intermediada pelo calor, radiação térmica, a começar pelo próprio Sol, que abastece energeticamente a Terra. Resistores elétricos incandescentes aquecem a água, em chuveiros, e iluminam ambientes, em lâmpadas.

Como nas lâmpadas incandescentes, luz e calor são inseparáveis na chama ou na luz solar, que ao iluminar também aquecem. Em altíssimas temperaturas, a luz emitida é branca ou branco-azulada; em temperaturas menores, vermelha ou amarelada. De fato, tanto a luz que vemos como o calor que sentimos na pele são ondas eletromagnéticas que nos atingem, com a radiação térmica correspondendo ao infravermelho, de frequência mais baixa que a luz visível.

Superfícies espelhadas não transmitem, mas sim refletem luz e calor, razão pela qual as garrafas térmicas têm vidro espelhado em seu interior, evitando que a radiação térmica emitida pelo líquido aquecido escape. Já superfícies escuras, como a dos coletores solares ou a de filmes fotográficos, são boas absorvedoras de calor. Da mesma forma, roupas escuras dão maior sensação de calor do que roupas claras em dias quentes.

Da radiação infravermelha depende o funcionamento de alguns sistemas de alarme que disparam ao captar o calor emitido pelo corpo de uma pessoa. Em ambientes escuros, pode-se filmar com câmeras de infravermelho. É também infravermelha, de baixa intensidade, a radiação emitida por controles remotos que acionam televisores, aparelhos de som e portas de garagem.

Há muitas outras radiações de que se faz uso diário. Logo abaixo da faixa do infravermelho estão as microondas, que, dependendo de sua frequência, são utilizadas em certos tipos de forno e nas transmissões de TV ou telefonia.

nia por satélites estacionários e estações repetidoras. De frequências ainda mais baixas são as ondas eletromagnéticas de AM ou FM, ou seja, de amplitude ou frequência moduladas, por meio das quais se transmitem e se sintonizam sinais de rádio e TV. Essas radiações são produzidas nas emissoras e moduladas com informações do som e da imagem que carregam e que os receptores captam e interpretam.

Existem, também, radiações de frequências mais altas que as da luz visível, como a ultravioleta, que produz a luz branca emitida pelas lâmpadas "frias" ou fluorescentes. Outro tipo de luz é o *laser*, com frequências que podem variar desde o infravermelho até o ultravioleta. Usa-se o *laser* em aparelhos de som, em computadores, em leitores de códigos de barras de caixas de supermercados e em iluminações festivas que projetam feixes de luz no céu noturno.



Figura 4
Vivemos mergulhados em um "mundo de radiações".

RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS

Uma pessoa verificou que um dispositivo gerador de ondas eletromagnéticas emita, predominantemente, radiações cujo comprimento de onda, no ar, era $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-3}$ m. Sabendo que a velocidade da luz vale $3 \cdot 10^8$ m/s e tendo em vista o diagrama da figura abaixo, que apresenta, de maneira aproximada, as frequências das diversas radiações componentes do espectro eletromagnético, podemos concluir que o dispositivo observado deveria ser:

- a) uma antena de uma emissora FM.
- b) um ferro de passar roupa a 300°C.
- c) uma antena de microondas da Embratel.
- d) uma lâmpada elétrica comum.
- e) um tubo de raios X.

(PUC-MG)



EM QUESTÃO

ATIVIDADE 1

ONDAS DE RÁDIO E INFRAVERMELHO DENTRO DE CASA

1. É muito fácil produzir uma onda eletromagnética em casa. Aliás, fazemos isso muitas vezes ao dia, quando, por exemplo, acionamos o interruptor para acender ou apagar uma lâmpada, variando abruptamente a corrente elétrica dentro do fio. Com um radinho qualquer, é possível até detectar essa onda, bastando colocá-lo ligado "fora de estação" perto do interruptor. Faça isso e verifique como seu rádio "ronca" quando você liga e desliga a lâmpada. Investigue, também, que outras ondas "caseiras" seu rádio pode sintonizar, como,

por exemplo, as produzidas por liquidificadores, acendedores elétricos de fogão ou telefones celulares.

2. Agora que você já se convenceu de que não são apenas as estações de AM e FM que produzem ondas, sintonize seu rádio em uma dessas estações e faça um teste sobre que materiais atrapalham a recepção feita pelo aparelho. Para tanto, envolva-o com diversos materiais, tais como papel celofane, plástico transparente, papel comum, papelão, agasalho de lã, papel-alumínio e lata. O resultado é o mesmo para todos os materiais?

3. E quanto à radiação infravermelha produzida por um controle remoto? Será que ela atravessa qualquer

coisa? Faça o teste colocando entre ele e a TV os mesmos materiais do item anterior e verifique a diferença no comportamento apresentado pelos dois tipos de onda. Elabore uma primeira explicação para suas observações e troque opiniões com seus colegas de classe.

4. Já que você está com o controle remoto na mão, aproveite para fazer outra experiência. Utilizando um ou mais espelhos para direcionar os raios infravermelhos até a tela, ligue sua TV a partir de outro cômodo de sua casa e perceba que a radiação infravermelha é um tipo de luz que, mesmo invisível para nossos olhos, é refletida pelo espelho.

ATIVIDADE IN

À PROCURA DE RADIAÇÕES

Olhando as menções já feitas no texto e examinando sua própria memória:

1. Enumere as formas de radiação que você usou hoje ou que ainda vai utilizar nas próximas horas.
2. De todas as radiações mencionadas no texto e na lista que você elaborou, verifique de que conhecimento já dispõe, hoje, sobre as maneiras pelas quais são produzidas e as formas como atuam essas radiações, em suas finalidades.
3. Procure identificar, em conversas com pessoas acima de 60 anos, quais dessas radiações eram disponíveis no tempo de infância delas e quais são de uso cotidiano mais recente.



Figura 5
Na medicina, as radiações são utilizadas tanto em diagnósticos como em tratamentos.

ESCOLAS ASSOCIADAS
(ENEMIO 118181)

AS RADIAÇÕES NA MEDICINA, NA INDÚSTRIA, NA GUERRA E NA CIÊNCIA

A detecção de radiações emitidas pelo corpo humano e sua exposição temporária a determinados tipos de radiação têm sido cada vez mais usadas na medicina, permitindo o desenvolvimento de métodos de diagnóstico e tratamento mais eficazes e seguros:

- Pelo grande poder de penetração no organismo, os raios X são há muito tempo utilizados na área médica, não apenas para visualização de ossos, mas também de artérias, veias e órgãos do corpo humano por meio da injeção ou ingestão pelo paciente de substâncias opacas a esses raios que causam contraste na chapa radiográfica.
- Na tomografia computadorizada, feixes muito finos de raios X percorrem toda a extensão do tecido a ser analisado e um computador gera imagens tridimensionais da lesão.
- A radiação gama, ainda mais penetrante, é utilizada na cintilografia, técnica que consiste na introdução no organismo de substâncias radiativas que acabam se concentrando no tecido lesionado e dali emitem raios gama, em uma espécie de “auto-radiografia”, detectados por uma câmera especial que gera imagem digital em uma tela de vídeo.
- As radiações de alta frequência são também empregadas em tratamentos radioterápicos de tumores para destruir células cancerígenas.
- Problemas circulatórios, como na arteriosclerose, levam a diminuição de temperatura, ao passo que inflamações, como na artrite e distensões musculares, provocam maior circulação de sangue e maior temperatura, ou seja, maior emissão de infravermelho. O mapeamento dessa radiação de baixa frequência, feito na termografia médica, possibilita o diagnóstico desses e outros males.
- A radiação infravermelha pode também ser usada para intensificar a circulação sanguínea em tratamentos de infecções musculares e de dores reumáticas.
- A ressonância nuclear magnética é outra técnica de diagnóstico que utiliza radiações de baixa frequência, expondo o paciente a campos magnéticos intensos que fazem oscilar os prótons de átomos de hidrogênio do corpo. Como resultado, há emissão de radiação eletromagnética, detectada pelo aparelho e transformada em imagem na tela de um computador.
- Também de baixa frequência são as ondas eletromagnéticas cerebrais, mapeadas pela topografia cerebral.
- Na endoscopia, a luz visível enviada através de fibras ópticas por dentro de tubos capilares capta imagens reais do organismo.
- Raios *laser* são empregados em cirurgias para correção de defeitos de visão, como a miopia.
- Quando a exposição do paciente a qualquer forma de radiação não é desejável, como na análise do desenvolvimento de um feto, é comum o uso da ultra-sonografia, que utiliza o som, onda mecânica e não eletromagnética, de alta frequência.

Nos processos industriais, é comum o uso de radiações tanto no controle da produção quanto na prevenção de acidentes:

- A radiação gama é utilizada na gamagrafia, técnica em que radiografias de peças metálicas são analisadas para eliminar a possibilidade de falhas estruturais em eixos de veículos e em outros processos produtivos.

- Em alguns fornos industriais emprega-se o pirômetro óptico, um tipo de termômetro que emite luz de acordo com a temperatura do ambiente.
 - Para verificação de pequenas oscilações de temperatura que podem sinalizar risco de explosão por superaquecimento, algumas fábricas fazem uso de aparelhos termográficos, semelhantes aos utilizados na termografia médica.
 - Raios *laser* são usados em cortes precisos de peças metálicas.
- Para finalidades militares ou de investigação criminal, utilizam-se diversos tipos de radiação:
- Na orientação de vôo ou localização de aeronaves, usam-se radares – ondas eletromagnéticas refletem no corpo metálico das aeronaves e são captadas por antenas parabólicas situadas nos aeroportos ou em bases de artilharia anti-aérea.
 - Em armamentos modernos, a localização precisa do alvo é feita por raios *laser*, e alguns mísseis são projetados para seguirem o rastro infravermelho deixado pelas turbinas de aviões a serem abatidos.
 - Em algumas cidades, a polícia vem utilizando câmeras de infravermelho acopladas a helicópteros para rastreamentos noturnos à procura de vultos suspeitos movimentando-se rapidamente e, por isso, liberando maior quantidade de calor.
 - Raios X e outras radiações são usados para o controle de eventual posse de armas, em bagagens e por passageiros nos aeroportos ou por clientes em entradas de agências bancárias.
 - Radiografias são também utilizadas nas investigações sobre a autenticidade de obras de arte e outros objetos.
- É também vasto o uso das radiações no meio científico, com aplicações tanto na área das ciências da natureza quanto nas ciências humanas:
- Ainda que já tenhamos ido à Lua e enviado para fora de nosso planeta diversas sondas espaciais, nosso conhecimento do Universo deve-se, essencialmente, à radiação luminosa, térmica ou de outros tipos recebida do Sol e outras estrelas. Por meio da análise dessa radiação, é possível saber não apenas as temperaturas, mas também quais substâncias físicas há e quais processos físicos estão ocorrendo na superfície e no interior desses astros.
 - Na investigação do espaço cósmico, são também importantes as emissões de radiofrequência, detectadas por grandes antenas de radioastronomia, com informações sobre astros que, sem esses meios, não teriam sequer sua existência conhecida.
 - Além dessas radiofrequências, “chovem” permanentemente, sobre a superfície da Terra, raios X, raios gama e várias partículas de alta energia, vindos das profundezas do cosmo, que podem ser registrados por diversos detectores, fornecendo elementos para compreender melhor o Universo.
 - Na história e na arqueologia, a procura em peças, utensílios e até mesmo múmias de alguns materiais que são formados por decaimentos radiativos pode revelar a idade aproximada dos objetos.
 - Trabalhos de restauração têm sido aperfeiçoados pela exposição de peças a raios X, que revelam detalhes sobre os diferentes materiais que foram originalmente utilizados.
 - Na meteorologia, faz-se uso de satélites estacionários que captam a radiação infravermelha emitida por nuvens e correntes marítimas, obtendo-se

RADIAÇÕES E MEDICINA

1. Informe-se com seus familiares sobre que tipo de equipamento de diagnóstico ou terapia mencionado no texto eles, ou seus conhecidos, já utilizaram e se conhecem seu princípio de funcionamento.
2. Amplie as informações obtidas entrevistando médicos e técnicos de laboratórios ou pesquisando em livros, revistas ou na Internet.
3. Com seu professor e colegas de classe, elabore um painel que propicie uma ampla visão de como as radiações são aplicadas na medicina, ordenando as frequências utilizadas, medidas em hertz (Hz), em ordem crescente.

ATIVIDADE 10



Figura 6
Na indústria e na guerra, o uso de radiações auxilia a busca do preciso.

ESCOLAS ASSOCIADAS
ENSINO MÉDIO

8

Radiações, materiais, átomos e núcleos



Figura 7
No meio científico, as radiações são usadas para investigações da matéria e do Universo.

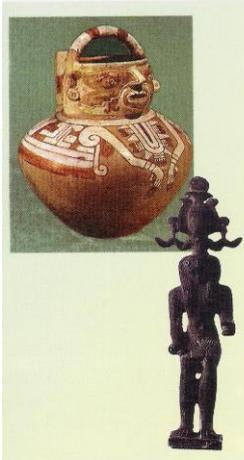


Figura 8
As radiações sempre fizeram parte da vida humana. Povos da Antiguidade já usavam técnicas à base de fogo, como mostram estas peças de cerâmica e bronze dos maias e dos egípcios.
Urnas funerárias de cerâmica, c. 300 a.C., México.
Estatueta do deus Hórus, 664-332 a.C., Egito.

ESCOLAS ASSOCIADAS
ENSINO MÉDIO

uma estimativa de suas temperaturas. Esse mesmo método pode ser utilizado no registro de focos de incêndio em florestas.

- Como mesmo a baixas temperaturas há movimentos de partículas dentro de qualquer material, a captação da radiação térmica que emitem permite a físicos, químicos e biólogos caracterizar a estrutura interna de diversas substâncias.
- Quando a indagação é sobre a estrutura atômica, empregam-se os modernos aceleradores de partículas, que provocam colisões subatômicas de alta energia, liberando fragmentos e radiação, monitorados por detectores e sistematizados em computadores.

AS RADIAÇÕES E A MATÉRIA AO LONGO DA HISTÓRIA

O fogo – e o que se fazia com ele na Antiguidade, como iluminar, cozer, obter metais pela fusão de minérios ou fabricar cerâmica e vidro – era associado a poderes sobrenaturais por nossos ancestrais. Em algumas culturas antigas, rochas e minerais eram considerados seres vivos, nas formas masculina e feminina, que se atraem e se repelem. Para os sumérios, cada metal estava relacionado a um deus e a um planeta e os meteoritos de ferro que caíam do céu eram, por isso, sagrados.

Há cerca de 2.500 anos, na Grécia clássica, surgiram idéias sobre a constituição da matéria, como a de Demócrito, a primeira teoria atômica que tem registro histórico. Para ele, tudo o que existia era formado por pequenas partículas indivisíveis e indestrutíveis, em constante movimento, às quais chamou de átomos. A variedade de substâncias era explicada pelos diversos tipos de átomos ou pela diferença em seu arranjo, com os objetos mais duros tendo partículas mais próximas e os mais maleáveis contendo mais espaço vazio ou vácuo.

Por contrariar o senso comum de uma sociedade que não possuía técnicas e conhecimento para comprovar a existência dessas partículas invisíveis, a teoria atômica teve pouca adesão e foi largamente superada pelas idéias de Aristóteles e de outros que o antecederam, que não aceitavam a idéia de vácuo e que afirmavam que tudo o que existia na Terra era formado por quatro elementos – ar, fogo, terra e água – e quatro qualidades – quente, frio, úmido e seco. Em qualquer transformação, elementos e qualidades se recombinavam e davam origem a algo totalmente novo, impossível de ser decomposto nos objetos ou substâncias dos quais se originou.

Além de explicar de forma lógica quase todos os fenômenos naturais da época, a teoria de Aristóteles serviu de apoio e inspiração a uma atividade humana que há muito vinha se desenvolvendo, a alquimia, que, dentre outras magias, buscava a transmutação do chumbo e outros metais em ouro e a purificação do espírito humano por meio de alguma poção que prolongasse a vida para toda a eternidade. A transmutação ganhara uma base teórica, pois, para produzir ouro, bastaria encontrar a proporção correta entre as quatro qualidades. No mundo antigo, acreditava-se que o ar e tudo que não fosse sólido ou líquido eram imponderáveis, o que fazia dos processos de destilação um ritual mágico, em que substâncias podiam ter seus “espíritos” liberados e condensados em uma matéria nova e purificada (figura 9). Apesar de todo o misticismo que envolvia os trabalhos da alquimia, sua prática foi de grande importância para que progressivamente o manuseio dos materiais fosse mudando o referencial das imaginárias qualidades aristotélicas para uma focalização nas diferentes quantidades e qualidades das substâncias.

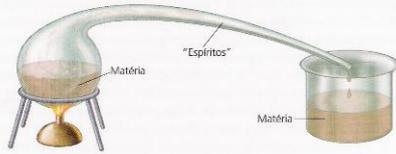


Figura 9
Para os alquimistas, o processo de destilação liberava "espíritos" que se condensavam em uma matéria nova e purificada.

cias que participavam efetivamente de uma reação química. Magos e alquimistas são avós e pais da química.

O aumento da extração de carvão, com as revoluções mercantil e industrial, fez surgir técnicas mais avançadas de bombeamento de ar para dentro de minas cada vez mais profundas e de retirada da água que naturalmente se acumulava em seu interior. Tornou-se necessário, portanto, tratar o ar como uma substância material, responsável pela pressão atmosférica e cujo peso podia ser medido. Na seqüência, os "espíritos" exalados pelos tão conhecidos processos de destilação foram sendo classificados como diferentes tipos de gases e o próprio ar foi identificado como uma substância complexa, constituída de outras substâncias, uma das quais estava presente também na água. Desenvolveu-se, assim, a consciência do terceiro estado da matéria.

No final do século XVIII, as transformações químicas já eram estudadas com base no balanceamento das massas de reagentes e produtos, abrindo caminho para a **teoria atômica de Dalton**, formulada pouco depois. Ao longo do século XIX, algumas descobertas não apenas evidenciaram o caráter corpuscular da matéria sugerido por Dalton, como também sugeriram que o átomo fosse divisível, com diferentes partículas em seu interior. Nos experimentos sobre eletrólise, por exemplo, verificava-se que as quantidades dos elementos que se acumulavam em cada eletrodo mantinham uma relação simples com seus pesos atômicos e valências, levando à conclusão de que os elementos químicos participantes desse processo eram formados por átomos que trocavam unidades de carga elétrica entre si, tornando-se íons positivos e negativos (ver figura da p. 26 do fascículo *O mundo da energia*).

Outra indicação da existência de partículas subatômicas veio, em meados do século XIX, com o estudo de descargas elétricas em tubos de vácuo, precursores dos modernos tubos de imagem de TVs e monitores de computador. Quando um gás rarefeito era submetido a elevada tensão elétrica,

O ÁTOMO DE DALTON E A LEI DAS PROPORÇÕES MÚLTIPLAS

Na natureza existem diversos compostos químicos diferentes formados pelos mesmos elementos. Um exemplo é quando carbono e oxigênio se associam formando monóxido de carbono (CO) ou dióxido de carbono (CO₂). Cada 3 g de carbono pode dar origem a 7 g de monóxido ou a 11 g de dióxido de carbono, ficando estabelecida uma proporção de 2:1 entre as quantidades de oxigênio utilizadas em cada caso, 4 g e 8 g, respectivamente.

Relações numéricas tão simples como essa, sempre observadas quando os compostos eram formados pelos mesmos elementos, levaram Dalton, na virada para o século XIX, a enunciar a lei das proporções múltiplas, ou seja, "se dois elementos se combinam para formar dois ou vários compostos químicos, as proporções de cada elemento são sempre múltiplos inteiros de uma quantidade inicial". Não seria possível, por exemplo, existir uma substância natural formada por 3 g de carbono e 10 g de oxigênio, já que essa quantidade não é um múltiplo inteiro da quantidade mínima de massa, 4 g, que o oxigênio possui em compostos químicos.

Com isso, a conclusão lógica a que Dalton chegou foi a de que cada elemento químico era constituído de partículas elementares, átomos, de maior ou menor massa que, por causa de sua indivisibilidade, somente podiam ser associados por múltiplos de uma unidade. Mais tarde, essa teoria foi aperfeiçoada, admitindo-se que os átomos agrupavam-se como moléculas, possibilitando cálculos de massas moleculares e atômicas e a elaboração da classificação periódica dos elementos por Mendeleiev.

CONEXÃO

ATIVIDADE 4

ANTIGAS EXPLICAÇÕES PARA FENÔMENOS DO COTIDIANO

Por mais estranhas que hoje possam nos parecer, as teorias sobre a constituição da matéria elaboradas no mundo antigo explicavam satisfatoriamente muitos dos fenômenos naturais que envolvem nosso dia-a-dia.

1. Em enciclopédias, livros ou sites da Internet especializados em história

da ciência, realize uma pesquisa sobre as teorias de outros filósofos da Grécia antiga, como Tales de Mileto, Empédocles e Heráclito, ou ainda sobre pensamentos originados em outras civilizações antigas, como o *yin* e *yang* chinês ou os *dyads* e *triads* hindus.

2. Discuta com seus colegas o resultado de sua busca, assim como as teorias de Demócrito e Aristóteles, citadas no texto.

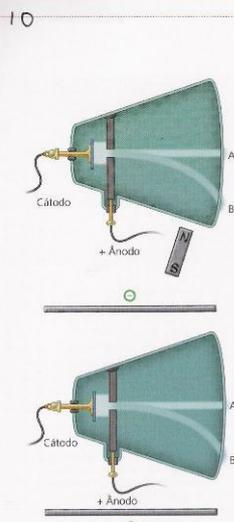


Figura 10
Análises dos desvios sofridos por raios catódicos, que atingem o ponto B em vez de A, por causa da presença de ímãs ou placas eletrizadas, levaram à descoberta do elétron.



Figura 11
Reprodução da famosa radiografia de uma mão obtida por Roentgen em 1895.

