

## APRESENTAÇÃO

A presente edição da *Revista de Educação* da APEOESP contém subsídios para os professores e professoras da rede pública estadual, associados do nosso sindicato, que se inscreverão nos próximos concursos públicos promovidos pela Secretaria de Estado da Educação e que participarão das provas instituídas pelo governo.

Organizada pela Secretaria de Formação, esta publicação contém as resenhas dos livros que compõem a bibliografia dos concursos, realizadas por profissionais altamente qualificados, de forma a contribuir para que professores e professoras possam obter o melhor desempenho nas provas.

E, neste momento tão importante, que é a publicação da revista, não poderíamos deixar de registrar nossa posição contrária às avaliações excludentes que vêm sendo promovidas pela Secretaria Estadual da Educação que, além disso, desrespeita os professores ao divulgar extensa bibliografia a poucos dias da prova, contendo vários títulos esgotados.

Esperamos, apesar disso, que todos os professores possam extrair o máximo proveito desta edição da *Revista de Educação*, obtendo alto rendimento nas provas dos concursos e avaliações.

Nossa luta por mais concursos prossegue, com a periodicidade necessária a uma drástica redução no número de professores temporários, a qual agregando mais qualidade ao ensino e profissionalizará, cada vez mais, o magistério estadual. A periodicidade dos concursos a cada quatro anos – com ritmo mais acelerado nos próximos dois anos – foi uma conquista nossa e vamos exigir que seja efetivada.

A Diretoria

## ÍNDICE

1. AMALDI, Ugo. **Imagens da física**: as ideias e as experiências do pêndulo aos quarks. São Paulo: Scipione, 2007.
2. AZEVEDO, Maria Cristina P. S. de. **Ensino por investigação**: problematizando as atividades em sala de aula. In: CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. (Org.). **Ensino de ciências**: unindo a pesquisa e a prática. São Paulo: Thomson, 2005. p. 19-33.
3. BEN-DOV, Yoav. **Convite à Física**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1996.
4. BERMANN, Célio. **Energia no Brasil**: para quê? para quem? Crise e alternativas para um país sustentável. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2003.
5. CACHAPUZ, Antonio et al. **A necessária renovação do ensino de Ciências**. São Paulo: Cortez, 2005.
6. CHAVES, Alaor S.; VALADARES, Eduardo C.; ALVES, Esdras G. **Aplicações da Física Quântica**: do transistor à nanotecnologia. São Paulo: Livraria da Física. 2005. (Temas Atuais de Física/SBF).
7. DELIZOICOV, Demétrio; ANGOTTI, José André; PERNAMBUCO, Marta Maria. **Ensino de Ciências**: fundamentos e métodos. São Paulo: Cortez, 2003.
8. EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold. **A evolução da Física**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar. 2008.
9. FEYNMAN, Richard. **Física em 12 lições**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 2009.
10. FRIAÇA, Amâncio (Org.). **Astronomia**: uma visão geral do universo. São Paulo: EDUSP, 2002.
11. \_\_\_\_\_. GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA. Física. São Paulo: EDUSP, 2001/2005. v. 1, 2 e 3.
12. HEWITT, Paul G. **Física conceitual**. 9. ed. São Paulo: Bookman, 2002.
13. OKUNO, E. **Radiação**: efeitos, riscos e benefícios. São Paulo: Harbra, 1998.
14. RESNICK, Robert; HALLIDAY, David; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2009. v. 1, 2, 3 e 4.
15. ROCHA, José Fernando. **Origens e evolução das ideias da Física**. Salvador: EDUFBA, 2002.

1. AMALDI, Ugo. **Imagens da física: as ideias e as experiências do pêndulo aos quarks.** São Paulo: Scipione, 2007.

## Parte 1

### 1. Mecânica

O que é Física? É a ciência que descreve de maneira quantitativa, isto é, com uma linguagem matemática, os fenômenos naturais. Os conceitos de que se utiliza (as grandezas físicas) têm a característica de poderem ser medidos com instrumentos que permitem: a) realizar observações objetivas; b) realizar observações quantitativas; c) elaborar o campo de nossas observações. A Física utiliza-se da Matemática por três diferentes razões: a) os resultados das operações de medida são expressos por números; b) as leis físicas são expressas por formulas matemáticas. O que caracteriza a Física é o método experimental (Galileu, Newton).

### 2. As medidas e os erros de medida

No sistema internacional (SI), as unidades de medida fundamentais são sete: o *metro*, o *segundo*, o *quilograma*, o *ampere*, o *kelvin*, a *candeia* e o *mol*. Nada nos obriga a escolher determinada unidade de medida em lugar de outra. É, porém, importante saber que toda medida é, inevitavelmente, acompanhada de erros, classificados em erros acidentais e