ESCOLAS ASSOCIADAS
TATYANO HEDRILIO

o eletrodo negativo, ou cátodo, emita um feixe de luz que se propagava em linha reta e atingia a parede oposta do tubo, tornando-a fosforescente. Outros experimentos mostrariam que esses raios catódicos eram desviados tanto por ímãs quanto por placas eletrizadas, constituindo-se de partículas negativas (figura 10). Em 1897, J. J. Thomson mediu a relação entre a carga elétrica e a massa dessas partículas, observando que o resultado não dependia do tipo de eletrodo ou gás no tubo. Descobria-se, assim, o elétron, partícula subatômica constituinte universal da matéria – Thomson chegou a pensar que os elétrons seriam como “passas” distribuídas no interior de um “pudim” positivo, sendo neutra a carga total do átomo, ideia que não prosperou.

Nessa mesma época, a utilização de metais pesados como constituintes do ânodo, pólo positivo, e, portanto, alvos dos raios catódicos, causaria a emissão de um estranho tipo de raio invisível que atravessava não apenas as paredes do próprio tubo, mas também diversos objetos e até mesmo o tecido do corpo humano, projetando imagens de ossos em uma tela. Por serem completamente desconhecidos e inesperados, foram chamados de raios X e provocaram um deslumbramento em todo o mundo, sendo rapidamente utilizados na medicina e em outras atividades; apenas depois se descobriu o efeito nocivo de exposições prolongadas a eles (figura 11).

Diferentemente dos raios catódicos, os raios X não eram desviados pela ação de campos elétricos ou magnéticos, levando à conclusão de que deveriam ser radiações, como a luz, e não partículas, como os elétrons. Mais tarde, essa hipótese seria confirmada pela observação de que, ao atravessar um cristal, um feixe de raios X se difrata, ou seja, espalha-se por todo o espaço. Além de confirmar o caráter ondulatório dos raios X, sua difração por cristais indicava que seu comprimento de onda teria a dimensão atômica, comprovando a natureza granular da matéria.

CONEXÃO

A NATUREZA GRANULAR DA MATÉRIA

Apesar das evidências que na virada do século XX se acumulavam em favor da hipótese atômica, muitos físicos e químicos ainda demonstravam ceticismo a seu respeito. Preferiam uma descrição dos fenômenos em termos de trocas de energia entre os objetos considerados em sua totalidade, sem a necessidade de suposições de partículas que não eram diretamente observáveis e sobre as quais não havia demonstração experimental convincente. Os estudos de Einstein, em 1905, e de Perrin, em 1908, sobre o movimento browniano mudariam essa história.

Em 1827, o botânico inglês Robert Brown observou que grãos microscópicos de pólen, em suspensão na água, agitavam-se ao acaso. De início atribuiu-se o fenômeno a uma “força vital” inerente à matéria

“viva”, orgânica. Depois se percebeu que partículas microscópicas de qualquer tipo, suspensas em um fluido, permaneciam em agitação sem cessar. Quase um século após a descoberta de Brown, o físico-químico francês Jean Perrin preparou suspensões em água de partículas minuciosamente escolhidas para que tivessem tamanhos e massas iguais e demonstrou que o movimento observado dependia apenas da temperatura do líquido e, portanto, da agitação de suas moléculas, tal qual Einstein havia deduzido matematicamente três anos antes.

Assim, um movimento de partículas que se podiam ver e medir somente teria explicação considerando a matéria formada por diminutos grãos, ou “átomos”, do grego, “sem divisão”, como Demócrito os chamara há mais de 2 mil anos.

Antes disso, outro surpreendente fenômeno do interior da matéria, ou de seus grãos, foi identificado. Sais de urânio, sem qualquer tipo de tubo de vácuo ou outro instrumento, emitiam, de forma espontânea, raios que deixavam marcas em chapas fotográficas, em ambientes completamente escuros ou em recipientes lacrados. A radiatividade natural se revelava e com ela outros elementos químicos, como o polônio e o rádio. Identificaram-se, então, três tipos de emissões, duas delas carregadas eletricamente, os raios alfa (α), positivos, e os raios beta (β), negativos, e os raios gama (γ), "neutros", que eram uma radiação semelhante aos raios X, porém bem mais penetrante (figura 12).

Mais tarde, descobriu-se que os raios β eram os já conhecidos elétrons e os raios α , íons positivos de átomos de hélio emitidos pela desintegração espontânea de materiais chamados radiativos. As partículas α possibilitaram um novo tipo de investigação da matéria, ao serem usadas como projéteis submicroscópicos. Em 1911, Ernest Rutherford fez uma experiência que mostrou que as partículas α atravessavam a matéria quase sem sofrer desvio algum, com exceção de algumas vezes em que ricocheteavam, como se tivessem batido em algo rígido (figura 13). Concluiu que as cargas positivas dos átomos concentravam quase toda a massa atômica e se localizavam em um núcleo central muito pequeno e compacto, da ordem de 10^{-15} m, 10 mil vezes menor que o diâmetro do átomo, da ordem de 10^{-10} m. Apesar de pequeno demais para ser visto, o átomo seria em sua maior parte vazio, contendo um núcleo positivo responsável pelos desvios das partículas α , que, como vimos, eram também positivas.

Além disso, o bombardeamento de diversos materiais com as partículas α tornou possível a desintegração artificial do átomo e do próprio núcleo. De indivisível que era quando de seu nascimento teórico, o átomo ganhava uma estrutura interna com "nuvens" de elétrons ao redor de seu núcleo, que explicam as propriedades químicas dos elementos da tabela periódica, e com prótons e nêutrons dentro do núcleo, que justificam a variedade de elementos.

Não foi preciso muito tempo para que novas surpresas se revelassem. Com o desenvolvimento de aceleradores de partículas cada vez mais potentes, o átomo se tornava ainda mais divisível e, por volta da metade do século XX, já se reconheciam mais de uma centena de partículas e antipartículas, elementares ou com suas próprias estruturas internas. A busca por regularidades entre essas e outras partículas que continuavam a ser descobertas levou à elaboração da atual teoria que procura explicar as quatro forças da natureza, como veremos mais adiante.

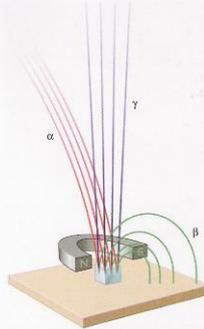


Figura 12
Na virada do século XIX para o XX, foram identificados três tipos de radiações emitidas espontaneamente por alguns elementos químicos: os raios α e β , com cargas opostas, e os raios γ , que, por serem eletricamente neutros, não mudam de trajetória na presença de campos elétricos e magnéticos.

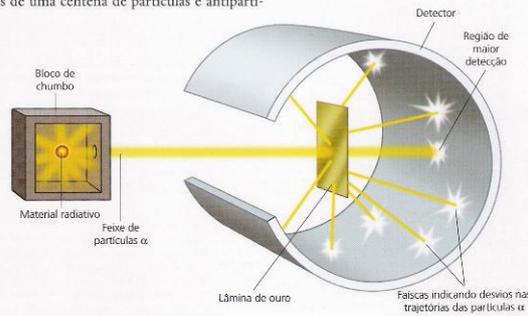


Figura 13
A experiência de Rutherford mostrou que o átomo tem um núcleo denso e positivo.

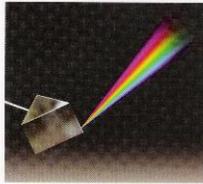
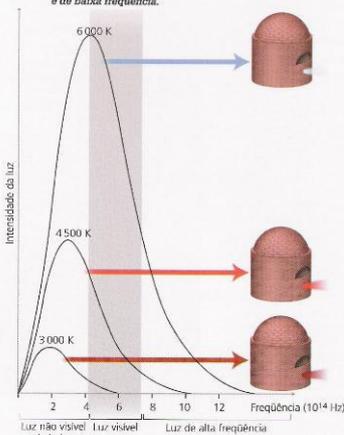


Figura 14

Ao passar por um prisma, a luz branca se dispersa em várias cores, assim como a luz do Sol, ao cruzar gotículas em suspensão, se dispersa no arco-íris.

Figura 15
Gráficos como este revelam uma forte relação entre temperatura e emissão de luz. Observe que para temperaturas elevadas, como 6 000 K, há uma grande emissão de todas as frequências de luz visível, resultando em uma composição de cores com tendência ao branco-azulado, enquanto para temperaturas menores, como 3 000 K, a cor predominante é o vermelho, pois a luz visível emitida é de baixa frequência.



ESCOLAS ASSOCIADAS
ENSINO MÉDIO

O átomo quântico

ENERGIA GRANULADA

As descobertas do elétron, dos raios X, das radiatividades α , β e γ e do núcleo atômico, denso e positivo, eram apenas as primeiras revelações de um panorama do mundo infinitesimal que se desvendava pelas radiações. Nas primeiras décadas do século XX, problemas inesperados puseram em dúvida teorias antes consideradas “definitivas”. No mundo submicroscópico, novidades muito estranhas se manifestariam: partículas que se moviam sem descrever trajetórias e ondas que colidiam como se fossem objetos.

GRÃOS DE ENERGIA

Quando um feixe de luz solar atravessa um prisma ou uma gota d’água, a luz branca se dispersa nas cores do arco-íris, do vermelho ao violeta, revelando o que se chama espectro solar (figura 14). O estudo das cores e de suas intensidades no espectro emitido por objetos incandescentes daria o primeiro golpe na visão clássica do mundo.

Por interesses práticos da metalurgia, faziam-se experimentos para medir com precisão a temperatura de fornos por meio da luz que vinha de seu interior. Os resultados mostravam que a cor e o brilho da luz emitida dependiam apenas da temperatura dos fornos e não do material de que eram feitos.

Enquanto o vermelho-amarelado predominava em aquecimentos moderados, a cor dominante em temperaturas elevadas era o branco-azulado. Em outras palavras, um forno produz seu “arco-íris”, o chamado espectro: quanto mais quente está o forno, mais azul e violeta contém (figura 15).

As teorias anteriores, clássicas, não acertavam a dose de azul e de violeta, problema que foi “resolvido matematicamente”, em 1900, por Max Planck, com uma hipótese muito estranha: a energia da luz emitida pelo interior dos fornos somente poderia ter certos valores múltiplos de uma unidade mínima (“quantum”) hf , sendo f a frequência da radiação. Em analogia ao dinheiro, que só existe como múltiplo do centavo, não havendo moedas de meio centavo, somente poderiam ocorrer trocas de energia com valores iguais a hf , $2hf$, $3hf$... O valor h ($\approx 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) ficou conhecido como constante de Planck.

Apesar da exatidão matemática da solução encontrada por Planck, nem mesmo ele conseguia formular uma interpretação física do fenômeno, que, no fundo, significava impor “degraus” nos valores energéticos, como se fossem grãos de energia. A energia era até então pensada como algo contínuo, sem caroços nem grãos, muito menos porções mínimas. É como se Planck houvesse descoberto que qualquer montanha fosse feita de “microdegraus” e que fosse impossível fazer uma subida contínua, mesmo usando cordas, pois “não existiria” a altura intermediária.

GRÃOS DE LUZ

Hoje, todos nós estamos acostumados a ver, diariamente, claras relações entre luz e fenômenos elétricos. Sabemos que cada ponto da tela da TV ou de um monitor de computador brilha porque foi atingido por um feixe de elétrons, assim como que a porta automática do centro comercial ou do elevador se abriu ao “nos detectar” porque simplesmente interrompeu-se um feixe de luz visível ou infravermelha. Isso tudo é trivial no início do século XXI, mas não era no começo do XX, quando nem se sabia que partículas de luz existiam e eram capazes de colidir com elétrons.

A solução “quântica” de Planck para o problema da relação entre temperatura e cor em corpos sinalizou para o fracionamento “discreto” da energia luminosa e das ondas eletromagnéticas em geral, mas não para seu caráter corpuscular. O efeito fotoelétrico, explicado por Einstein em 1905, foi a primeira interpretação de um fenômeno de interação entre elétrons e partículas de luz, tendo esse nome porque se trata da emissão de elétrons por placas metálicas quando atingidas por luz de frequência suficientemente alta (figura 16).

Utilizando a idéia de quantum de Planck, Einstein propôs que a luz se propaga pelo espaço como pacotes, ou fótons de energia, múltiplos de hf . Assim, a luz de baixa frequência, como a infravermelha, corresponde a fótons de baixa energia e a luz de alta frequência, como a ultravioleta, a fótons de alta energia. Quando um material é “bombardeado” com fótons de energia suficientemente alta, a luz arranca elétrons instantaneamente. A luz, acci-

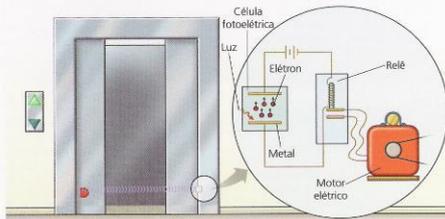


Figura 16
No efeito fotoelétrico, a luz arranca elétrons de placas metálicas e fecha um circuito elétrico que aciona um eletrolím (relé) e faz funcionar o motor elétrico da porta do elevador.

ELÉTRON-VOLT

O Projeto Auger (pronuncia-se ogê) é uma iniciativa científica internacional, com importante participação de pesquisadores brasileiros, que tem como objetivo aumentar nosso conhecimento sobre os raios cósmicos. Raios cósmicos são partículas subatômicas que, vindas de todas as direções e provavelmente até dos confins do Universo, bombardeiam constantemente a Terra. O gráfico ao lado mostra o fluxo (número de partículas por m^2 por segundo) que atinge a superfície

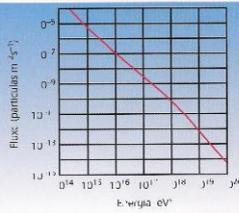
terrestre em função da energia da partícula, expressa em eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Considere a área da superfície terrestre $5,0 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$.
a) Quantas partículas com energia de 10^{18} eV atingem a Terra ao longo de um dia?
b) O raio cósmico mais energético já detectado atingiu a Terra em 1991. Sua energia era $3,0 \cdot 10^{20} \text{ eV}$. Compare essa energia com a energia cinética de uma bola de tênis de massa $0,060 \text{ kg}$ em um saque a 144 km/h . (Unicamp 2001, primeira fase.)

QUANTO VALE O QUANTUM DE ENERGIA?

Por sua própria definição, o valor de um quantum de energia depende da frequência da radiação emitida. Para uma luz azul de $6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, por exemplo, o quantum de energia vale
$$h \cdot f = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \frac{6 \cdot 10^{14}}{s} = 3,96 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

No fascículo *O mundo da energia*, vimos que para expressar grandes valores de energia é comum utilizar a unidade quilowatt-hora (kWh), que vale $3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$. Agora, no mundo do muito pequeno, passaremos a utilizar a unidade elétron-volt (eV), que corresponde à energia adquirida por um elétron acelerado por uma tensão de um volt e que vale $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Assim, a energia do quantum daquela luz azul valeria $2,5 \text{ eV}$. A própria constante de Planck pode ser expressa com o uso dessa unidade, resultando $h = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$.

Para se familiarizar com essa nova unidade e com valores de energia do mundo subatômico, descubra o valor, em J e em eV, dos quanta (quanta é o plural de quantum em latim) de energia correspondentes às seguintes radiações:
a) luz infravermelha de $1,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$;
b) luz vermelha de $4,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$;
c) luz ultravioleta de $2,5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$;
d) raio X de $4 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$;
e) raio γ de $2 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$.



ATIVIDADE 101

EM QUESTÃO

14

ATIVIDADES

QUAL LUZ ARRANCA ELÉTRONS DE QUE MATERIAL?

A energia mínima necessária para liberar um elétron por meio da incidência de luz, também chamada de "função trabalho", é uma característica de cada material. Para o tungstênio, por exemplo, o valor dessa energia é de 4,58 eV. Assim, para observar o efeito fotoelétrico no tungstênio, é preciso iluminá-lo com luz que tenha fótons com, no mínimo, essa energia, o que corresponde à luz ultravioleta de $1,1 \cdot 10^{15}$ Hz, pois:

$$E = hf \Rightarrow f = \frac{E}{h} = \frac{4,58 \text{ eV}}{4,1 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}} = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

Utilize os valores das energias mínimas de cada um dos materiais apresentados abaixo para descobrir com que luz ele deve ser iluminado para começar a emitir elétrons:

a) platina: $E_{\text{mínima}} = 6,35 \text{ eV}$;
 b) prata: $E_{\text{mínima}} = 4,74 \text{ eV}$;
 c) potássio: $E_{\text{mínima}} = 2,20 \text{ eV}$;
 d) célio: $E_{\text{mínima}} = 1,90 \text{ eV}$.

ta como onda, pode também ser percebida como constituída de partículas, ou grãos, que podem colidir com elétrons e arrancá-los de um material.

"ARCO-IRIS FATIADO" DOS GASES INCANDESCENTES

A idéia de Einstein de que a luz vem em grãos em determinadas energias serviu para resolver um mistério que perturbava muitos cientistas há vários anos. Se um gás qualquer for superaquecido a ponto de brilhar, como nas lâmpadas amarelas (de sódio) ou azuladas (de mercúrio) da iluminação pública, sua luz passada por um prisma tem seu espectro ("arco-iris") claramente "fatiado", ou seja, há linhas brilhantes separadas por faixas escuras (figura 17).

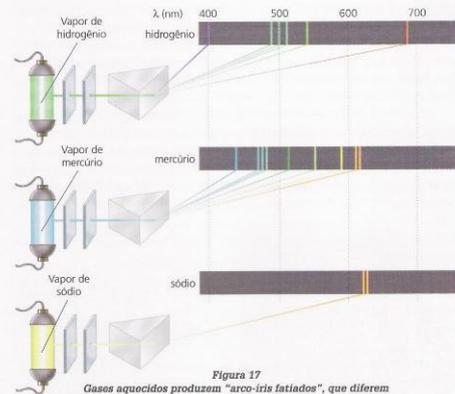


Figura 17
Gases aquecidos produzem "arco-iris fatiados", que diferem uns dos outros e revelam suas "identidades".

COMO FAZER

UM "ARCO-IRIS"

Você não precisa esperar cair chuva em um dia ensolarado para ver um arco-iris.



ESCOLAS ASSOCIADAS
ENSINO SUPERIOR

1. Em um dia ensolarado, utilize uma mangueira de jardim e produza sua própria "chuva", esguichando água para o alto de forma a deixar o ar repleto de gotículas de água. Quando a luz do Sol, composta, atravessar as gotas de água, você verá o efeito de sua separação nas cores do arco-íris. Perceba como as cores vão gradualmente mudando de uma para outra, sem uma clara distinção da fronteira que as separa. Isso é o que se chama de *espectro luminoso contínuo*.
2. Para ver um "arco-iris" diferente, "fatiado", você vai precisar de uma luminária de mesa com lâmpada fluorescente compacta e de um CD (ou um disco em formato DVD). Coloque uma embalagem cilíndrica furada na frente da lâmpada, de modo que um feixe de luz possa incidir no centro da face espelhada do CD, e posicione a lâmpada, o eixo do CD e seu olho em uma mesma linha, como mostra a figura ao lado. Perceba como, agora, as faixas coloridas são bem definidas, mudando abruptamente de uma para outra. Isso é o que se chama de *espectro luminoso discreto*.

A separação de cores do feixe incidente pelo prisma se deve ao fato de a refração produzir um desvio maior sobre a luz de maior frequência; assim, o que era um feixe único de cores combinadas se torna um feixe espalhado de diversos ângulos de saída para diferentes cores. O arco-íris é a mesma coisa, só que produzido pela refração em gotículas de água em suspensão, após a chuva. O mistério, que somente foi resolvido pela teoria quântica, é que o arco-íris tem um espectro contínuo de cores, mas um único gás aquecido produz um "arco-íris fatiado".

Conhecidos desde o século XIX, esses espectros descontínuos eram usados como uma técnica comum para a identificação de elementos químicos presentes em diversas substâncias. Já se sabia que cada substância tinha seu espectro característico, mas não havia uma explicação para o fenômeno da descontinuidade das linhas espectrais.

Utilizando a idéia dos grãos de energia quânticos, Niels Bohr propôs que um elétron, para perder energia, ao saltar entre as órbitas ao redor do núcleo, emitia um quantum de luz. **O átomo se assemelharia a um sistema planetário**, com elétrons girando ao redor do núcleo e com a própria energia

COMO SABER DO QUE É FEITA UMA ESTRELA?

A substância hélio tem esse nome, que é como se chama o Sol em grego, porque foi descoberta primeiramente no Sol e só mais tarde na Terra.

Sabendo que até hoje nunca ninguém foi ao Sol e que se tentar será evaporado, sem voltar para contar o que viu, pesquise como se descobriu hélio no Sol e, aliás, em qualquer outra estrela (ver também o fascículo *Os astros e o cosmo*).

ATIVIDADE 14

O ESPECTRO DO HIDROGÊNIO E OS ÁTOMOS DE RUTHERFORD E BOHR

No início do século XX, fizeram-se muitos estudos sobre os espectros dos elementos químicos. Como historiadores tentando decifrar hieróglifos, cientistas procuravam encontrar algum padrão que explicasse as linhas espectrais. A exemplo das "séries do hidrogênio", seqüências de linhas espectrais que apresentam um padrão comum (figura A).

O átomo pensado como um "sistema planetário" de elétrons circulando em torno de núcleos positivos, como propôs Rutherford, explicaria um espectro contínuo. O espectro discreto, "fatiado", teve uma primeira explicação dada por Bohr, que propôs órbitas "fixas".

De um estado de menor energia, E_1 , o elétron poderia saltar para órbitas exteriores de maior energia, E_2 , ao absorver a energia de um fóton. Ao retornar, o elétron perderia energia, emitindo um fóton de frequência proporcional à diferença de energia entre as órbitas: $hf = E_2 - E_1$. Bohr calculou que a energia de cada órbita valeria

$$E_n = -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2}, \text{ em que } n \text{ é o número da órbita.}$$

Assim, a energia do estado fundamental ($n = 1$) seria $E_1 = -13,6 \text{ eV}$, a do segundo nível de energia

$$E_2 = -\frac{13,6}{2^2} = -3,4 \text{ eV, a do terceiro}$$

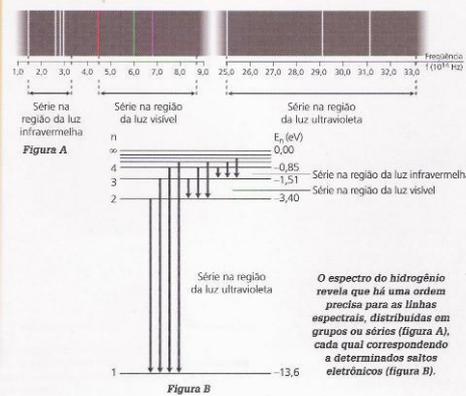
$$E_3 = -\frac{13,6}{3^2} = -1,51 \text{ eV, a do quarto}$$

$$E_4 = -\frac{13,6}{4^2} = -0,85 \text{ eV, e assim}$$

sucessivamente, cada vez menos negativo até chegar ao valor nulo, com o elétron escapando do átomo e podendo assumir qualquer valor de energia (figura B).

Apesar de ser um sucesso para a explicação de todas as séries espectrais do hidrogênio, o modelo atômico quântico de Bohr tinha de ser constantemente

"reajustado" para explicar o espectro de outros átomos com mais elétrons. Da órbita circular, determinada pelo número quântico principal n , como passou a ser chamado, derivaram-se órbitas elípticas com diferentes inclinações, dadas por novos números quânticos. Mais tarde, uma verdadeira teoria quântica seria formulada, descartando as idéias clássicas, de trajetórias de elétrons circulando em torno do núcleo.



CONEXÃO

EM QUESTÃO 3

NÍVEIS DE ENERGIA

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

do elétron no átomo sendo também quantizada, podendo ocupar apenas certas órbitas. A diferença de energia entre duas órbitas seria igual ao quantum hf da luz emitida ($\Delta E = hf$), quando elétrons pulassem de uma para outra. Saltos entre órbitas mais distantes corresponderiam a radiações de maior frequência. Acima de certos valores, já não seria mais luz visível, podendo ser de ultravioleta até raios X.

ONDAS QUE SÃO PROJÉTEIS E PROJÉTEIS QUE SÃO ONDAS

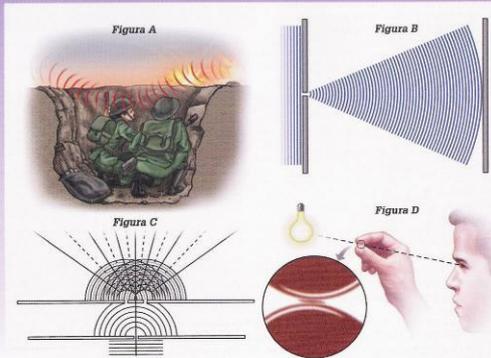
Como vimos, os penetrantes raios X já haviam sido descobertos bem antes de se ter idéia de que eram ondas eletromagnéticas da mesma natureza que a luz visível ou a ultravioleta. Em uma experiência em que raios X foram atirados contra cristais de quartzo, eles se desviaram, como a luz em geral faz nos processos chamados de difração e interferência. Foi então que se percebeu a natureza ondulatória dos raios X.

Sendo assim um tipo de luz, seria natural esperar que sua granulação quântica fosse verificada experimentalmente. De fato, descobriu-se que era possível arrancar elétrons de alguns materiais por meio da incidência de feixes de raios X, tal qual no efeito fotoelétrico. Mas, além disso, observava-se que, após a colisão do fóton de raio X com o elétron, outro fóton de menor energia surgia, em uma direção lateral, como se fosse uma bola desviada em uma tacada de bilhar, conservando a quantidade de movimento do sistema. Esse fenômeno, explicado em 1923 pelo físico norte-

ATIVIDADE 10 **DIFRAÇÃO E INTERFERÊNCIA**

Soldados enfileirados protegem-se contra tiros inimigos, mas não contra o estrondo dos tiros, pois o som, como todos os outros tipos de onda, contorna obstáculos e espalha-se por detrás deles (figura A). Esse espalhamento, do som ou da luz, chamado difração, também acontece quando a onda sonora, a onda de luz visível ou outra onda eletromagnética passa por uma fenda estreita e de largura próxima do valor do comprimento de onda, λ (figura B). Outro fenômeno ondulatório é a interferência, que ocorre quando duas ondas se encontram, ora se somando, ora se subtraindo. Se forem ondas de luz visível, o resultado é uma seqüência de regiões claras e escuras (figura C). Como a luz visível tem comprimento de onda muito pequeno, da ordem de 10^{-7} m, sua difração e interferência não são facilmente percebidas na maioria dos objetos com que lidamos em nosso cotidiano. Basta, no entanto, procurar pela fenda apropriada.

1. Através de uma estreita fenda formada entre seus dedos, olhe para a luz emitida por uma lâmpada e observe as franjas claras e escuras formadas pela interferência da luz que atravessa a fenda (figura D).
2. Use a criatividade para inventar outras maneiras de observar esse efeito, como olhar para uma lâmpada através do pano de um guarda-chuva ou através de fendas formadas entre duas folhas de papel sulfite ou duas lâminas de barbear.



americano Arthur Compton e, por isso, chamado efeito Compton, comprovava definitivamente que os grãos de luz eram "verdadeiras partículas", cuja energia e quantidade de movimento podiam ser medidas (figura 18). A luz passava a ter caráter dual, ora se comportando como onda, como nos efeitos de difração e interferência, ora como partícula, como no efeito fotoelétrico.

Se a luz visível, a ultravioleta e os raios X se comportam como projéteis, será que há parti-

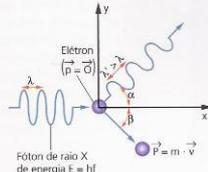


Figura 18
No efeito Compton, um fóton de raio X, com frequência f , atinge um elétron em repouso, resultando na emissão de outro fóton, de frequência $f' < f$, e no deslocamento do elétron. Juntos, o elétron em movimento e o fóton de menor frequência têm a mesma quantidade de movimento que o fóton original, revelando que grãos de luz podem se comportar como "verdadeiras partículas".

ATIVIDADE 9

FAÇA SUA PRÓPRIA ANÁLISE ESPECTRAL

As faixas coloridas que se formam quando iluminamos um CD, como observado no boxe de como fazer "Um arco-íris", são também um efeito da difração e interferência da luz. A superfície de um CD não é lisa como a de um espelho plano comum; em cada milímetro existem cerca de 600 sulcos com larguras da mesma ordem que o comprimento de onda da luz visível.

O CD opera normalmente em luz laser, coerente e de cor única (ver o fascículo *Comunicação e Informação*). No entanto, o efeito dos sulcos quando uma luz composta atinge o CD é de difratá-la e refleti-la. A interferência que a luz composta então sofre resulta do encontro de suas diferentes reflexões pelos diversos sulcos (figura A). Isso leva à separação de cores da luz, que pode ser

analisada para identificar a substância que emitiu a luz. É bem diferente, por exemplo, o padrão de cores que é formado ao iluminar um CD com a luz natural do Sol, com a luz de uma lâmpada de filamento incandescente de tungstênio ou com a luz de uma lâmpada fluorescente.

Assim, um CD pode ser utilizado como um "espectroscópio de rede", com efeito semelhante ao das análises físico-químicas feitas em laboratórios científicos com outros equipamentos, como prismas. Para radiações de alta frequência, como os raios X, as fendas devem ser tão estreitas quanto o diâmetro atômico, tornando-se necessário o uso de cristais, como o quartzo, formados por uma organização regular de átomos muito próximos entre si que fazem o papel dos sulcos da rede (figura B).

Utilizando um CD, faça sua própria análise espectral:

1. Coloque a face espelhada do CD sob a luz emitida por diversos tipos de lâmpada e procure identificar relações entre o padrão de cores formado e os materiais que compõem a lâmpada. Comece pelas lâmpadas encontradas facilmente em sua casa ou escola, como as incandescentes e fluorescentes, e, depois, amplie a experiência procurando por lâmpadas halógenas, muito utilizadas em decoração de ambientes por sua maior focalização, ou pelas de vapores de mercúrio e de sódio, encontradas em potentes refletores e na iluminação de vias públicas.
2. Para obter informações sobre a composição e funcionamento dos diversos tipos de lâmpada, faça uma pesquisa em sites de fabricantes de lâmpadas.

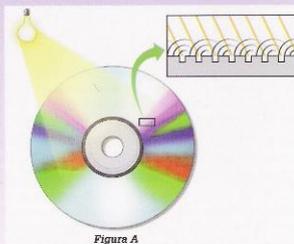


Figura A

Ao atingir um CD, a luz passa por fendas muito estreitas e se difrata, espalhando-se e sofrendo interferência ao ser refletida (figura A). Já os raios X precisam passar entre os átomos de um cristal para sofrerem difração (figura B).

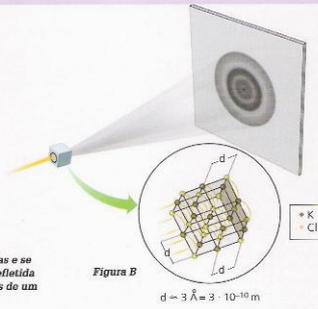


Figura B

$$d = 3 \text{ \AA} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

18

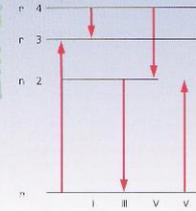
EM QUESTÃO

SALTOS ELETRÔNICOS

O diagrama abaixo mostra os níveis de energia (n) de um elétron em certo átomo. Qual das transições mostradas na figura representa a emissão de um fóton com o menor comprimento de onda?

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

(ITA 2000)



QUANTUM GRANULADO E QUANTUM ONDULADO

Um trecho da música *Quanta*, de Gilberto Gil, é reproduzido a seguir:

*"Fragmento infinitésimo,
Quase que apenas mental,
Quantum granulado no mel,
Quantum ondulado do sal,
Mel de urânio, sai de rádio
Qualquer coisa quase ideal"*.

As frases "Quantum granulado no mel" e "Quantum ondulado do sal" relacionam-se, na física, com:

- a) conservação de energia.
- b) conservação da quantidade de movimento.
- c) dualidade partícula-onda.
- d) princípio da causalidade.
- e) conservação do momento angular.

(ITA 2002)

EM QUESTÃO

culas que poderiam se comportar como ondas? Foi com convicção nas simetrias da natureza que, em 1924, o físico francês Louis De Broglie concebeu a hipótese de que partículas, como elétrons, não seriam tão diferentes de ondas, como a luz. Se a luz podia colidir com elétrons, como se fosse partícula, então elétrons deveriam difratar-se ao passar por fendas, orifícios, cristais e outros obstáculos, como ondas. Essa idéia seria confirmada três anos depois, com a observação da difração de elétrons ao atravessarem cristais de níquel.

UMA NOVA COMPREENSÃO DO MUNDO

Entre a descoberta do elétron, há mais de um século, e a observação de sua difração, 30 anos depois, uma intensa atividade científica mostrou que o domínio atômico não podia ser compreendido com a mesma teoria que explica o movimento de aviões ou bolas esportivas. Hoje, podemos analisar aquele período histórico como uma revolução científica, ao fim da qual surgia uma nova visão de mundo, a física quântica, que lida com objetos infinitesimais que se comportam de forma diferente daqueles que comumente observamos.

Em nosso dia-a-dia, estamos acostumados a tratar com coisas que se comportam como ondas, a exemplo das de som ou de rádio, ou como partículas, a exemplo de bolas esportivas, sem confundir uma coisa com a outra. Podemos até mesmo filmar bolas e rodar o filme novamente, parando na cena que quisermos para fazer o "tira-teima" e determinar a trajetória com exatidão e saber se a bola entrou no gol ou não, se tal jogador estava realmente impedido no momento do lançamento da bola e assim por diante. Em cada instante, objetos materiais clássicos, como bolas, possuem quantidades de movimento bem definidas que podem ser total ou parcialmente transferidas a outros objetos durante uma colisão.

Não é possível, no entanto, localizar uma onda sonora ou de rádio em determinado ponto do espaço, já que elas se espalham por todo o espaço. Ondas clássicas não transportam matéria, apenas energia, e são caracterizadas pela frequência de oscilação, f , e pelo comprimento de onda, λ . Em vez de colidirem, elas contornam obstáculos e podem se cruzar no espaço, continuando a se propagar após o encontro, com a mesma frequência e comprimento de onda que tinham originalmente.

Em processos no domínio atômico ou molecular, essa clara distinção entre onda e matéria deixa de existir, com **quantidades de movimento e comprimentos de onda sendo associados tanto a radiações como a partículas**, dependendo do fenômeno observado: nos efeitos fotoelétrico e Compton, grãos de luz chocam-se contra elétrons, transferindo-lhes sua quantidade de movimento, enquanto, ao passarem por cristais, onde as "fendas" são as distâncias entre os átomos, elétrons sofrem difração.

Quanto maior a frequência da radiação, mais perceptível será seu caráter granular e maior sua capacidade de colidir com a matéria, pois seus fótons colidirão com maior intensidade contra átomos do material atingido. Enquanto você lê este texto, ondas de rádio atravessam este fascículo e seu próprio corpo sem causar nenhum dano conhecido, mas isso não seria tão tranquilo se essas ondas fossem de raios X. Radiologistas e dentistas se protegem atrás de portas de chumbo ao tirarem radiografias para evitar a exposição a doses excessivas, que podem causar câncer, pois

as "pancadas" dos raios X são capazes de quebrar ligações químicas da informação genética das células vivas.

Assim como ondas de alta frequência, como os raios X, colidem como se fossem partículas, partículas muito pequenas, como elétrons, difratam como ondas. Seu comprimento de onda é muito pequeno, por isso só difratam no domínio atômico ou molecular, como no interior de cristais. Para objetos maiores, como balas ou bolas, o caráter ondulatório é menos perceptível, uma vez que seu comprimento de onda e a fenda por onde teriam de passar para se observar sua difração seriam muito menores que os objetos (figura 19).

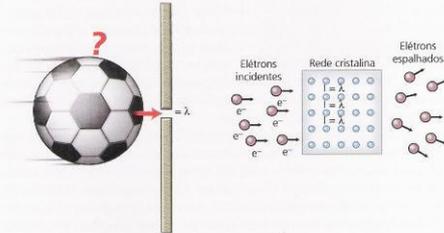


Figura 19
Ao passarem entre átomos de um cristal, elétrons se difratam, como ondas, efeito que só ocorreria com uma bola se ela passasse por uma fenda muito menor que seu diâmetro.

ATIVIDADE 10

RECUOS ATÔMICOS E FOGUETES FOTÔNICOS

No fascículo *Transportes, esportes e outros movimentos*, você aprendeu que, de acordo com o princípio da conservação da quantidade de movimento, ao disparar um projétil, uma arma de fogo recua, com o mesmo valor da quantidade de movimento transferida ao projétil.

1. Explique por que e como esse mesmo efeito deveria ocorrer, quando um fóton é emitido por um átomo:

- a) Desenvolva sua argumentação mostrando por que o átomo deve recuar (conservação da quantidade de movimento).
- b) Mostre que, se esse recuo leva parte da energia, a energia ganha pelo fóton é menor do que a diferença de energia entre os níveis (pense na conservação da energia e veja o boxe de

conexão "O espectro do hidrogênio e os átomos de Rutherford e Bohr").

2. Calcule a energia cinética ganha por um átomo, de massa m , que tenha emitido um fóton, com frequência f , e que, portanto, tenha recuado com quantidade de movimento mv (átomo) = $\frac{hf}{c}$ (fóton).

Somando a energia cinética de recuo com hf , você pode calcular a real diferença de energia entre os níveis envolvidos.

3. Se um átomo recua ao emitir fótons, um espelho deve recuar ao refletir luz. Discuta, então, a possibilidade da existência, no futuro, de viagens intergalácticas feitas com foguetes fotônicos, movidos por baterias nucleares ou, quem sabe, por "ventos" solares e de outras estrelas, captados por "velas" espelhadas.

IMPACTO DE ONDAS E DIFRAÇÃO DE PARTICULAS

Na discussão sobre o efeito fotoelétrico, vimos como fótons de luz visível ou ultravioleta, com energia de apenas algumas unidades de elétrons-volts, podem arrancar elétrons de um metal. Esse comportamento corpuscular da luz é ainda mais nítido para raios X, com fótons de milhares de elétrons-volts (keV), e raios γ , com energia de milhões de elétrons-volts (MeV). Os impactos dessas radiações podem causar mudanças irreparáveis na estrutura de células de tecido vivo e iniciar um tumor cancerígeno.

Assim, quanto maior a frequência, f , da radiação, maior seu poder de penetração, pois maior é sua quantidade de movimento, p . Essa relação foi expressa matematicamente pela teoria da relatividade de Einstein.

A famosa expressão da equivalência massa-energia, $E = mc^2$ (ver também o fascículo *Os astros e o cosmo*), é parte da expressão geral $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$. No caso da luz, cujos fótons não têm massa, ou seja, $m_0 = 0$, vê-se que:

$$\begin{aligned} E &= pc \quad \Rightarrow \quad pc = hf \Rightarrow p = \frac{hf}{c} \\ E &= hf \end{aligned}$$

Ou, escrevendo em termos do comprimento de onda, $p = \frac{h}{\lambda}$.

Assim, fica claro que, quanto maior a frequência (nos raios X, por exemplo), maior a quantidade de movimento ou a capacidade de interagir destrutivamente com ligações químicas ou de arrancar elétrons de metais.

A expressão $p = \frac{h}{\lambda}$ vale, também, para partículas e explica por que um elétron pode sofrer difração, como se fosse uma onda, enquanto pedras e bolas de futebol não. Veja alguns exemplos:

Elétron com $m = 9 \cdot 10^{-31}$ kg e $v = 2 \cdot 10^6$ m/s; $p = 18 \cdot 10^{-26}$ kg · m/s \Rightarrow
 $\Rightarrow \lambda = 3,7 \cdot 10^{-10}$ m, mesma ordem de grandeza que o diâmetro de um átomo, razão pela qual sua difração é notada quando passa entre átomos de um cristal.

Bola de futebol com $m = 0,4$ kg e $v = 20$ m/s; $p = 8$ kg · m/s \Rightarrow
 $\Rightarrow \lambda = 8,3 \cdot 10^{-26}$ m, valor desprezível diante das dimensões da bola; para sofrer difração, a bola teria de passar por uma fenda bem menor que o diâmetro de um núcleo atômico!

CONEXÃO



Figura 20
Cada estado quântico corresponde a uma "nuvem eletrônica"; quanto mais densa for a nuvem, maior a probabilidade de ela conter um elétron.

ESCOLAS ASSOCIADAS
ENSINO BÁSICO

A dualidade onda-partícula de elétrons e fótons dá uma boa idéia do universo quântico nos domínios dos átomos e moléculas, em que efeitos contrários se complementam e o observador interfere naquilo que observa, pois, para observar, é preciso iluminar e a luz colide com o que se observa. A dualidade pode ser sintetizada em um mote: os objetos quânticos, como a luz ou os elétrons, se movem como se fossem ondas, mas colidem como se fossem partículas.

Nos tubos de imagem das TVs, elétrons impulsionados por milhares de volts atingem a tela nos pontos previstos para a composição das imagens. No entanto, se quiséssemos observar o trajeto de um desses elétrons, a tentativa seria frustrante, pois teríamos de iluminá-lo, atingindo-o com fótons de luz que desviariam o elétron do percurso original ou lhe causariam um espalhamento por difração e ele não chegaria ao mesmo ponto da tela. Efeito semelhante aconteceria se, em seu trajeto, o elétron encontrasse uma fenda, por onde tivesse de passar para termos certeza de seu trajeto. Quanto mais fina a fenda, mais precisamente saberíamos por onde o elétron passou, mas perderíamos a idéia de sua direção, pois, outra vez, ele se desviaria por difração.

A mesma dificuldade em saber "por onde passou o elétron que atingiu um ponto da tela" teríamos se quiséssemos saber "por onde passou o fóton que marcou um ponto negro em uma fotografia". A luz caminhava como onda, sem trajetória identificável, mas atingiu certa molécula do composto de prata para aí impressionar o filme.

Elétrons, luz e todos os demais objetos do "mundo quântico" não podem ser observados como projéteis do "mundo clássico". A limitação nas tentativas de observação foi expressa por Werner Heisenberg, em 1927, na forma de um "princípio de incerteza": quanto mais preciso for o conhecimento de "por onde passa", menos preciso é o conhecimento de "em que direção vai". O produto das "incertezas" é sempre maior que a constante h , de Planck.

Se não é possível determinar a trajetória dos objetos quânticos, como podemos saber que os elétrons, como no modelo de átomo proposto por Bohr, estão percorrendo órbitas circulares ou elípticas de raios precisos? A resposta é simples e direta: não podemos.

O modelo de Bohr, que "explicava" relativamente bem o átomo de hidrogênio, reproduzindo com precisão as energias de seu espectro de radiação, foi substituído por uma nova teoria quântica da matéria, formulada pelo alemão Heisenberg (o mesmo da "incerteza") e seu conterrâneo, Erwin Schrödinger.

Na teoria quântica, como hoje aceita, não se fala mais de "órbitas de elétrons em torno de núcleos", mas de "estados quânticos". A cada estado correspondem uma "energia", um "raio médio" e outros "números quânticos", sem pretender que essa configuração seja de elétrons planetários, mas sim de uma presença difusa: no lugar de "elétron", vai-se falar de "nuvem eletrônica" e, quanto mais densa for a nuvem em um ponto, maior a probabilidade de um elétron ser aí encontrado (figura 20).

Como não há uma contínua variedade de estados, mas apenas determinados estados, as transições de um estado quântico para outro são extremamente precisas, correspondendo à absorção ou emissão de determinado tipo de fóton (figura 21).

PROCESSOS QUÍMICOS E TABELA PERIÓDICA

Reconhecemos hoje a existência de cerca de uma centena de elementos químicos na natureza, quantidade bem mais ampla do que os quatro "elementos" propostos por Aristóteles - terra, ar, fogo e água - há mais de 2 mil anos. De qualquer forma, não deixa de ser notável que apenas algumas dezenas de elementos têm origem a um mundo tão diverso em cores, cheiros, sabores e outras qualidades, fato que fica ainda mais intrigante pelas semelhanças químicas e físicas aprendidas por alguns desses materiais.

Os chamados gases nobres, por exemplo, como o hélio e o neônio, dificilmente formam compostos químicos com outros elementos, ao passo que os metais alcalinos, como o sódio e o potássio, são altamente reagentes, formando compostos bastante estáveis. Um exemplo é o cloreto de sódio (NaCl), o popular sal de cozinha, em que o sódio se combina com o cloro. Também bastante estável é o fluoreto de potássio (KF), composto formado entre o potássio e o flúor, outro membro da "família" do cloro. Comparações como essas levaram Mendeleiev, quando ainda se conheciam apenas 60 elementos, a elaborar uma tabela em que as colunas agrupavam elementos de propriedades físico-químicas semelhantes e as linhas eram preenchidas na ordem crescente da massa atômica.

Com a descoberta do núcleo atômico, compreendeu-se que um elemento químico é uma substância que consiste de átomos com a mesma carga elétrica nuclear, dada pelo número de prótons no núcleo, cujo valor passou a ser denominado número atômico. Assim, na moderna classificação periódica dos elementos, as linhas, chamadas de períodos, são preenchidas pelos elementos químicos ordenados por seu número atômico, reproduzindo a descontinuidade do mundo subatômico descrita no final do tópico anterior. Um próton a mais no núcleo faz do sódio, altamente reagente, um elemento abruptamente diferente do neônio, um gás nobre. Outro salto se dá para o flúor, de número atômico uma unidade menor que o neônio (ver também o fascículo *O outro lado da energia*, p. 36).

Os gases nobres são pouco ativos porque é difícil arrancar-lhes um elétron, diferentemente dos metais alcalinos, que requerem pouca energia para liberar o elétron mais externo (figura 22).

Por causa dessa diferença, os metais alcalinos e os gases nobres ocupam extremidades opostas nos períodos da tabela periódica, que possui uma curiosa seqüência numérica de elementos químicos. São dois elementos no primeiro período, oito no segundo e no terceiro, 18 no quarto e no quinto e 32 no sexto; o sétimo período ainda está

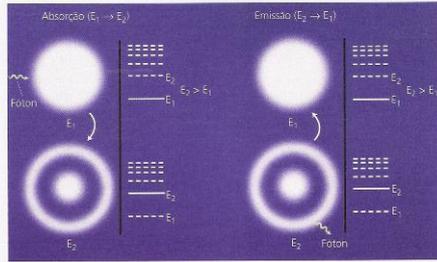


Figura 21
Ao absorver um fóton, um elétron salta para um estado quântico de maior energia (figura A). Ao retornar para o estado quântico de menor energia, ele emite um fóton (figura B).

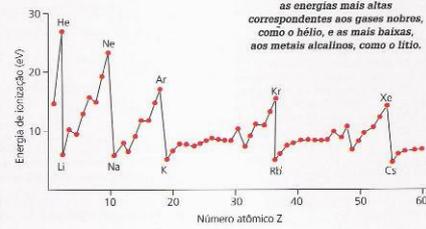


Figura 22
O gráfico abaixo mostra a energia necessária para arrancar o elétron mais externo de um átomo. Perceba como há uma periodicidade, com altos e baixos se sucedendo, sendo as energias mais altas correspondentes aos gases nobres, como o hélio, e as mais baixas, aos metais alcalinos, como o lítio.

CONEXÃO

DISTRIBUIÇÃO ELETRÔNICA

O fascículo *O outro lado da energia* contém um material importante para complementar o estudo sobre distribuição eletrônica dos elementos químicos.

Observe a figura 31, na página 35, que apresenta um gráfico e uma tabela sobre esse tema, e leia (ou releia) com atenção o *boxe de conexão* "Distribuição eletrônica" (p. 36). É importante lembrar que qualquer estudo sobre os elementos químicos só ficará completo após a análise da tabela periódica, que também faz parte desse fascículo (p. 37 e tabelas 16 e 17, p. 38).

Essa relação entre a física e a química é uma questão para sua reflexão: o conhecimento humano nem sempre poderá ser colocado em caixas estanques. Procure encontrar outras possibilidades para que seu estudo seja uma ponte entre as diversas áreas do conhecimento.

ELÉTRONS QUE SE EVITAM... E FÓTONS QUE SE IMITAM!

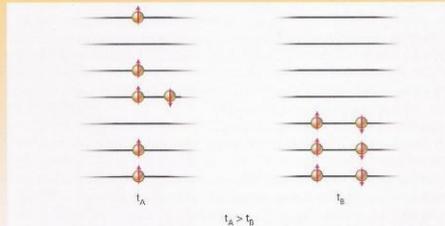
Há muito tempo se sabe que o calor está associado ao movimento e que, quanto menor a temperatura, menor a energia de um sistema de partículas. Se isso valesse para o átomo, em temperaturas muito baixas, todos os elétrons iriam para o nível de mais baixa energia, o que só é verificado para o átomo de hidrogênio, que tem apenas um elétron. Nos demais átomos, a coisa é diferente: o sódio, por exemplo, nunca tem seus 11 elétrons no nível mais baixo; em seu estado quântico de menor energia possível, há dois elétrons no primeiro nível de energia, oito no segundo e um no terceiro, ou seja, os elétrons continuam ocupando níveis mais altos e não despenham para o nível fundamental, mesmo quando estiver muito frio.

Quanto maior o número de elétrons em um átomo, mais complexa é sua configuração quântica, que se preserva até a baixas temperaturas. Em 1925, o físico austríaco Wolfgang Pauli propôs um "princípio da exclusão", que impede que mais de um elétron de um sistema esteja no mesmo estado quântico (mesmos números quânticos). Assim, quando o sistema esfria, os elétrons "se distribuem" nos níveis possíveis, mas não se acumulam no nível mais baixo.

O que se sabe hoje é que há duas grandes famílias de partículas, os *férmions*, que, como os elétrons, se evitam, e os *bósons*, que, como os fótons, se imitam. Se houver um elétron em um estado, não pode haver outro, como mostra a figura abaixo, mas, quanto mais fótons houver em certo estado, mais fótons "querem" ir para tal estado. A exclusão dos elétrons de Pauli resulta na complexa arquitetura atômica; a "emulação" dos fótons, nos

lasers (ver também o fascículo *Comunicação e Informação*).

Se não fosse essa característica dos elétrons, as propriedades químicas dependeriam muito fortemente da temperatura e, também, seria difícil classificar as substâncias por seu espectro óptico. Tudo isso é parte do notável universo quântico, que sempre esteve ao alcance de nosso olhar e de nosso olfato, mas que até um século atrás escapava a nossa mente.



Quando um sistema passa de uma temperatura mais quente, t_A , para uma mais fria, t_B , os elétrons se reorganizam, ocupando estados quânticos de menor energia, com a proibição, no entanto, de que fiquem no mesmo estado quântico; como deve haver, no mínimo, diferença entre seus "spins", número quântico que pode ser relacionado à rotação do elétron em torno de seu próprio eixo, há, no máximo, dois elétrons em cada nível.

gênios, como o flúor e o cloro, valência -1, o que explica a estabilidade do sal de cozinha (NaCl). Esse tipo de ligação química é denominada iônica, com os dois átomos tomando-se íons - cátion, positivo, para aquele que perdeu elétrons, e ânion, negativo, para o que os ganhou. Como cargas elétricas opostas se atraem, tal ligação é muito forte, com os átomos ficando bastante próximos.

É claro que a ligação iônica não esclarece a existência de moléculas formadas por átomos de um mesmo elemento químico, como o gás oxigênio (O₂). Como os dois átomos têm a mesma tendência de ganhar elétrons, com valência -2, ocorre um compartilhamento de dois elétrons da última camada de cada um, de modo que ambos passam a ter simultaneamente preenchida sua última camada. É também dessa maneira que um átomo de oxigênio se associa a dois átomos de hidrogênio para formar a molécula da água (H₂O) ou uma série de ácidos, como o clorídrico (HCl). Como o hidrogênio possui apenas um elétron, a situação energética mais favorável é completar seu primeiro nível de energia, compartilhando um segundo elétron com outro átomo.

Em algumas situações, o hidrogênio pode também atuar como "ponte" entre átomos ou moléculas, compartilhando o próprio núcleo de forma parecida com a ligação covalente. Entre várias outras situações, as ligações de hidrogênio cumprem importante papel na estrutura do gelo e da dupla hélice do DNA. Outro tipo de atração, bem mais fraca, existente entre átomos e moléculas é a chamada ligação de Van der Waals, que tem importância fundamental na coesão entre os átomos de gases nobres quando estes se encontram liquefeitos ou solidificados.

Há, ainda, um tipo de ligação química que permite a estabilidade das substâncias metálicas. Um pedaço de metal é constituído de cristais e cada cristal é um agregado ordenado de muitos e muitos átomos geralmente com valências +1 ou +2. Por estarem fracamente ligados a seus núcleos, elétrons da última camada de cada átomo ganham grande liberdade de movimentação dentro dos cristais e passam a constituir uma nuvem de elétrons compartilhada pelos átomos do metal que, ao perderem elétrons, tornam-se íons cátions.

Como dissemos há pouco, o que define um elemento químico é a carga elétrica de seu núcleo, ou seja, seu número de prótons. Apesar disso, o núcleo não toma parte em reações químicas, cujo domínio é a eletrosfera e cujas regras são as da teoria quântica, que também tratam da emissão e absorção de radiação térmica e luminosa pelos átomos. No entanto, muitas das radiações de que se falou no início deste fascículo, como os raios α , β e γ , não estão relacionadas com simples reacomodações da eletrosfera. Pois é, para compreender essas outras radiações, é necessário conhecer a estrutura do núcleo atômico, como veremos a seguir.

As radiações, o núcleo atômico e suas partículas

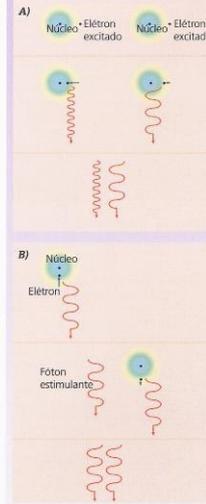
AS RADIAÇÕES NUCLEARES E A CONSTITUIÇÃO DO NÚCLEO

Como vimos, o interior da matéria no domínio atômico, inacessível ao toque e ao olhar humano, é percebido e analisado por meio de radiações, luminosas ou não visíveis, que os átomos emitem, refletem ou absorvem. A descoberta do núcleo atômico e de suas partículas também foi resultado da detecção e interpretação de radiações - nesse caso, de radiações nucleares.

O LASER E A ASSOCIATIVIDADE ENTRE FÓTONS IGUAIS

A figura abaixo, extraída do fascículo *Comunicação e Informação*, representa duas formas diferentes de emissão de luz, a espontânea (figura A), característica da luz monocromática comum, e a estimulada (figura B), que dá origem à luz *laser*, ou seja, à emissão luminosa induzida de luz coerente.

Identifique na figura o momento em que é essencial, para o funcionamento do *laser*, a qualidade "associativa ou imitativa" dos fótons, apresentada no box de conexão "Elétrons que se evitam... e fótons que se imitam!".



A) Luz monocromática comum: os fótons são emitidos espontaneamente pelos átomos e não apresentam coerência.
B) Laser: os fótons são emitidos pelo estímulo de outro fóton, mostrando-se coerentes.

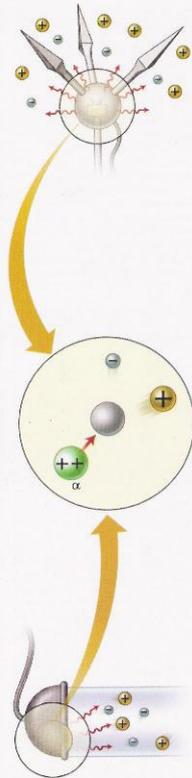


Figura 23
Algumas lâmpadas fluorescentes e certos pára-raios fazem uso de misturas radiativas que ionizam, respectivamente, os gases internos e a atmosfera, para um funcionamento mais eficaz.

O que tornou um pouco mais complexa a compreensão da estrutura nuclear foi a natureza diferente das três radiações emitidas pelos núcleos: além dos raios gama, constituídos de ondas eletromagnéticas, as alfas e betas eram verdadeiros projéteis, providos de massa e carga. As radiações alfa, beta e gama, denominadas pelas letras gregas na ordem em que foram descobertas, foram chamadas ionizantes, já que eram capazes de ionizar gases a sua passagem (figura 23). Ao fim do século XIX, quando Marie Sklodowska Curie e Henri Becquerel perceberam essas radiações como emanções de certas substâncias químicas radiativas, não se sabia que eram radiações nucleares, pois nem se conheciam bem os átomos, quanto menos seus núcleos.

A existência dos núcleos compactos e positivos no centro dos átomos, percebida por Ernst Rutherford em 1911, foi apenas o início de uma investigação que levou décadas para começar a revelar como são os constituintes do núcleo. Primeiro se descobriram os prótons, cerca de 2 mil vezes mais pesados que os elétrons, com carga idêntica à destes, mas de sinal oposto, ou seja, positivo. Depois foram descobertos os nêutrons, de massa semelhante à dos prótons, mas sem carga, e isso permitiu uma melhor compreensão da constituição nuclear. As partículas beta foram logo reconhecidas como elétrons em alta velocidade e os raios gama, como radiação eletromagnética de alta frequência, mas só com a descoberta de prótons e nêutrons as partículas alfa puderam ser compreendidas como constituídas de um par de prótons e um de nêutrons (tabela 1).

TABELA 1: PARTÍCULAS E RADIAÇÕES NUCLEARES

	CARGA (C)*	MASSA**
Elétron	-e	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \approx 0,0005 \text{ u}$
Próton	+e	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 1,008 \text{ u}$
Nêutron	0	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 1,009 \text{ u}$
Alfa***	+2e	$6,645 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 4,003 \text{ u}$
Beta	-e	A mesma do elétron
Gama	Fóton de alta energia, ou seja, "pacote" de radiação eletromagnética de alta frequência.	

* C é o símbolo da unidade coulomb, utilizada no Sistema Internacional de Unidades para medidas de cargas elétricas. É comum expressar cargas de elétrons, prótons e outras partículas pela carga elementar, e, que vale $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

** u é o símbolo de unidade de massa atômica, que vale aproximadamente $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

*** Formada por dois prótons e dois nêutrons, igual ao núcleo do átomo de hélio.

Ao emitir uma alfa, uma substância se transforma em outra com número atômico (ou de carga) duas unidades menor; ao emitir uma beta, uma substância sofre o acréscimo de uma unidade em seu número atômico. Não demorou muito para se perceber que as alfas são idênticas ao núcleo do elemento químico hélio. Mais simples que o núcleo do hélio, aliás, são os núcleos do hidrogênio e de seu isótopo com o dobro de seu número de massa, o deutério. O núcleo do hidrogênio é constituído de apenas um próton e o do deutério, de um nêutron e um próton. Curiosamente, há um isótopo do hélio com número de massa três, ou seja, com um nêutron e dois prótons, assim como existe um isótopo artificial do hidrogênio, o trítio, também com número de massa três, com um próton e dois nêutrons, mas que é muito instável, ou seja, se desintegra rapidamente.

O termo "isótopo" tem origem grega: *iso* (mesmo) + *topos* (lugar), que indica o fato de que diferentes isótopos de um mesmo elemento estão no

mesmo lugar na tabela dos elementos químicos, pois, tendo o mesmo número de prótons no núcleo, possuem o mesmo número de elétrons na eletrosfera e, assim, as mesmas propriedades químicas. Os prótons permitiram interpretar o número de cargas, ou o número atômico, dos elementos químicos, mas só com a descoberta dos nêutrons foi possível interpretar a diferença de massa dos isótopos e a **diferença entre o número de massa, a massa atômica e o número atômico**.

Claro que com tantos prótons tão juntos qualquer núcleo tenderia a explodir se não houvesse alguma força atrativa que compensasse a repulsão elétrica. Essa força de atração intensa é chamada de interação nuclear forte (figura 24). Ainda que, por seu curto alcance, atue apenas no interior do núcleo, a interação forte age entre todos os pares, ou seja, entre nêutron-nêutron, nêutron-próton e próton-próton. Nos núcleos maiores, a estabilidade depende, de forma complexa, da relação entre o número de prótons e o de nêutrons. Assim, enquanto elementos com carga nuclear menor que a do urânio (número atômico 92) apresentam pelo menos uma configuração estável, isótopos de elementos de maior carga nuclear são geralmente instáveis.

Antes de se descobrirem os nêutrons, acreditava-se que a diferença de massa entre isótopos correspondia à existência de prótons a mais, cujas cargas seriam compensadas por elétrons "submersos" no núcleo. Com os nêutrons, não era mais preciso imaginar a existência de elétrons no núcleo, mas então surgia outra dúvida: se não há elétrons no núcleo, como é possível a radiação beta, ou seja, a emissão de elétrons pelo núcleo? Foi Enrico Fermi (figura 25) quem resolveu essa questão, apresentando uma teoria segundo a qual um nêutron pode se converter em próton, emitindo um elétron. Como a interação forte não conseguia explicar essa conversão, foi preciso introduzir uma nova força nuclear, denominada interação nuclear fraca, ou simplesmente interação fraca. Curiosamente, Fermi teve dificuldade, em sua teoria, em acertar as contas com algumas leis de conservação, como a da quantidade de movimento, a da energia e outras, e teve de imaginar a presença de uma partícula leve e neutra que não se observava, o neutrino, "pequeno

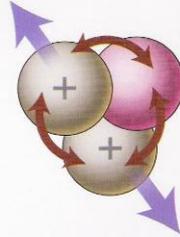


Figura 24 Nos núcleos atômicos, as interações nucleares fortes compoem a repulsão elétrica entre os prótons.



Figura 25 Enrico Fermi.

EQUIVALÊNCIA ENTRE MASSA E ENERGIA NAS REAÇÕES NUCLEARES

O número atômico, Z, definido pelo número de prótons, e o número de massa, A, igual à soma do número de prótons e nêutrons, de um elemento químico ou de seu isótopo costumam ser representados por A_ZX . Assim, 1_1H representa o hidrogênio; 2_1H e 3_1H , seus isótopos, deutério e trítio; 4_2He , o hélio e seu isótopo, sendo que 4_2He é também a partícula alfa.

Usando essa notação, a representação das reações nucleares pode ser feita de forma semelhante à das reações químicas. Veja dois exemplos:

- Transformação do urânio 238 em tório 234, por emissão alfa: ${}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^4_2He$
- Transformação do tório 234 em protactínio 234, por emissão beta: ${}^{234}_{90}Th \rightarrow {}^{234}_{91}Pa + e^-$

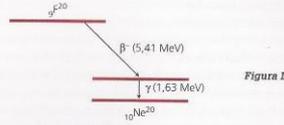
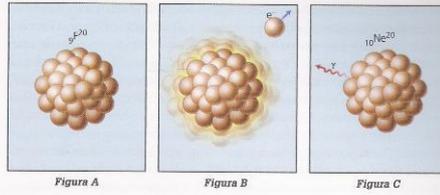
Nessas reações, a carga elétrica e o total de prótons e nêutrons sempre se conservam, assim como a energia e a quantidade de movimento do sistema. No entanto, diferentemente das reações químicas, que envolvem apenas trocas e compartilhamentos de elétrons, nas reações nucleares não há conservação da massa, já que há uma equivalência entre massa e energia, dada pela fórmula $E = mc^2$.

De fato, no exemplo de emissão alfa dado acima, a massa atômica do urânio é 238,051 u, maior do que a soma das massas atômicas do tório, 234,044 u, e do hélio, 4,003 u. A pequena diferença de massa, 0,004 u, convertida em energia, resulta em aproximadamente 4 MeV*, ou seja, 4 milhões de elétrons-volts, quantidade de energia nada desprezível que confere à partícula alfa emitida uma boa dose de energia cinética e, portanto, grande velocidade.

A equivalência entre massa e energia explica também a diferença entre os conceitos de número de massa e de massa atômica dos elementos químicos. O núcleo do urânio 238, por exemplo, possui 92 prótons e 146 nêutrons. Separadas, essas partículas teriam massa total de aproximadamente 240 u, mas, contidas pelas forças nucleares, formam um núcleo com pouco mais de 238 u. Onde foi parar a diferença de quase 2 u? Resposta: na energia de ligação do núcleo, ou seja, para desintegrar por completo o núcleo do urânio 238, separando todos os seus prótons e nêutrons, seria necessário fornecer uma energia correspondente a 2 unidades de massa atômica ou quase 2 000 MeV. * Como $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s e $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J, uma unidade de massa atômica equivale a $1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ eV} = 930 \text{ MeV}$, $1,6 \cdot 10^{-19}$.

CONEXÃO

Figura 26
Na transformação do flúor (figura A) em néon, por emissão beta, há um estágio intermediário de excitação (figura B). A estabilidade do núcleo é reacquirida com a emissão de radiação gama (figura C). O processo completo pode ser representado por meio de um esquema (figura D).



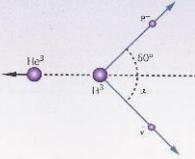
DECAIMENTO BETA

A existência do neutrino e do antineutrino foi proposta em 1930 por Wolfgang Pauli, que aplicou as leis de conservação de quantidade de movimento e energia ao processo de desintegração β.

O esquema abaixo ilustra esse processo para um núcleo de trítio, ${}^3\text{H}$ (um isótopo do hidrogênio), que se transforma em um núcleo de hélio, ${}^3\text{He}$, mais um elétron, e^- , e um antineutrino, $\bar{\nu}$. O núcleo de trítio encontra-se inicialmente em repouso. Após a desintegração, o núcleo de hélio possui uma quantidade de movimento com módulo de $12 \cdot 10^{-24}$ kg m/s e o elétron sai em uma trajetória fazendo um ângulo de 60° com o eixo horizontal e uma quantidade de movimento de módulo $6,0 \cdot 10^{-24}$ kg m/s.

a) O ângulo α que a trajetória do antineutrino faz com o eixo horizontal é de 30° . Determine o módulo da quantidade de movimento do antineutrino.
b) Qual é a velocidade do núcleo de hélio após a desintegração? A massa do núcleo de hélio é $5,0 \cdot 10^{-27}$ kg.
(Unicamp 2002, segunda fase.)

Sugestão: verifique no fascículo Transportes, esportes e outros movimentos (p. 16) que a quantidade de movimento de um sistema é uma grandeza vetorial, devendo ser conservada tanto em intensidade quanto em direção e sentido.



ESCOLAS ASSOCIADAS
ENSINO MÉDIO

nêutron” em italiano, que já havia sido prevista por Wolfgang Pauli e cuja existência só foi detectada muitos anos depois. Na realidade, a emissão beta revelou ter outra modalidade, em que um próton se transforma em nêutron, emitindo um “elêtron positivo”, o pósitron, e o neutrino proposto por Pauli e Fermi revelou-se um antineutrino, o que tem a ver com as antipartículas, que serão mencionadas adiante.

Foi sendo resolvido assim, aos poucos, o “quebra-cabeça” da constituição nuclear e de sua radiatividade. Compreendidos os decaimentos alfa e beta, percebeu-se que eles deixam os núcleos resultantes excitados, cuja reacomodação é feita por uma emissão gama (figura 26). Constatou-se que nem todos os isótopos naturais são estáveis e, mais tarde, como veremos, aprendeu-se a manipular os núcleos e a produzir elementos novos, usualmente instáveis, realizando, de certa forma, um sonho de séculos, o dos alquimistas, de se promover a transmutação de substâncias. Por razões compreensíveis, alquimistas tinham preferência pelo ouro como produto da transmutação...

Antes de embarcar na aventura das tecnologias nucleares, vale a pena apresentar uma síntese sobre a constituição dos núcleos e a radiatividade natural:

- Os **núcleos** são constituídos de prótons e de nêutrons.
- O número de prótons é a carga total do núcleo, igual ao número de elétrons na eletrosfera de um átomo neutro, que se designa **número atômico** do elemento químico e define suas propriedades químicas.
- A explosão de qualquer núcleo complexo seria inevitável, pela repulsão entre prótons, se esta não fosse compensada pelas **interações nucleares fortes**, que são atrativas.
- A soma do número de prótons com o número de nêutrons define o **número de massa** do núcleo.
- Um conjunto de prótons e nêutrons “livres” tem massa maior do que um núcleo atômico formado pelo mesmo número de prótons e nêutrons, e a diferença entre essas massas equivale à **energia de ligação**, energia necessária para desintegrar por completo o núcleo atômico.
- Como os elétrons são muito leves, a **massa atômica** é aproximadamente igual à massa do núcleo do átomo.

- O número de nêutrons pode variar, para um mesmo elemento, sem alterar suas propriedades químicas, correspondendo a seus diferentes *isótopos*.
- Alguns isótopos não são estáveis, ou seja, dependendo do número de nêutrons, são *radioativos*, mas todos os elementos com carga nuclear menor que a do urânio (número atômico 92) têm pelo menos uma configuração estável.
- A *radiação alfa*, que é a expulsão de um “pacote fechado” de dois nêutrons e dois prótons, deixa o núcleo com número de massa quatro unidades menor e com número atômico duas unidades menor.
- A *radiação beta* corresponde à expulsão de um elétron gerado dentro do núcleo pela conversão de um nêutron em próton, na *interação nuclear fraca*, deixando o núcleo com praticamente a mesma massa, mas com número atômico uma unidade maior.
- A *radiação gama*, que é a emissão de um fóton de alta frequência, é a forma pela qual um núcleo previamente excitado, por exemplo, em consequência de uma emissão alfa ou beta, se acomoda em um nível de menor energia.
- As radiações cósmicas, originadas de processos nucleares em outras partes do Universo, também são “naturais” e podem produzir substâncias radioativas na atmosfera, que podem ser usadas para fazer *datação de fósseis e de outros objetos*.

BOMBAS E USINAS NUCLEARES

Quando se descobriu a existência dos minúsculos núcleos atômicos, seu enorme potencial energético já era previsível, mesmo sem o conhecimento de detalhes das forças nucleares, e a grande velocidade adquirida pelas partículas alfa nos decaimentos radioativos era uma pequena mostra disso. Afinal, se qualquer núcleo além do de hidrogênio existe, é porque há forças atrativas que compensam a repulsão dos prótons e, se algo perturbar essa ligação, é realmente de esperar que ocorra explosão.

ATIVIDADE 12

FAMÍLIAS RADIOATIVAS NATURAIS

Os elementos naturalmente radioativos constituem séries ou “famílias”, no sentido específico de que de cada desintegração (decaimento radioativo) de um deles resulta outro elemento também radioativo, seu “descendente”, que também decai gerando mais outro, e assim por diante, até chegar a um elemento estável, um dos isótopos do chumbo (Pb). Há três dessas famílias, mostradas na tabela da página 28, duas delas começando por um isótopo do urânio (U) e a outra, por um de tório (Th). Estão representadas apenas as emissões alfa (α) e beta (β), já que a gama não muda a espécie química.

Observe que há isótopos que tanto podem emitir uma alfa como uma beta (α , β), não simultaneamente, causando ramificações dentro das séries, que, depois, se reúnem em outro isótopo,

como fica claro no diagrama abaixo da

tabela, em que se representa a família I.

1. Construa um diagrama semelhante a esse para a família III.
2. Observe o tipo de desintegração das famílias I e III e complete a tabela para a família II, indicando o tipo de emissão radioativa, α ou β , responsável pelas transmutações, sabendo que não há outros isótopos que possam causar ramificações além dos já representados. Construa, também, um diagrama para essa família.
3. Faça uma ilustração livre de uma seqüência de desintegrações alfa e uma beta.
4. Há uma emissão gama, não mostrada na tabela, entre quaisquer duas diferentes desintegrações; discuta por que é razoável que um núcleo que acabou de se transmutar “precise” emitir um ou mais fótons, ou seja, emitir gamas.

COMO DETERMINAR A IDADE DE MÚMIAS OU DE TELAS DE LINHO

Quanto mais recente for uma substância radioativa, maior seu nível de atividade, e, quanto mais tempo passa, menos sobra da substância primitiva. Chama-se “meia-vida” o tempo necessário para que metade da concentração radioativa original “decaia”, transformando-se em outra substância, de forma que após duas meias-vidas restará um quarto (metade da metade), após três meias-vidas restará um oitavo (metade da metade da metade), e assim, em cada momento, a concentração restante pode informar quanto tempo se passou após o início dos decaimentos.

Assim, o decaimento radioativo pode ser usado como datação de objetos e sistemas muito antigos, dos quais o mais famoso é o do carbono 14 (ver boxe de conexão “O método carbono 14” no fascículo *Taxas, variações e funções*).

A todo instante nosso planeta é bombardeado por enorme quantidade de raios cósmicos, alguns dos quais provocam reações nucleares ao colidirem com átomos da atmosfera terrestre. Nesse processo, é formado o C^{14} , um isótopo radioativo do carbono que decai em nitrogênio, por meio de emissões beta, com uma meia-vida de 5.730 anos.

Isso permite conhecer a idade da múmia ou de uma tela de linho, datada do século XVII, cuja autenticidade se queira confirmar. Quando o organismo é vivo, a concentração de átomos de C^{14} é mantida em equilíbrio pela respiração, mas, quando o organismo morre, essa concentração diminui no ritmo de sua meia-vida. Assim, se certo osso de um animal vivo apresenta 16 decaimentos de C^{14} em nitrogênio por minuto, um osso do mesmo tipo e massa que apresentar hoje 8 decaimentos por minuto será datado em 5.730 anos, enquanto outro que revelar apenas 4 decaimentos por minuto terá 11.460 anos de idade. Dessa forma, podemos determinar a idade da morte de qualquer animal ou vegetal ou de objetos derivados deles, como o linho daquela tela.

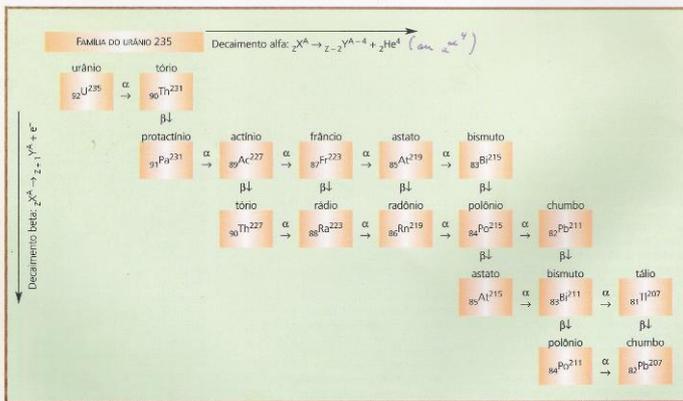
28

Radiações, materiais, átomos e núcleos

FAMÍLIAS RADIATIVAS NATURAIS

FAMÍLIA I			FAMÍLIA II			FAMÍLIA III		
ELEMENTO	ISÓTOPO	DESINTEGRAÇÃO	ELEMENTO	ISÓTOPO	DESINTEGRAÇÃO	ELEMENTO	ISÓTOPO	DESINTEGRAÇÃO
Urânio	${}_{92}\text{U}^{235}$	α	Urânio	${}_{92}\text{U}^{238}$?	Tório	${}_{90}\text{Th}^{232}$	α
Tório	${}_{90}\text{Th}^{231}$	β	Tório	${}_{90}\text{Th}^{234}$?	Rádío	${}_{88}\text{Ra}^{228}$	β
Protactínio	${}_{91}\text{Pa}^{231}$	α	Protactínio	${}_{91}\text{Pa}^{234}$?	Actínio	${}_{89}\text{Ac}^{228}$	β
Actínio	${}_{89}\text{Ac}^{227}$	α, β	Urânio	${}_{92}\text{U}^{234}$?	Tório	${}_{90}\text{Th}^{228}$	α
Tório	${}_{90}\text{Th}^{227}$	α	Tório	${}_{90}\text{Th}^{230}$?	Rádío	${}_{88}\text{Ra}^{224}$	α
Frâncio	${}_{87}\text{Fr}^{223}$	α, β	Rádío	${}_{88}\text{Ra}^{226}$?	Radônio	${}_{86}\text{Rn}^{220}$	α
Rádío	${}_{88}\text{Ra}^{223}$	α	Radônio	${}_{86}\text{Rn}^{222}$?	Polônio	${}_{84}\text{Po}^{216}$	α, β
Astato	${}_{85}\text{At}^{219}$	α, β	Polônio	${}_{84}\text{Po}^{218}$	α, β	Chumbo	${}_{82}\text{Pb}^{212}$	β
Radônio	${}_{86}\text{Rn}^{219}$	α	Chumbo	${}_{82}\text{Pb}^{214}$?	Astato	${}_{85}\text{At}^{216}$	α
Bismuto	${}_{83}\text{Bi}^{215}$	β	Astato	${}_{85}\text{At}^{218}$?	Bismuto	${}_{83}\text{Bi}^{212}$	α, β
Polônio	${}_{84}\text{Po}^{215}$	α, β	Bismuto	${}_{83}\text{Bi}^{214}$	α, β	Polônio	${}_{84}\text{Po}^{212}$	α
Chumbo	${}_{82}\text{Pb}^{211}$	β	Polônio	${}_{84}\text{Po}^{214}$?	Tálio	${}_{81}\text{Tl}^{208}$	β
Astato	${}_{85}\text{At}^{215}$	α	Tálio	${}_{81}\text{Tl}^{210}$?	Chumbo	${}_{82}\text{Pb}^{208}$	Estável
Bismuto	${}_{83}\text{Bi}^{211}$	α, β	Chumbo	${}_{82}\text{Pb}^{210}$?			
Polônio	${}_{84}\text{Po}^{211}$	α	Bismuto	${}_{83}\text{Bi}^{210}$? α, β			
Tálio	${}_{81}\text{Tl}^{207}$	β	Polônio	${}_{84}\text{Po}^{210}$?			
Chumbo	${}_{82}\text{Pb}^{207}$	Estável	Tálio	${}_{81}\text{Tl}^{206}$?			
			Chumbo	${}_{82}\text{Pb}^{206}$	Estável			

DIAGRAMA DAS DESINTEGRAÇÕES RADIATIVAS U^{235}



Na década que antecedeu a Segunda Guerra Mundial, anunciou-se na Alemanha a realização de uma fissão, divisão nuclear artificialmente induzida, até então inédita, o que imediatamente levou toda a comunidade científica ao temor de seu possível uso militar. Começou naquele momento o que se chamou de "corrida nuclear", que, de certa forma, continua até hoje, mas que teve como primeiro e terrível resultado as duas bombas que, ao final da guerra, destruíram Hiroshima e Nagasaki em 1945.

Os modelos desenvolvidos para compreender a constituição dos núcleos, de suas partículas e das forças que agem entre elas foram se tornando bastante complexos, como veremos mais adiante, mas são relativamente simples as idéias em que se baseia o uso militar ou energético da fissão nuclear:

- A estabilidade ou instabilidade dos núcleos depende da relação entre o número de prótons e de nêutrons, que regula a relação entre as forças nucleares atrativas e as forças elétricas repulsivas.
- Núcleos de substâncias físeis, ou seja, o isótopo de massa 235 do urânio (${}_{92}\text{U}^{235}$) ou o de massa 239 do plutônio (${}_{94}\text{Pu}^{239}$), se tornam extremamente instáveis caso absorvam um nêutron extra.
- Em consequência, esses núcleos dividem-se em outros dois núcleos de substâncias mais leves, também radiativos, como os isótopos de bário, cério, criptônio, cobalto e muitos outros. Nesse processo de desintegração artificial, há, também, emissão de nêutrons em alta velocidade e de radiação gama.
- Os nêutrons que encontrarem em seu trajeto novos núcleos físeis podem torná-los instáveis, promovendo novas fissões, ou seja, fazendo com que também se rompam, emitindo novos nêutrons, e assim por diante.
- Essa seqüência é o que se chama de *reação em cadeia*, capaz de romper trilhões de trilhões de núcleos em uma fração de segundo (figura 27).
- A alta velocidade dos fragmentos, ou seja, dos nêutrons e dos núcleos mais leves resultantes, corresponde a uma enorme quantidade de calor.

A IDADE DE OETZI

Foi descongelado para pesquisa genética, em setembro de 2000, o corpo de Oetzi, nome dado pelos cientistas a um cadáver encontrado na fronteira da Itália com a Áustria.

O carbono 14 é um isótopo radiativo formado pela absorção de nêutrons dos raios cósmicos e existe normalmente na natureza na proporção de 10 partes por bilhão (10 ppb). Ele é absorvido pelas plantas sob a forma de CO_2 , estando presente, portanto, nos fósseis animais e vegetais.

A idade de Oetzi foi determinada pela datação por carbono 14. A partir do momento de sua morte, Oetzi começou a perder carbono 14 a uma taxa relacionada à meia-vida desse isótopo. Sabendo que a meia-vida de ${}^{14}\text{C}$ = 5.730 anos e que a quantidade de carbono 14 encontrada foi de aproximadamente 5,19 ppb, a idade aproximada de Oetzi, em anos, está no intervalo entre:

- 4.800 e 6.100;
- 1.000 e 2.800;
- 7.200 e 9.100;
- 10.000 e 11.200;
- 2.900 e 3.900.

(UFMS 2000)

EM QUESTÃO 7

CONEXÃO

CIÊNCIA E TECNOLOGIA A SERVIÇO DA GUERRA

A deflagração da Segunda Guerra dividiu as potências mundiais de então em dois blocos: o dos "países aliados", envolvendo, por exemplo, a Inglaterra, os Estados Unidos e a União Soviética, e o dos "países do eixo", constituído pela Alemanha, pelo Japão e pela Itália. A comunidade científica já estava politizada mesmo antes do início da guerra, e muitos cientistas migraram por razões ideológicas ou por perseguição política, como Albert Einstein, que deixou a Alemanha, e Enrico Fermi, que abandonou a Itália.

A experiência de fissão nuclear, realizada pela primeira vez por Otto Hahn, em 1938, na Alemanha, tornou real a possibilidade de desenvolver armas nucleares e houve um intenso debate entre cientistas sobre sua

fabricação nos países aliados antes que a Alemanha o fizesse.

No chamado Projeto Manhattan, os Estados Unidos desenvolveram as primeiras bombas atômicas que, em um único dia, mataram centenas de milhares de pessoas em duas grandes cidades japonesas: Hiroshima, destruída por uma bomba de urânio, e Nagasaki, por uma bomba de plutônio.

Terminada a guerra, emergiram como potências mundiais antagonônicas os Estados Unidos e a União Soviética. Essa divisão polar do mundo se refletiu em permanente tensão entre a Organização do Tratado do Atlântico Norte (Otan), da Europa Ocidental, e o Pacto de Varsóvia, da Europa Oriental, além de desembocar em conflitos armados no Oriente, como a guerra da Coreia e a guerra do Vietnã. O longo período do século XX

denominado de "Guerra Fria" foi marcado por uma corrida armamentista em que ambas as potências acumularam um enorme arsenal de bombas de fissão e de fusão nucleares, capazes de aniquilar a vida humana.

Hoje há armas nucleares estocadas em diversos países e teme-se seu uso em conflitos regionais, como os do Oriente Médio ou entre Índia e Paquistão. Existem também armas nucleares táticas, de menor poder de destruição, que poderão vir a ser usadas sobre tropas, no lugar de explosivos convencionais.

No Brasil, debateu-se por décadas a importância estratégica de desenvolver armas nucleares, até que a Constituição promulgada em 1988 incluiu um item proibindo o desenvolvimento ou uso de armas nucleares no país.

30

Radiações, materiais, átomos e núcleos

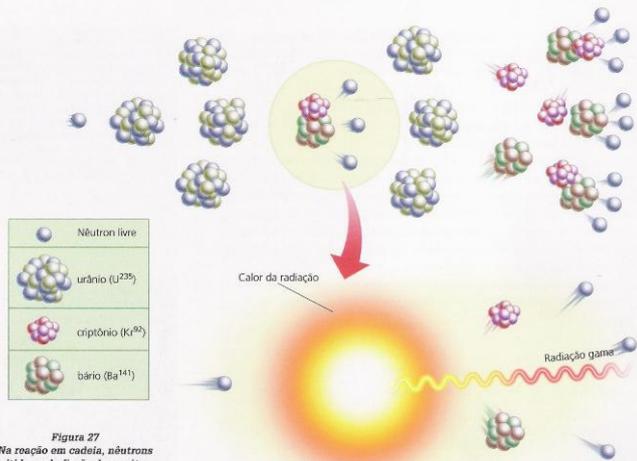


Figura 27
Na reação em cadeia, nêutrons emitidos pela fissão de um átomo provocam novas fissões ao serem absorvidos por outros átomos do material fissil.

Há detalhes técnicos essenciais para que a energia nuclear possa resultar em uma reação em cadeia, ou seja, em uma bomba: para que os nêutrons emitidos em uma fissão não escapem do sistema sem colidir com outro núcleo fissil, é preciso que haja uma quantidade suficiente de urânio 235 puro ou de plutônio 239, chamada de massa crítica, e que essa massa seja extremamente compactada, ou seja, reduzida a um volume menor, chamado de volume crítico. Para tal, usa-se dinamite ou explosivo plástico convencional, que, ao explodir, pressiona os átomos da substância fissil uns contra os outros (figura 28).

As bombas nucleares de fissão, ou bombas atômicas (bombas A), dependem do fato de ser maior a massa do núcleo pesado, fissionável, do que a

ATIVIDADE 18
O PODER DESTRUTIVO DOS EXPLOSIVOS NUCLEARES
As unidades quiloton e megaton, usadas para explosivos nucleares, correspondem, respectivamente, à energia liberada por mil toneladas e por um milhão de toneladas de dinamite, dando uma idéia do poder destrutivo dos explosivos nucleares, ou seja, de como é concentrada a energia nos núcleos, comparada com a energia disponível na eletrosfera dos átomos, responsável pelas reações químicas dos explosivos e combustíveis convencionais. Utilizando algumas operações matemáticas, relativamente

facéis, você pode fazer uma comparação quantitativa.
1. Considere simplesmente as forças elétricas que atuam tanto na camada eletrônica quanto no interior do núcleo e observe que a força entre duas cargas iguais, q , pode ser calculada pela lei de Coulomb, como $\frac{Kq^2}{r^2}$, em que K é uma constante e r a distância entre as cargas, assunto abordado no fascículo *Comunicação e informação*.
2. Verifique também que, pela definição de trabalho como produto da força pela distância, discutida no fascículo *Transportes, esportes e outros movimentos*, a energia necessária para

aumentar a distância entre duas cargas de um valor da mesma ordem de grandeza que a distância que as separa pode ser dada de forma aproximada pela expressão $E = \frac{Kq^2}{r}$.
3. Lembrando-se dos valores típicos do diâmetro atômico, da ordem de 10^{-10} m, e do diâmetro nuclear, da ordem de 10^{-15} m, calcule em quantas vezes a energia liberada pelo escape de um próton do núcleo atômico é maior que a energia liberada pelo escape de um elétron da eletrosfera e explique por que alguns quilos de "combustível ou explosivo nuclear" podem equivaler a centenas de milhares de toneladas de dinamite.

32

Radiações, materiais, átomos e núcleos

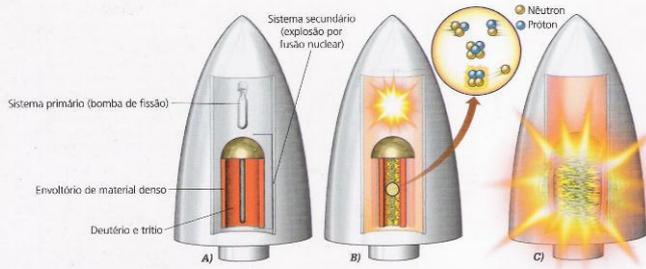


Figura 29
Na bomba de fusão, as substâncias passíveis de fusão, como deutério e trítio, encontram-se inicialmente a baixa temperatura dentro de uma cápsula, ou sistema secundário, separada do sistema primário, que guarda a bomba atômica (figura A). Uma vez detonada, a bomba pressiona o sistema secundário, elevando a temperatura em seu interior, dando início ao processo de fusão (figura B) e à segunda grande explosão (figura C).

cia e, usualmente, é programada para explodir bem antes de atingir o solo, de forma a diminuir seu impacto térmico e mecânico.

Diferentemente das bombas nucleares, os reatores nucleares, mesmo em caso de acidentes com consequências trágicas, como em Chernobyl, nunca se transformam em bombas nucleares, pois não têm como alcançar massa crítica em volume crítico, essenciais às bombas, como vimos. O perigo em acidentes com usinas que usam reatores nucleares de alta potência é a quantidade de material físsil, maior do que a de qualquer bomba. Há reatores de pequeno porte, para produzir isótopos destinados a uso médico e industrial a partir da fissão de pequenas quantidades de urânio, mas a maior parte dos reatores está instalada em usinas destinadas à produção de eletricidade, que podem ser descritas como usinas termelétricas, movidas a energia nuclear.

Uma usina termelétrica, como você viu no fascículo *O mundo da energia*, é um gerador elétrico movido por uma turbina a vapor, ou seja, uma máquina térmica na qual a água é fervida em uma caldeira, em que o vapor assim resultante é conduzido para mover as pás das hélices de uma turbina, que, por sua vez, faz girar o eixo do gerador. Pois bem, o que distingue uma usina nuclear de qualquer outra termelétrica é simplesmente a forma pela qual se ferve a água na caldeira.

Em uma usina nuclear, o interior da caldeira é um reator nuclear, um espaço em que a água convive com os nêutrons emitidos pela fissão nuclear de urânio, e é precisamente a energia cinética desses nêutrons que aquece as moléculas de água e faz ferver a água. O urânio não se mistura à água, pois é condicionado, na forma de pastilhas de dióxido de urânio (UO₂), dentro de tubos inoxidáveis. A condição é sempre "subcrítica", por várias razões, entre as quais vale lembrar o fato de que, em bombas, usa-se U²³⁵ quase 100% puro, ou altamente enriquecido, enquanto em reatores utiliza-se uma mistura com 3% de U²³⁵, que se diz levemente enriquecida. Esse enriquecimento do urânio refere-se à quantidade relativa dos isótopos encontrados na natureza, sendo apenas 0,7% de U²³⁵ e a grande maioria, 99,2%, de U²³⁸, que não é físsil. Para diminuir o risco de contaminação radiativa, a água superaquecida na caldeira-reator não é a mesma que vai circular na turbina, pois essa água do circuito pri-

EM QUESTÃO 9

POTÊNCIA E ENERGIA NUCLEAR

Se cada fissão nuclear no ²³⁵U libera 200 MeV, quantas fissões por segundo devem ocorrer para produzir uma potência de 1 kW?

a) 3,1 · 10¹³
 b) 2,0 · 10¹¹
 c) 3,2 · 10¹¹
 d) 3,2 · 10⁹
 e) 2,0 · 10⁵

São dadas as conversões:
 1 eV = 1,6 · 10⁻¹⁹ J
 1 MeV = 10⁶ eV
 1 kW = 10³ W
 (UFRGS 1991)

32

Radiações, materiais, átomos e núcleos

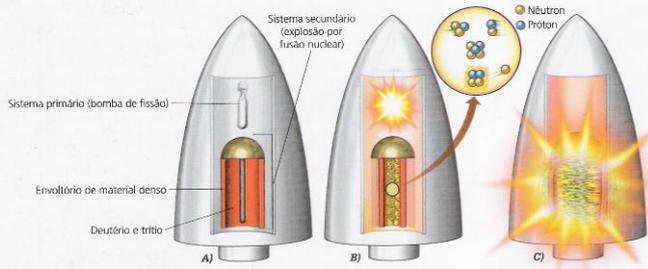


Figura 29
Na bomba de fusão, as substâncias passíveis de fusão, como deutério e trítio, encontram-se inicialmente a baixa temperatura dentro de uma cápsula, ou sistema secundário, separada do sistema primário, que guarda a bomba atômica (figura A). Uma vez detonada, a bomba pressiona o sistema secundário, elevando a temperatura em seu interior, dando início ao processo de fusão (figura B) e à segunda grande explosão (figura C).

cia e, usualmente, é programada para explodir bem antes de atingir o solo, de forma a diminuir seu impacto térmico e mecânico.

Diferentemente das bombas nucleares, os reatores nucleares, mesmo em caso de acidentes com consequências trágicas, como em Chernobyl, nunca se transformam em bombas nucleares, pois não têm como alcançar massa crítica em volume crítico, essenciais às bombas, como vimos. O perigo em acidentes com usinas que usam reatores nucleares de alta potência é a quantidade de material físsil, maior do que a de qualquer bomba. Há reatores de pequeno porte, para produzir isótopos destinados a uso médico e industrial a partir da fissão de pequenas quantidades de urânio, mas a maior parte dos reatores está instalada em usinas destinadas à produção de eletricidade, que podem ser descritas como usinas termelétricas, movidas a energia nuclear.

Uma usina termelétrica, como você viu no fascículo *O mundo da energia*, é um gerador elétrico movido por uma turbina a vapor, ou seja, uma máquina térmica na qual a água é fervida em uma caldeira, em que o vapor assim resultante é conduzido para mover as pás das hélices de uma turbina, que, por sua vez, faz girar o eixo do gerador. Pois bem, o que distingue uma usina nuclear de qualquer outra termelétrica é simplesmente a forma pela qual se ferve a água na caldeira.

Em uma usina nuclear, o interior da caldeira é um reator nuclear, um espaço em que a água convive com os nêutrons emitidos pela fissão nuclear de urânio, e é precisamente a energia cinética desses nêutrons que aquece as moléculas de água e faz ferver a água. O urânio não se mistura à água, pois é condicionado, na forma de pastilhas de dióxido de urânio (UO₂), dentro de tubos inoxidáveis. A condição é sempre "subcrítica", por várias razões, entre as quais vale lembrar o fato de que, em bombas, usa-se U²³⁵ quase 100% puro, ou altamente enriquecido, enquanto em reatores utiliza-se uma mistura com 3% de U²³⁵, que se diz levemente enriquecida. Esse enriquecimento do urânio refere-se à quantidade relativa dos isótopos encontrados na natureza, sendo apenas 0,7% de U²³⁵ e a grande maioria, 99,2%, de U²³⁸, que não é físsil. Para diminuir o risco de contaminação radiativa, a água superaquecida na caldeira-reator não é a mesma que vai circular na turbina, pois essa água do circuito pri-

EM QUESTÃO 8

POTÊNCIA E ENERGIA NUCLEAR

Se cada fissão nuclear no ²³⁵U libera 200 MeV, quantas fissões por segundo devem ocorrer para produzir uma potência de 1 kW?

a) 3,1 · 10¹³
 b) 2,0 · 10¹¹
 c) 3,2 · 10¹¹
 d) 3,2 · 10⁹
 e) 2,0 · 10⁵

São dadas as conversões:
 1 eV = 1,6 · 10⁻¹⁹ J
 1 MeV = 10⁶ eV
 1 kW = 10³ W
 (UFRGS 1991)

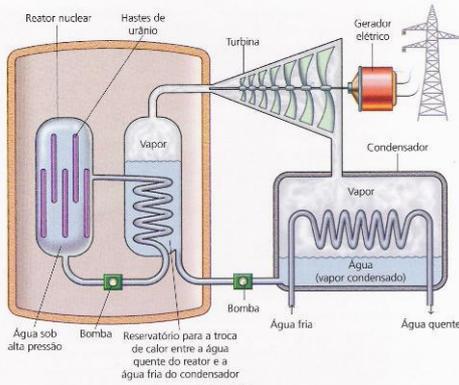


Figura 30
Principais componentes de um reator nuclear.

mário é levada a um trocador de calor, onde transfere energia térmica para o circuito secundário, no qual outra água tem seu vapor conduzido para a turbina, promovendo a impulsão do gerador (figura 30).

Uma pergunta que se poderia esperar é sobre a existência de reatores nucleares de fusão ou sobre o interesse em desenvolvê-los, pois eles seriam capazes de produzir “energia limpa”, fundindo núcleos de hidrogênio, um combustível abundante feito água, e resultando em núcleos de hélio, um inofensivo gás nobre e não radiativo. Na realidade, essa não é uma pergunta nova nem tão original; há mais de meio século muitos técnicos e cientistas têm se dedicado, até hoje sem sucesso, à pesquisa da fusão nuclear controlada, que seria fazer na Terra o tipo de geração de energia das estrelas. Além da dificuldade de manusear matéria a temperaturas de milhões de graus, que se denomina plasma nuclear, o problema maior é alcançar e manter tais temperaturas, sem usar uma bomba A, é claro!

AS PARTÍCULAS ELEMENTARES E AS FORÇAS FUNDAMENTAIS

Quando os átomos receberam esse nome, é provável que, em princípio, se estivesse pressupondo que eles fossem elementares, ou seja, que não fossem feitos de partes menores, uma vez que “átomo”, em sua origem grega, significa coisa indivisível. Na realidade, desde a Antiguidade grega houve quem, como Demócrito, supusesse a existência de minúsculas partículas, que seriam a base de tudo, e que a qualidade dos diferentes materiais e substâncias dependeria somente da forma com que essas partículas fossem aglomeradas.

Durante todas as partes anteriores deste fascículo, no entanto, vimos de muitas formas que os átomos parecem ser constituídos de diferentes partes, como o núcleo e a esfera de elétrons. Depois observamos que os núcleos,

ENERGIA NUCLEAR: RISCOS, BENEFÍCIOS E USO MILITAR

Investigue e discuta com seus colegas cada uma das questões abaixo envolvendo a energia nuclear:

1. A porcentagem de origem nuclear na eletricidade consumida no Brasil é muito menor do que nos Estados Unidos, Japão e França. Analise a matriz energética no Brasil – por exemplo, a apresentada no fascículo *O mundo da energia* (p. 46) – e encontre razões para a baixa participação nuclear na geração elétrica.
2. Os acidentes nucleares mais graves estão relacionados com os elementos combustíveis dos reatores: as pastilhas de urânio sem água circulante a sua volta levam ao derretimento e à evaporação do material radiativo. Discuta o que poderia causar isso e informe-se sobre os dois acidentes nucleares mais conhecidos, o de Three Mile Island, em 1979, e o de Chernobyl, em 1986.
3. A indústria energética nuclear tem tido forte relação com a indústria bélica como, por exemplo, a produção do plutônio Pu²³⁹ nas usinas a partir do U²³⁸. A maior parte do urânio presente nos reatores nucleares é o U²³⁸, que não produz energia, mas está exposto aos nêutrons da fissão do U²³⁵. Discuta um possível processo, envolvendo absorção de nêutrons e emissões beta, que transformasse U²³⁸ em Pu²³⁹, que é físsil e serve à construção de bombas nucleares.
4. Além do uso em bombas, urânio e plutônio servem de combustível para submarinos nucleares. Relacione esse uso com estratégias de guerra e espionagem. Tente compreender, por exemplo, por que um submarino nuclear é mais eficaz do que um movido a diesel.

ATIVIDADE



Figura 31

Arthur Rossato

ECOMAT ASSOCIADAS
ENSINO MÉDIO

reunidos pelas interações nucleares fortes, parecem ser formados de diferentes partículas, como o *próton* e o *nêutron*. Verificamos também que a luz e as outras radiações eletromagnéticas de alta frequência, emitidas pelos átomos, são partículas-onda, chamadas *fótons*, ou gamas, e tomamos conhecimento do *neutrino*, do *antineutrino* e do *pósitron*, cujas existências são necessárias para explicar o decaimento beta, regulado pelas interações nucleares fracas. Se parássemos por aí, poderíamos explicar a constituição dos átomos de cerca de uma centena de elementos químicos, com base em pouco mais de meia dúzia de partículas.

Se estamos em busca das coisas elementares e fundamentais, devemos perguntar que conjunto de forças atuam nesse conjunto de partículas, e podemos começar repassando aquelas com que já deparamos neste e em outros fascículos:

- Uma força a ser lembrada é a *gravitação* ou *força gravitacional*, que atua sempre atrativamente sobre tudo o que tem massa, de acordo com a lei da gravitação universal, proposta por Newton, que você viu, por exemplo, no fascículo *Transportes, esportes e outros movimentos*. Claro que, se as massas forem muito pequenas, a força gravitacional exerce um efeito desprezível entre elas, o que não acontece se, por exemplo, uma das massas for uma estrela, como estudado em *Os astros e o cosmo*, fascículo em que, aliás, a teoria da relatividade geral mostrou que mesmo a luz, que não tem massa, percorre trajetórias curvas, por influência "gravitacional" das massas do Universo.
- Em seguida, devemos levar em conta a *força elétrica* ou *eletromagnética*, que atua sobre tudo o que tem carga, atraindo cargas opostas e repelindo cargas iguais, o que promove, por um lado, a integridade dos átomos, pois estabelece a relação atrativa entre os elétrons negativos e o núcleo positivo, e, por outro, a instabilidade do núcleo, uma vez que atua repelindo pares de prótons positivos e tão próximos.
- Finalmente, temos de incluir as duas diferentes forças nucleares, a que fomos apresentados há poucas páginas: as *interações nucleares fortes*, cuja ação atrativa é responsável por compensar a forte repulsão elétrica entre os prótons, e as *interações nucleares fracas*, que, no mínimo, são responsabilizadas pela transmutação entre nêutrons e prótons, na radiação nuclear beta.

Alguém poderia desconfiar que pudessem surgir outras forças fundamentais além dessas quatro, mas, ao contrário, o que tem sido objeto de investigação é a tentativa de mostrar que, nos primeiros e traumáticos instantes deste Universo que hoje conhecemos, uma força única se separou nessas quatro forças fundamentais. Pelo menos, isso estaria de acordo com um "modelo padrão" de desenvolvimento do Universo, segundo o qual tudo teria começado com uma notável explosão de um minúsculo ponto, no qual estava contida toda a informação sobre a matéria, o espaço e o tempo, três entidades inseparáveis que se desenvolveram juntas, nos últimos 15 bilhões de anos, como está brevemente descrito no fascículo *Os astros e o cosmo*.

Quanto às partículas, não são apenas quatro nem sete nem dez, e a realidade está se mostrando bem mais complicada. Já em 1920, Paul Dirac previu a existência de *antipartículas*, tal como o *pósitron*, "gêmeo oposto" do elétron, um antieletron com carga positiva. Mais tarde, percebeu-

radiações, materiais, átomos e núcleos 35

CONEXÃO
CRIAÇÃO E ANIQUILAÇÃO DE PARES DE PARTÍCULAS

Vimos que a energia liberada nas emissões alfa e na fissão e fusão nucleares é equivalente à diminuição da massa do sistema de acordo com a equação $E = mc^2$. Uma curiosidade que você pode ter é quanto à possibilidade de algum processo em que toda a massa seja aniquilada, restando apenas energia na forma de radiação gama.

Pois bem, é exatamente isso o que ocorre quando uma partícula se encontra com sua antipartícula. Se um elétron, e^- , por exemplo, se encontra com um pósitron, e^+ , eles se aniquilam e dão lugar a um gama, cuja energia é a soma da equivalência massa-energia do par elétron-pósitron, ou seja, $hf = 2mc^2$. O fenômeno contrário é também verdadeiro, com partículas e antipartículas podendo ser criadas a partir de um gama de alta energia.

Longe de mera especulação teórica, antieletrons, antiprótons e muitas outras antipartículas já foram detectadas em experimentos. A ideia que hoje se tem é a de que para toda partícula há uma antipartícula, e partículas que parecem não ter par, como o fóton, são antipartículas de si mesmas.

Um aspecto intrigante e, este sim, aparentemente fictício é que, se trocássemos cada próton, nêutron e elétron de um átomo por suas antipartículas, teríamos um antiátomo; combinações de antiátomos poderiam dar origem a antimoléculas, que, associadas, criariam um antimundo, um espelho do mundo que conhecemos.

De qualquer forma, como o fóton é sua própria antipartícula, se tal mundo de antimatéria existir, ele está em uma galáxia que emite a mesma luz que conhecemos, sendo impossível comprovar sua existência... o que talvez não seja tão ruim, já que, se você cruzar alguma vez com seu "antivocê", vocês se aniquilarão, sobrando apenas gamas que não servirão nem para contar a história.

ESCOLAS ASSOCIADAS
ENGENHO SERRÃO

Figura 32

se que todas as partículas têm sua antipartícula e, assim, o próton, p^+ , tem seu antipróton, p^- .

Foram surgindo tantas partículas que o jeito foi organizá-las em famílias e gerações. Os elétrons e pósitrons, assim como seus neutrinos e anti-neutrinos, que tomam parte nas interações eletromagnética e nuclear fraca, passaram a constituir a primeira geração das partículas consideradas leves, chamadas por isso, em grego, de léptons, mas já apareceram outras duas gerações de léptons, não tão leves... Os prótons e nêutrons, partículas mais pesadas, foram por isso denominados, em grego, de bárions, porém essa classificação deixou de ter sentido porque se descobriu, ao que tudo indica, que os bárions não são elementares, mas sim constituídos de partículas menores, chamadas quarks, cujas cargas são frações da carga do elétron, como $\frac{1}{3}e$ ou $-\frac{2}{3}e$. Assim, a classificação dessa família, que toma parte na interação nuclear forte, passou a ser outra, chamada de hádrons, forte em grego, com duas categorias internas, a dos mésons, de massa intermediária, e a dos bárions, mais pesados. Claro que também se descobriram outras partículas, essenciais para o funcionamento das interações nucleares fracas.

EM QUESTÃO

POR DENTRO DE NEUTRONS E PRÓTONS

Prótons e nêutrons são constituídos de partículas chamadas quarks - os quarks *u* e *d*. O próton é formado de 2 quarks do tipo *u* e 1 quark do tipo *d*, enquanto o nêutron é formado de 2 quarks do tipo *d* e 1 do tipo *u*. Se a carga do próton é igual a 1 unidade de carga e a do nêutron igual a zero, as cargas de *u* e *d* valem, respectivamente:

a) $\frac{2}{3}$ e $\frac{1}{3}$. c) $-\frac{2}{3}$ e $\frac{1}{3}$.
 b) $\frac{2}{3}$ e $-\frac{1}{3}$. d) $\frac{2}{3}$ e $-\frac{1}{3}$.

(UERJ)

Como se pode ver, há uma **relação importante entre as partículas e as forças de que participam**. Isso tem sido sistematizado de forma surpreendente. Notou-se que uma maneira universal de interpretar as forças seria por meio de trocas virtuais de partículas ou, dito de outra forma, pela troca de partículas virtuais. Assim, as forças eletromagnéticas seriam cargas trocando fótons; as interações fortes, quarks trocando glúons; as interações fracas, trocas de partículas *W* (de "weak", fraco em inglês); e, para não deixar por menos, a gravitação seria a troca de grávitons... Nem tudo isso pode ser comprovado, mas tem uma bela lógica interna, uma certa filosofia das teorias unificadas dos campos de força.

A obtenção dessa grande quantidade de partículas dependeu tanto da investigação de raios cósmicos, ou seja, de radiação que cruza a atmosfera, vinda de fora do sistema solar, como da construção de enormes aceleradores de partículas, que, ao colidirem, revelam seus fragmentos e

CONEXÃO

PARTÍCULAS ELEMENTARES E FORÇAS FUNDAMENTAIS

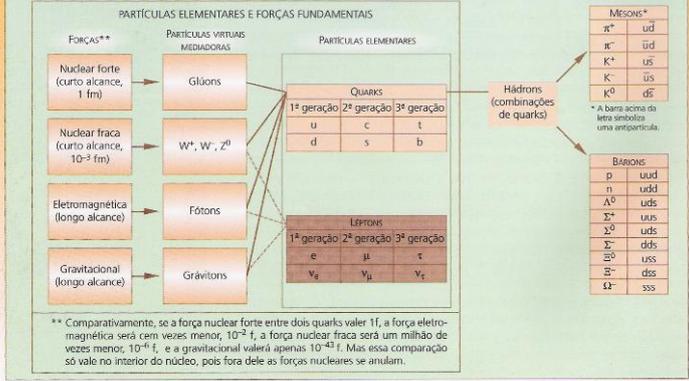
No chamado "modelo padrão", supõe-se a existência de 12 partículas elementares, além de suas antipartículas, sendo seis quarks - *up* (*u*), *down* (*d*), *charm* (*c*), *strange* (*s*), *top* (*t*), *bottom* (*b*) - e seis léptons - *elétron* (*e*), *muon* (*μ*), *tau* (*τ*) e seus neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ). Combinações de quarks e antiquarks formam os hádrons, que podem ser mésons, quando se combinam um quark e um antiquark, ou bárions, quando três quarks se unificam.

A junção, por exemplo, de dois quarks *up*, cada um com carga elétrica igual a $+\frac{2}{3}e$, e um quark *down*, com carga igual a $-\frac{1}{3}e$, dá origem ao velho e conhecido próton, de carga $1e$. $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$.

Outro exemplo é a combinação de um quark ou antiquark *up* com um quark ou antiquark *down*, de onde se originam os pions (π), partículas descobertas em 1947 pelo brasileiro Cesar Lattes em conjunto com outros

dois pesquisadores, o italiano Occhialini e o inglês Cecil Powell.

É claro que o quadro de hádrons aqui apresentado é apenas uma pequena amostra das muitas combinações de quarks possíveis e que mesmo a tabela mais completa que possa hoje existir é, também, uma pequena parte do surpreendente e dinâmico campo de pesquisas que tem se tornado a física do partículas. Apenas por mera curiosidade, talvez valha a pena navegar por sites como o do Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), situado em Illinois, nos Estados Unidos, cujo endereço eletrônico é www.fnal.gov.



propriedades. Esses aceleradores são, frequentemente, arranjos circulares de eletromagnetos em torno de uma imensa câmara de vácuo com a forma de um pneumático, chegando a ter quilômetros de diâmetro, para permitir a investigação de partículas de dimensões submicroscópicas (figura 33). Hoje em dia, o grande laboratório virtual das altas energias é a própria investigação cosmológica, ou seja, dependendo de como forem, de fato, as forças e as partículas da natureza, isso tem conseqüências para as hipóteses de se podem fazer sobre o passado de nosso Universo, como você pode conferir nas páginas finais do fascículo *Os astros e o cosmo*.



Foto: Rex Features

Estrutura da matéria e propriedades dos materiais

GASES, LÍQUIDOS E SÓLIDOS E A RELAÇÃO ENTRE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS

Quando se começa a aprender ciências, na escola elementar, recebem-se informações sobre os estados da natureza e sobre algumas de suas propriedades, como, por exemplo, que os sólidos têm forma própria, enquanto líquidos e gases não, afirmações até mesmo duvidosas: a areia fina que escorre é líquida ou sólida (figura 34)?... Depois, estuda-se que as substâncias mudam de estado, que a mesma água de beber pode se tornar a macia neve ou o duro gelo, assim como pode sair do bico da chaleira como um vapor quantíssimo ou estar como vapor à temperatura ambiente, na umidade do ar.

Como se viu no fascículo *O mundo da energia*, o estado da maior parte das substâncias depende da temperatura e da pressão a que estão submetidas, e, para fazer com que mudem de estado, usualmente é preciso aquecê-las ou resfriá-las: o "suor" que se forma na superfície de um copo de refrigerante gelado é resultado da condensação do vapor d'água, da umidade do ar, em contato com o vidro frio; o vapor a alta pressão que impulsiona as turbinas em uma termelétrica se forma quando se transfere calor, energia térmica, à água na caldeira; o gelo se forma no interior do refrigerador quando calor é retirado da água e transferido ao meio ambiente.

Em outras palavras, o estado físico depende da energia média de oscilação das moléculas, que depende da temperatura. A perfeita ordem em que se alinham as moléculas em um grão de areia ou em um cristal de gelo deve-se a forças de natureza elétrica que ligam pares de moléculas entre si. Essa ordem se desmancha quando a temperatura, e, portanto, a energia cinética média por molécula, é suficiente para superar a ligação entre cada par delas, que é quando se dá a fusão. A mobilidade molecular em um líquido é insuficiente, no entanto, para que as moléculas se dispersem completamente, de modo que permanece uma atração intermolecular que, por exemplo, faz com que as gotas de líquido tenham a forma esférica. Se mais energia for entregue ao

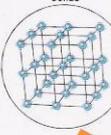
Figura 33
Partículas carregadas, como os prótons, são aceleradas ao longo de tubos que chegam a ser quilométricos e submetidas, em seguida, a colisões em câmaras como a da figura. Seus fragmentos revelam a estrutura subnuclear da matéria.



Foto: C. Ribeiro

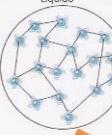
Figura 34
Apesar de constituída de grãos sólidos, a areia parece não ter forma própria.

38 radiações, materiais, átomos e núcleos



Sólido

Fusão →



Líquido

Vaporização →



Gás

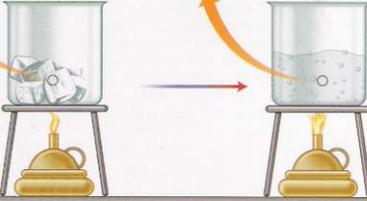


Figura 35
Aumentos na temperatura de uma substância correspondem a aumentos na energia cinética média de suas moléculas, que, quando intensa o suficiente, vence a atração elétrica intermolecular, mudando o estado físico de sólido para líquido ou de líquido para gasoso.

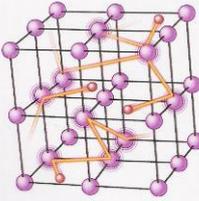


Figura 36
Em seu trajeto por dentro de um fio condutor, elétrons chocam-se diversas vezes contra a rede cristalina, conduzindo ao mesmo tempo eletricidade e calor.

sistema, pode-se atingir uma situação em que a energia cinética média é suficiente para vencer o potencial atrativo no conjunto das moléculas, que é quando se dá a ebulição (figura 35).

Propriedades físicas como a densidade de gases, a viscosidade de líquidos ou a condutividade elétrica de sólidos podem variar de acordo com a temperatura, ainda que em um mesmo estado, por conta daquela gradativa mudança da condição de vibração. Por exemplo, um filamento de lâmpada tem resistividade muitas vezes maior quando incandescente do que quando frio, assim como o óleo lubrificante em geral perde viscosidade dentro de um motor superaquecido. Em contrapartida, duas substâncias em um mesmo estado podem ter propriedades químicas muito diferentes entre si, como o hidrogênio, altamente explosivo, e o hélio, tão pouco interagente, embora possuam algumas propriedades físicas comuns, cuja investigação é reveladora.

Você se lembra, por exemplo, de alguma substância que seja gás à temperatura ambiente, não transparente e bom condutor elétrico ou térmico? E de algum metal transparente e mau isolante térmico ou elétrico? Claro que não, pois todo gás é transparente e isolante, exceto quando ionizado por uma faísca ou por altíssima temperatura, e todo metal é condutor e não transparente à luz visível, só sendo atravessado por radiação de altíssima frequência, como raios gama. O interessante é tentar descobrir a razão disso.

O conhecimento da estrutura dos materiais pode explicar a relação entre essas propriedades, assim como o conhecimento e a análise de tais propriedades podem revelar algo sobre a estrutura dos materiais. Por exemplo, é possível entender que um fio de cobre é bom condutor de eletricidade conhecendo a estrutura cristalina desse metal, porque nela os elétrons conseguem, migrando de um átomo para outro, caminhar ao longo do fio sob o efeito de um campo elétrico (figura 36), como visto no fascículo

ESCOLAS ASSOCIADAS
EXATINO MÉDIO

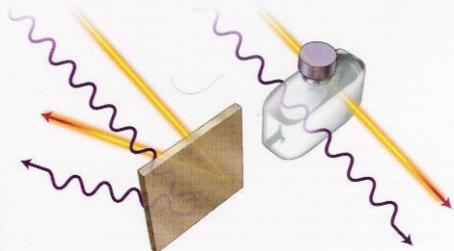
Comunicação e informação. Da mesma forma, pode-se compreender que os gases são maus condutores de electricidade pela razão equivalentemente oposta, ou seja, os átomos ou moléculas neutras de um gás são separados entre si, exceto durante colisões, de modo que os elétrons não conseguem migrar sob o efeito de um campo elétrico e, sendo neutros, átomos e moléculas não reagem ao campo. Aliás, como os elétrons, ao migrar, também carregam energia cinética, é igualmente compreensível que os metais sejam bons condutores térmicos e os gases não.

Uma explicação mais completa da relação entre luz ou campos eletromagnéticos e diferentes materiais depende de conceitos quânticos, como será tratado logo a seguir, ao se explicarem os semicondutores. No entanto, o simples caráter eletromagnético da luz permite esclarecer a relação entre condutividade elétrica e não transparência, ou vice-versa. Se um material, como um gás, tem todas as suas cargas confinadas a "seus átomos", com seus elétrons "circulando" junto aos núcleos, dos quais não se podem afastar, é mais difícil aos elétrons se mover sob a ação de um campo, e o material não poderá ser bom condutor, assim como lhes é difícil absorver o campo eletromagnético variável correspondente à passagem da onda luminosa, deixando que a luz passe pelo material.

Por razão parecida, vidros e cristais transparentes têm comportamento semelhante ao dos gases, sendo também isolantes elétricos. No entanto, quando a luz atinge a superfície polida de um metal, seu campo variável faz com que oscilem os elétrons do metal, que são relativamente livres para migrar entre moléculas, de forma que, ao mesmo tempo, a onda é "absorvida" pela oscilação dos elétrons e reemitida de volta como campo variável produzido pelas cargas oscilantes, ou seja, é refletida (figura 37). Dependendo do tipo de material e acabamento, a absorção não é acompanhada de reflexão, levando ao aquecimento do material, que absorve a luz, como acontece com objetos de metal oxidados ou escurecidos quando expostos ao sol.

Uma síntese dessa discussão sobre a natureza das forças no interior dos materiais e sobre as relações entre as diferentes propriedades pode ser apresentada em uma única frase:

Todas as propriedades mecânicas, térmicas, ópticas, elétricas ou químicas, de todos os materiais, sem exceção e em qualquer estado, são determinadas por forças de natureza eletromagnética, por meio das quais átomos e moléculas se relacionam.



ATIVIDADE 10

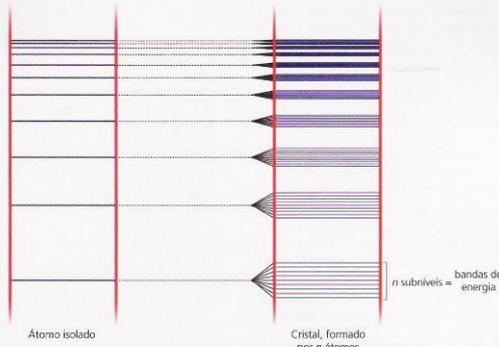
ESPELHOS

O que se chama usualmente de espelho tem como base uma lâmina de vidro com uma das faces metalizada. Há quem pense que a reflexão se deve ao vidro, até porque há uma reflexão parcial em qualquer vidro polido.

Observando frente e verso de diferentes espelhos, ou cacos de espelho, e levando em conta as qualidades de vidros e de metais e a discussão conduzida no texto, levante hipóteses e discuta com seus colegas as questões abaixo:

1. Quais são os elementos essenciais para que se possa ter um espelho? Por exemplo, discuta a possibilidade de povos que não tenham dominado a fabricação do vidro poderem fazer espelhos.
2. Quais as funções do vidro, do metal e do verniz que cobre a face metalizada dos espelhos convencionais?
3. Discuta quanto esta atividade pode servir para ilustrar o fato de que a luz é uma onda eletromagnética.

Figura 37
Ondas eletromagnéticas atravessam vidros e gases, mas são usualmente refletidas por metais.



Átomo isolado

Cristal, formado por n átomos

n subníveis = bandas de energia

Figura 38

Na formação de cristais, com n átomos, cada nível de energia permitido aos elétrons de um átomo isolado se expande em n subníveis, de pequena diferença energética entre si, constituindo, assim, faixas ou bandas de energia permitidas.

MATERIAIS SEMICONDUTORES E DISPOSITIVOS MICROELETRÔNICOS

A maior parte dos equipamentos e aparelhos que hoje utilizamos fazem uso de dispositivos, como os *chips* microeletrônicos, baseados em materiais semicondutores. A compreensão das propriedades desses dispositivos exige entender aspectos quânticos da estrutura e da energética desses materiais.

Uma série de argumentos revela como a configuração de elétrons no átomo dos elementos químicos, especialmente, nos cristais formados pela agregação de átomos é determinante para suas propriedades elétricas e ópticas:

- **Cristais** são arranjos espaciais de átomos ou moléculas, ligados por meio da partilha de elétrons, seja um grão de sal de cozinha, seja um metal qualquer, e não são ajuntamentos de átomos, mas *sistemas quânticos integrados*.
- Os cristais também obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, ou seja, dois elétrons não podem estar no mesmo estado quântico. Por isso, para um cristal que tem n átomos, cada nível eletrônico do átomo terá de se dividir em n subníveis para acomodar todos os elétrons (figura 38). Em um grão de sal, com cerca de 10^{23} moléculas, a cada nível das moléculas elementares corresponderá uma faixa ou *banda de energia* com 10^{23} subníveis, cuja ocupação eletrônica determinará as propriedades elétricas e ópticas do sistema cristalino.
- O *preenchimento incompleto da banda mais alta, ou banda de valência*, corresponde a um *condutor*, pois os subníveis livres da banda permitem que os elétrons aumentem sua energia cinética, isto é, que sejam acelerados por um campo elétrico e conduzam eletricidade (figura 39A). Sendo a luz um campo eletromagnético oscilante, o metal a absorve e reemite, não permitindo sua passagem. O material, portanto, será condutor, refletor ou opaco.
- O *preenchimento completo da banda de valência* corresponde a um *não condutor*, pois a falta de subníveis livres na banda não permite que os elétrons aumentem sua energia cinética, ficando assim impedidos de reagirem ao campo elétrico. Só poderiam conduzir eletricidade se pudessem “pular” para a próxima banda livre, chamada de *banda de condução*, o que só ocorre sob circunstâncias especiais.
- *Quando o intervalo entre as bandas de valência e de condução for relativamente pequeno*, a simples exposição do cristal à luz visível pode prover esse salto, desde que a frequência f da luz seja suficiente para que a energia hf dos fótons supere o intervalo de energia entre as bandas ($hf \geq \Delta E$) (figura 39B), e os elétrons “catapultados” vão encontrar níveis livres na banda superior e deixar

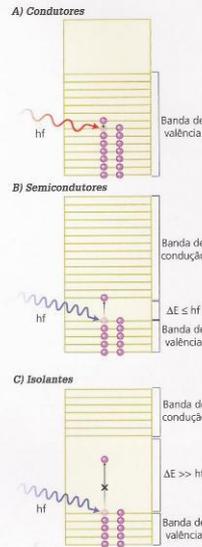
ATIVIDADE 17

FOTOCÉLULAS MODERNAS

O elevador ilustrado na página 13 usa um modelo antiquado de “fotocélula”, baseado no efeito fotoelétrico. Hoje, os elevadores usam células baseadas em semicondutores. Nesse caso, explique como o motor da porta do elevador liga ou desliga dependendo da incidência de luz.

lacunas na banda da qual saíram. O material com essas características é, por definição, um *semicondutor*, ou seja, conduz eletricidade se exposto a luz de frequência maior do que $\frac{\Delta E}{h}$ e é transparente a luz de frequência inferior a $\frac{\Delta E}{h}$. Aliás, isso também determina a cor do cristal!

- Quando o intervalo entre as bandas de valência e de condução for relativamente grande, nem a exposição à luz visível consegue levar elétrons a saltarem o intervalo de energia da banda. O material com essas características é, portanto, um *isolante* e, em forma cristalina, é transparente à luz (figura 39C). Essa última afirmação tem exceções, pois nem sempre os isolantes, a exemplo da madeira seca, são cristais puros e transparentes, mas não conduzem eletricidade pela mesma razão. Aliás, madeira úmida pode ser condutora, porém pelo movimento de íons em seus fluidos, como acontece com a água salgada.
- A estrutura de bandas não depende apenas dos átomos de que o material é feito, como também da *maneira com que seus cristais estão arranjados*. O mesmo carbono que faz parte da estrutura da madeira pode, em forma pura, se cristalizar como grafite, condutor de aspecto metálico, ou como diamante, semicondutor "branco", transparente a quase toda a luz visível. A propriedade dos materiais semicondutores de conduzir corrente elétrica quando iluminados com luz de determinada frequência torna possível o funcionamento de dispositivos como as fotocélulas, que podem fechar e abrir circuitos elétricos automaticamente, a exemplo das lâmpadas de iluminação urbana, acionadas pelo cair da noite e nascer do dia. Entretanto, há ainda uma manipulação desses materiais que tem acelerado a evolução tecnológica eletrônica. A dopagem de semicondutores, que é a introdução de uma pequena quantidade de outro elemento químico adequado em sua estrutura cristalina, pode intensificar e modificar suas características, permitindo seu uso na produção de diodos, transistores e circuitos integrados. A operação dos semicondutores assim manipulados (extrínsecos) é um pouco mais complexa do que a dos naturais (intrínsecos):
- Em qualquer semicondutor, o salto de elétrons para a banda de condução, em que podem se mover, também deixa incompleta a banda de valên-



Figuras 39
Nos materiais condutores de eletricidade (figura A), a banda mais alta é parcialmente preenchida e mesmo fótons de baixa frequência podem ser absorvidos por elétrons que saltam entre os diversos subníveis livres dessa banda. Tanto nos materiais semicondutores (figura B) como nos isolantes (figura C), a banda mais alta está totalmente preenchida por elétrons, que só podem alcançar níveis de energia mais altos se absorverem fótons de energia suficiente para "empurrá-los" até a banda superior, o que corresponde a fótons de luz visível em semicondutores.

ATIVIDADE 133
COR E CONDUÇÃO ELÉTRICA DE SEMICONDUCTORES
Com base na discussão e cálculos sugeridos na atividade 5, "Quanto vale o quantum de energia?", e nos argumentos apresentados no texto principal sobre a energia necessária para que elétrons de materiais semicondutores possam saltar da banda de valência para a banda de condução, explique as relações da largura do intervalo entre as bandas com as características de cor e transparência apresentadas na tabela a seguir.

MATERIAL SEMICONDUCTOR	INTERVALO DE ENERGIA, ΔE, ENTRE A BANDA CHEIA E A PRIMEIRA BANDA VAZIA	APARÊNCIA DO MATERIAL
Diamante	5,6 eV	Transparente
Carbeto de silício	3,1 eV	Azul-esverdeado
Enxofre	2,4 eV	Amarelo
Silício	1,1 eV	Não transparente, de aspecto metálico

4.2 Radiações, materiais, átomos e núcleos

Figura 40
Nos materiais semicondutores, que têm quatro elétrons no último nível eletrônico, o salto de um elétron para a banda de condução deixa uma lacuna positiva na banda de valência e gera um movimento sucessivo de elétrons dentro dessa banda.

Lacuna deixada pelo elétron que "subiu"
Elétron livre
Deslocamento sucessivo de elétrons por lacunas

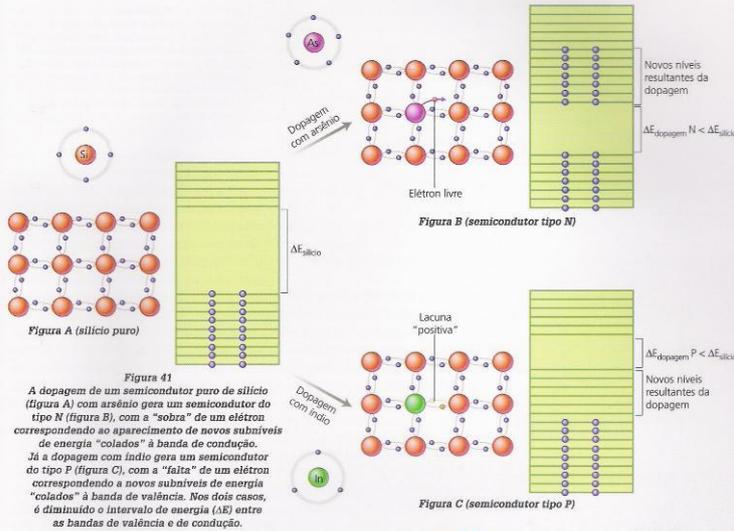
ATIVIDADE 19
ILUMINAÇÃO E CONDUÇÃO ELÉTRICA DE SEMICONDUTORES
Na atividade "Quanto vale o quantum de energia?", da página 13, você foi orientado a calcular os valores de quanta de energia correspondentes a algumas radiações. Compare, agora, o resultado desses cálculos com os valores apresentados na tabela da atividade "Cor e condução elétrica de semicondutores", da página anterior, e avalie se os materiais que lá aparecem – diamante, carbeto de silício, enxofre e silício – passam a conduzir eletricidade quando iluminados pelas seguintes radiações:
a) luz infravermelha de $1,5 \cdot 10^{14}$ Hz.
b) luz vermelha de $4,5 \cdot 10^{14}$ Hz.
c) luz azul de $6 \cdot 10^{14}$ Hz.
d) luz ultravioleta de $2,5 \cdot 10^{14}$ Hz.

cia, que passa a apresentar um movimento "extra" dos elétrons que permaneceram nela, como carros em um estacionamento cheio, que se movimentam sucessivamente quando aparecem lacunas deixadas por carros que saíram (figura 40).

- Nos *semicondutores intrínsecos, ou puros*, o número de lacunas é igual ao número de elétrons que saltaram para a banda de condução. A dopagem altera esse equilíbrio, dando origem aos *semicondutores extrínsecos*, que podem ser do *tipo P*, de "positivo", ou do *tipo N*, de "negativo".
- Um semicondutor, como o silício, tem quatro elétrons de valência (figura 41A). Assim, a *dopagem de tipo N* é feita com materiais com cinco elétrons de valência, como o arsênio, que, ao ficar rodeado pelos átomos do semicondutor, se estabiliza com as quatro ligações covalentes, "sobrando" um elétron fracamente atraído pelo núcleo atômico, o que pode ser interpretado como o aparecimento de *novos subníveis de energia "colados" à banda de condução* (figura 41B).
- A *dopagem de tipo P* é feita com materiais com três elétrons de valência, como o índio, pois nesse caso faltará um elétron para completar uma das quatro ligações covalentes com o átomo de silício, facilitando o movimento por lacunas, interpretado como *novos subníveis de energia "colados" à banda de valência* (figura 41C).

O controle da condução elétrica dos semicondutores tem tido resultados tecnológicos surpreendentes, como também pode ser visto no fascículo *Comunicação e informação*. A junção PN, de um semicondutor do tipo P com outro do tipo N, dá origem aos diodos (figura 42), dispositivos que conduzem corrente elétrica em um único sentido, essenciais nos aparelhos

ESCOLAS ASSOCIADAS
ENGENHO MEIO



que, como a TV, são conectados à rede elétrica de corrente alternada por uma tomada, mas que têm elementos que só funcionam com corrente contínua.

Junções PN são também a base do funcionamento dos LEDs (*light emitting diodes*), diodos que emitem luz a partir dos saltos de elétrons da região N que se combinam com lacunas da região P (figura 43A). O efeito contrário, ou seja, a absorção de fótons por elétrons da região P que saltam para a região N (figura 43B), é utilizado pelas células fotovoltaicas, que convertem diretamente a energia solar em elétrica. A partir dos LEDs, desenvolveram-se também os *lasers* (*light amplifications by stimulated emission of radiation*) de estado sólido, ou seja, uma versão *laser* dos LEDs. Em outras palavras, já existem diodos emissores de luz coerente, como os usados nos sinalizadores *laser-point* e também nos aparelhos de CD e DVD.

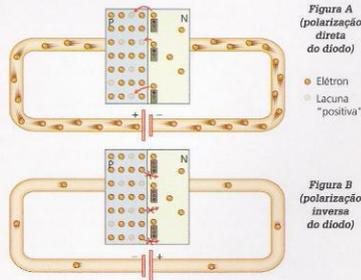


Figura 42
 Um diodo só conduz corrente elétrica quando polarizado de acordo com o esquema da figura A, em que o preenchimento das lacunas da região P é intensificado pelos elétrons "em excesso" da região N. No sentido inverso (figura B), a corrente é impedida, pois não há elétrons "em excesso" na região P nem lacunas na região N.

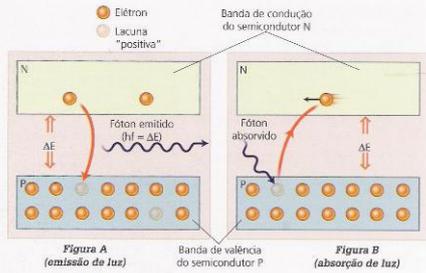


Figura 43
 A luz emitida por LEDs e lasers de semicondutores corresponde a fótons emitidos pelo "descalento" de elétrons da banda de condução da região N para a banda de valência da região P, feita em lacunas positivas (figura A). O salto em sentido contrário, de elétrons da região P para a região N, é feito mediante a absorção de fótons, o que possibilita a conversão de energia solar em elétrica por células fotovoltaicas (figura B).

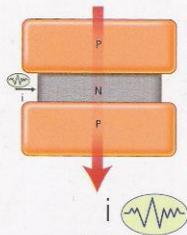
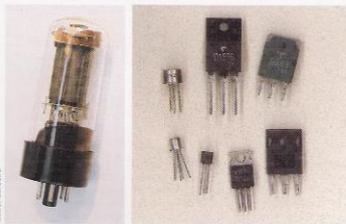


Figura 44
 Em um transistor PNP, há grande amplificação da corrente elétrica injetada na região N.

Figura 45
 As volumosas válvulas e outros componentes de antigos circuitos eletrônicos foram substituídos por transistores e chips microeletrônicos.



ESCOLAS ASSOCIADAS
 ENSINO MÉDIO

"fatias de pão", através desse recheio (figura 44). A combinação de inúmeros diodos e transistores sobre uma mesma base cristalina permitiu a invenção dos circuitos integrados monocristalinos, ou *chips*, presentes em qualquer computador e praticamente em todo aparelho eletroeletrônico. Um *chip* é um pequeno retângulo com cerca de 0,5 mm de espessura e área que varia de milímetros quadrados a centímetros quadrados, feito de material semicondutor, como o silício, com uma complexa superposição de dopagens P e N, constituindo uma "arquitetura microscópica" com até milhões de componentes e conexões eletrônicas, capaz de processar informações de qualquer natureza com grande rapidez (figura 45).

AS MOLÉCULAS DA VIDA E AS RADIAÇÕES

A vida que conhecemos, como a nossa, não se sustenta sem a radiação solar, pois é a fotossíntese, realizada por vegetais a partir da luz do Sol, que dá início a toda a cadeia alimentar envolvendo o conjunto das muitas espécies vivas. Cada ecossistema, cada conjunto de espécies interligadas em cada região, depende do clima e da geografia locais, que estão diretamente associados ao regime de radiação: em latitudes polares, por exemplo, há em média bem menos horas diárias de luz solar direta do que em zonas equatoriais, o que condiciona o tipo de vegetais e animais que podem viver nessas regiões; seres vivos que habitam locais de grandes altitudes e de atmosfera mais rarefeita, como os Alpes ou os Andes, recebem maior intensidade de radiação cósmica e de alta frequência do que os que vivem no fundo dos oceanos ou dos vales, o que também interfere em seu desenvolvimento.

Também no surgimento da vida na Terra, tudo indica que a radiação foi essencial para sintetizar as primeiras moléculas orgânicas, que hoje são produzidas sobretudo por seres vivos. As principais teorias sobre a origem da vida no Universo baseavam-se na hipótese da preexistência de compostos orgânicos. Por isso, realizaram-se experiências mostrando que certas moléculas orgânicas podem ser produzidas artificialmente, a partir de substâncias elementares, em uma solução aquosa submetida

feita, como os Alpes ou os Andes, recebem maior intensidade de radiação cósmica e de alta frequência do que os que vivem no fundo dos oceanos ou dos vales, o que também interfere em seu desenvolvimento.

Também no surgimento da vida na Terra, tudo indica que a radiação foi essencial para sintetizar as primeiras moléculas orgânicas, que hoje são produzidas sobretudo por seres vivos. As principais teorias sobre a origem da vida no Universo baseavam-se na hipótese da preexistência de compostos orgânicos. Por isso, realizaram-se experiências mostrando que certas moléculas orgânicas podem ser produzidas artificialmente, a partir de substâncias elementares, em uma solução aquosa submetida

a descargas elétricas e a intensa radiação, como a que atingia a superfície da Terra em uma época em que nossa atmosfera ainda não tinha a constituição que tem hoje. Aliás, foi em consequência da vida que a atmosfera terrestre tornou-se tão rica em oxigênio, de que tanto necessitamos, e também menos transparente a radiações como o ultravioleta.

Na realidade, todos os seres vivos continuam expostos a diferentes doses de diversas radiações naturais, como a radiação térmica, ou infravermelho, a luz visível, do vermelho ao violeta, e as radiações de maior frequência, do ultravioleta à radiação cósmica. Sobretudo estas últimas ainda são responsáveis por contínuas alterações na estrutura química dos seres vivos, muitas vezes resultando em mutações. É claro que, hoje, além das radiações naturais, há também aquelas produzidas de forma artificial, que usamos propositalmente, em exames radiológicos, por exemplo, ou que nos atingem por acidente e às vezes nos causam danos. Como tudo o mais na natureza e nas técnicas, as radiações podem ser essenciais em certos processos úteis e, ao mesmo tempo, constituir ameaça ou risco.

Sem uma compreensão da relação essencial entre as radiações e a vida, não é possível avaliar a importância ou o perigo da exposição de seres vivos a determinadas formas de radiação. Quando, há mais de um século, foram descobertos os raios X, com sua capacidade de penetração nos tecidos orgânicos, e a radiatividade natural de certas substâncias químicas, como o rádio, não havia ainda conhecimento de como essas radiações interagiam com a matéria em geral, muito menos com a matéria viva. Além do uso dos raios X em diagnósticos de fraturas e tumores, houve então uma indiscriminada propagação de poderes magicamente curativos de toda forma de radiação.

Só meio século depois, com o desenvolvimento da biologia molecular, que desvendou os mecanismos de organização e reprodução da vida, codificados em longas moléculas, como o DNA, é que foi possível perceber como as radiações, que podem quebrar ligações químicas, alteram genes e produzem mutações. Essas mutações promoveram a diversidade necessária para a evolução das espécies, mas também são responsáveis por vários tipos de malformações celulares, principalmente aquelas conhecidas como câncer. Assim, a radiação que diagnostica e que cura não é nada diferente da que prejudica e mata.

Hoje, é tão variada a utilização de radiação em associação com a vida, especialmente nas áreas médicas, que seriam necessários vários livros só para descrever com algum detalhe as principais técnicas empregadas. Entre as formas mais tradicionais estão os raios X, que, com base no fato de diferentes tecidos serem mais ou menos radiopacos, ou seja, apresentarem distintas transparências a essa radiação, são usados para impressionar filmes fotográficos que permitem ver através de corpos vivos. O emprego de equipamentos de computação possibilita também a formação de imagens tridimensionais, o que se chama de tomografia computadorizada.

Outro uso tradicional, antigamente denominado “banho de luz”, é a aplicação de infravermelho e de diferentes frequências de luz visível, em processos de ação local, como aquecimento terapêutico ou bronzeamento artificial de caráter cosmético. Nesses casos, a interação luz-matéria promove a agitação térmica das moléculas atingidas ou mesmo a queimadura superficial. Dependendo da frequência, pode haver maior ou menor risco, tanto quanto em banhos de sol, especialmente na presença de radiação ultravioleta, que pode ser cancerígena.

ATIVIDADE 20

AS RADIAÇÕES E A ORIGEM DA VIDA

1. Veja ou reveja a experiência de síntese artificial de compostos orgânicos realizada por Miller e Urey, cuja descrição pode ser encontrada em obras de biologia, como o fascículo *Vida, suas esferas e seus códigos* (p. 21), e identifique o caráter cíclico das transformações pelas quais passam as substâncias ao se tentar reproduzir a dinâmica da atmosfera primitiva.
2. Discuta, então, com seus colegas:
 - a) Que comparação se pode fazer entre essa reação de síntese e outras reações químicas que frequentemente dependem do fornecimento de calor?
 - b) Que distinção é possível apontar entre a função da radiação que promoveu a síntese dos primeiros compostos orgânicos e a função da radiação que, na atualidade, participa da fotossíntese?
 - c) Quais as principais diferenças se imagina haver entre a atmosfera primitiva e a de hoje e como isso interfere no tipo de radiação que chega à superfície terrestre?
 - d) Essa síntese primitiva já garante o surgimento da vida ou é apenas uma das condições iniciais para tal surgimento?
 - e) Em que situações ou condições no Universo – por exemplo, em algum planeta em órbita de alguma estrela – se imagina possa também ter surgido, ou vir a surgir, vida comparável à que existe na Terra?

ATIVIDADE 21

TRANSPARÊNCIA E OPACIDADE ÀS RADIAÇÕES

Quando observamos contra a luz certas flores ou certos animais, como uma lagartixa que caminha sobre o vidro de uma janela, podemos perceber sua estrutura ou ossatura através da semitransparência de suas partes. A pele e os músculos da lagartixa são mais translúcidos que seus ossos. Isso já seria uma radiografia do animal, feita com luz visível. No caso dos raios X, que não são visíveis, é preciso revelar o filme impressionado por essa radiação ou usar uma câmera de TV sensível a ela. De toda forma, o princípio é sempre a maior ou menor transparência ou opacidade.

Compare um negativo de filme comum, preferencialmente branco e preto, com uma imagem típica de filme de raios X e discuta com seus colegas os seguintes aspectos:

- a) A formação da imagem, nos dois casos: por absorção e reflexão da luz incidente, pelo objeto fotografado, e por absorção e transmissão dos raios incidentes, pelo objeto radiografado.
- b) As diferentes capacidades de absorção das partes da superfície fotografada comparadas com as diferentes capacidades de absorção dos volumes radiografados.
- c) A possível comparação entre a transparência à luz visível e aos raios X, em função da composição química e estrutura física dos tecidos - por exemplo, de osso, carne e pele.

Figura 46
Imagem da coluna cervical obtida com a técnica da ressonância nuclear magnética.

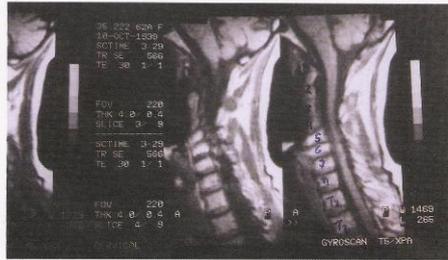
ESCOLAS ASSOCIADAS
ENSINO MÉDIO

Certos tipos de câncer, aliás, podem ser causados por exposição excessiva a determinadas radiações, mas outros costumam ser tratados usando-se radiações. Em ambos os casos o princípio é o mesmo: a quebra de ligações químicas de moléculas orgânicas. Nesse uso terapêutico das radiações, aponta-se o feixe de radiação, gama ou beta, por exemplo, para uma região do corpo em que há um tumor canceroso, com o objetivo de matar as células alteradas pela doença. Certamente, células sãs também são atingidas, assim como se produzem queimaduras locais, efeito colateral do tratamento, mas a expectativa é que a resistência e a capacidade regenerativa do tecido saudável sejam maiores do que as do tecido doente.

Há ainda uma crescente variedade de usos diagnósticos de radiações cada vez mais sofisticados, que permitem uma observação do metabolismo em ação, como a realização de raios X sucessivos, observados e filmados em equipamentos de TV, em organismos nos quais estão sendo injetados fluidos radiopacos, por exemplo, no sistema circulatório ou respiratório. Ainda mais surpreendente é a chamada cintilografia, obtida pela injeção de substâncias orgânicas "marcadas" por elementos radiativos que, a sua passagem, vão emitindo radiação que é "vista" externamente por equipamentos de radiodeteção.

A maior parte dos métodos de radiodiagnóstico se baseia na diferente reação dos vários tecidos vivos à radiação que recebem. Essa diferença depende, como discutimos, sobretudo das substâncias que compõem os tecidos. Até mesmo o núcleo dos átomos dessas substâncias pode ser importante para a observação do interior da matéria viva. Um método denominado ressonância nuclear magnética, ou simplesmente RNM, faz uso da aplicação de um campo magnético variável e intenso, ao qual reagem sobretudo os prótons, que ressoam como ínfimos ímãs giratórios no interior dos núcleos atômicos. Um "mapa" da posição dos prótons é assim obtido e, a partir dele, tem-se uma imagem espacial das substâncias e de suas concentrações (figura 46). Como a energia dos fótons dessa radiação é milhões de vezes menor do que a dos raios X, é também comparativamente menor o risco ao paciente que faz uso dessa técnica.

Dois comentários podem servir de fecho a este tópico e a este fascículo, no sentido de recuperar uma visão mais geral das radiações e de sua relação



com a matéria: o primeiro é para lembrar que muitas das técnicas e conceitos que acabamos de tratar, como radiografias, unidades e medidores de radiação, não se restringem às áreas médicas, mas são também importantes na indústria, como a radiografia de peças, ou na mineração, como a localização de jazidas; o segundo comentário é para recordar que as radiações, que agora revelam o interior de seres vivos, há muito tempo nos permitem enxergar a estrutura infinitesimal de cristais, moléculas, átomos e seus núcleos. Em outras palavras, ao observar flores, tumores ou outros interiores, o que vemos mesmo são radiações, a olho nu ou através de instrumentos; o resto, matéria ou estruturas, são interpretações!



Figura 47
O contador Geiger é um dos instrumentos mais comuns na detecção de radiações.

© 1999 Topham Photograph

EQUIPAMENTOS DE RADIODETECÇÃO E UNIDADES DE DOSES RADIATIVAS

Nas usinas nucleares, nos laboratórios radiológicos e em várias áreas científicas e industriais, é muito importante a detecção da presença de radiação e a medida de sua energia.

Você já deve ter ouvido falar, por exemplo, no contador Geiger, um dos instrumentos mais comuns utilizados para essa tarefa. Seu funcionamento é bem simples: um gás é colocado dentro de uma câmara, transparente às radiações ionizantes, entre dois eletrodos eletricamente carregados, um positivo e outro negativo; se for detectada alguma corrente elétrica entre esses eletrodos, é sinal de que

o gás sofreu ionização e, portanto, há radiação no ambiente (figura A).

Um pouco mais sofisticado é o detector de diodo semicondutor, que também acusa o aparecimento de uma corrente elétrica quando há presença de radiação. A diferença é que a corrente elétrica é gerada pela polarização que ocorre no diodo, quando a radiação incidente é absorvida por elétrons que saltam da região P para a região N (figura B).

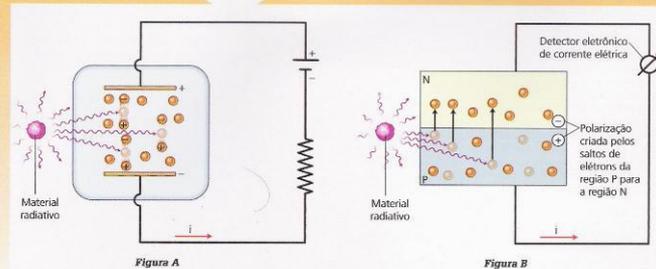
Há ainda diversos outros tipos de detectores de radiação, cuja escolha depende não apenas do custo de fabricação e operação, como também da radiação a ser medida.

Deve-se escolher, também, a unidade para expressar o resultado da medida da radiação. Uma das mais comuns é o

rad (roentgen absorbed dose), que equivale à absorção de 10^{-4} J de energia por quilograma de massa do material atingido pela radiação.

Como doses iguais de radiações diferentes podem causar danos biológicos distintos, é também comum a utilização do rem (radiation equivalent in man), que corresponde ao dano biológico causado por 1 rad de radiação gama. Dano muito maior do que 1 rad de radiação gama é causado, por exemplo, por 1 rad de partículas alfa de grande energia, equivalente a 20 rem. É nessa unidade que são expressos os valores de doses máximas anuais recomendadas a trabalhadores que utilizam aparelhos radiológicos: 5 rem para o corpo todo, 15 rem para a pele, 30 rem para o braço dianteiro e 75 rem para as mãos.

CONEXÃO



Em um contador Geiger (figura A) a presença de radiação é detectada pela ionização do gás, enquanto no detector de diodo semicondutor (figura B) a radiação é absorvida, causando transferência de elétrons da região P para a região N.

ESCOLAS ASSOCIADAS
ENGENHO MÉDIO

COMO FAZER

ANÁLISE DIMENSIONAL

Para cada grandeza física há diversas opções de unidades. Valores de energia, por exemplo, podem ser expressos em joule (J), se for utilizado o Sistema Internacional de Unidades (SI), quilowatt-hora (kWh), tonelada equivalente de petróleo (TEP) ou elétron-volt (eV). A conversão de unidades é útil em situações como a avaliação de ordens de grandeza, enquanto a verificação das unidades permite conferir a adequação da unidade empregada.

Consideremos uma conta de luz mensal de 100 kWh. Pois bem, quilowatt (kW) é uma unidade de potência, que é trabalho pelo tempo, ou seja, 1 000 J/s, e uma hora (h) são 3 600 segundos. Assim, a conta mensal é de $100 \cdot \frac{1000 \text{ J}}{\text{s}} \cdot 3600 \text{ s} = 360$ milhões de joules.

Nesta última unidade, talvez não seja fácil "compreender" a conta, mas, em kWh, vê-se que o que se pagou equivale a 1 000 horas de uma lâmpada de 100 W ou 500 horas de uma lâmpada de 100 W mais 10 horas de um chuveiro de 5 000 W, e assim por diante.

Mesmo levando em conta apenas as definições do SI, é possível realizar conversão entre unidades. O newton (N), por exemplo, pode ser expresso como $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, pois, pela segunda lei de Newton, a força é dada pelo produto da massa (kg) pela aceleração $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{m} \cdot \text{s}^{-2}\right)$. Pode-se, então, dizer que a fórmula dimensional da força é $[F] = [M] \cdot [L] \cdot [T]^{-2}$, em que M, L e T correspondem aos símbolos dimensionais de massa, comprimento e tempo, respectivamente.

No caso da força peso, na superfície da Terra, tem-se $P = mg$, com $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. No entanto, no fascículo *Transportes, esportes e outros movimentos*, o campo gravitacional é expresso em outra unidade, ou seja, $g = 10 \text{ N/kg}$. Na realidade, não há contradição, uma vez que $10 \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{kg}} = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Portanto, ainda que sejam conceitos físicos distintos, campo gravitacional e aceleração têm a mesma dimensão, $[L] \cdot [T]^{-2}$, o que leva diversos autores a denominar g como o "campo gravitacional junto à superfície da Terra" ou como a "aceleração da gravidade".

Se, em vez do produto força pela aceleração, for feito o da força pelo deslocamento, obtêm-se o trabalho, $T = Fd$, cuja fórmula dimensional é $[M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-2}$, não por acaso a mesma da energia cinética, $E_c = \frac{1}{2} mv^2$, da energia potencial gravitacional, $E_p = mgh$, da relação de equivalência entre massa e energia, $E = mc^2$, da energia de fótons, $E = hf$, ou de qualquer outro tipo de energia, pois trabalho é a medida da energia transferida ou transformada pela aplicação de uma força.

A análise dimensional na verificação do uso correto de unidades é um instrumento universal, o que justifica sua presença em diversos exames. Uma questão do Enem 2001, por exemplo, pedia para apontar um erro conceitual relacionado às unidades de medida no seguinte texto, transcrito de um jornal de grande circulação:

"O Brasil tem potencial para produzir pelo menos 16 mil megawatts por hora de energia a partir de fontes alternativas. Somente nos Estados da região Sul, o potencial de geração de energia por intermédio das sobras agrícolas e florestais é de 5.000 megawatts por hora. Para se ter uma idéia do que isso representa, a usina hidrelétrica de Itaipu, uma das maiores do país, na divisa entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, gera 1.450 megawatts de energia por hora".

Como vimos há pouco, uma unidade possível para energia é kWh e, portanto, também MWh, mas MW/h não faz sentido algum.

Suponha, agora, que lhe sejam dadas quatro alternativas – potência, energia, força e quantidade de movimento – como resposta a uma questão sobre a dimensão de uma grandeza física X, definida por $X = k \cdot d \cdot A \cdot v^2$, em que k é uma constante adimensional, d tem dimensões de densidade, A de área e v de velocidade.

É provável que nem você nem mesmo seu professor de física tenham conhecimento de tal expressão. Ainda assim, o procedimento de resolução é simples, bastando ter uma boa compreensão conceitual em física.

- Em primeiro lugar, lembre-se do significado de cada grandeza física que aparece na expressão dada e das unidades de medida correspondentes: densidade mede a compactação de uma massa em um volume, sendo expressa em kg/m^3 ; área mede a extensão de uma superfície, e sua unidade é o m^2 ; velocidade é o cálculo da rapidez de um deslocamento, medida em m/s . Em símbolos, escrevem-se $[d] = [M] \cdot [L]^{-3}$, $[A] = [L]^2$, $[v] = [L] \cdot [T]^{-1}$.
- Em seguida substitua as fórmulas dimensionais de cada grandeza na expressão dada a fim de descobrir a dimensão de X: $[X] = [k] \cdot [d] \cdot [A] \cdot [v]^2 = [M] \cdot [L]^{-2} \cdot [L]^2 \cdot [L] \cdot [T]^{-2} = [M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-2}$. Perceba que se utiliza $[k] = 1$, pois a questão informa que essa constante é adimensional, ou seja, não tem unidade.
- Agora, realize a análise dimensional de cada alternativa à solução do problema:
 - quantidade de movimento é o produto da massa pela velocidade, $[p] = [M] \cdot [L] \cdot [T]^{-1}$;
 - força é a rapidez com que se varia a quantidade de movimento, $[F] = [M] \cdot [L] \cdot [T]^{-2}$;
 - como vimos, para a energia vale que $[E] = [M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-2}$;
 - potência é a rapidez com que se transforma ou se transfere energia, $[\text{potência}] = [M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-3}$, sendo esta, portanto, a resposta procurada.



ESCOLAS ASSOCIADAS

Rua Barão do Rio Branco 283
04753-000 São Paulo SP
T 11 5687 3511
F 11 5548 0534
www.pdea.com.br
ea@pdea.com.br

ISBN 85-7481-176-9



9 788574 811765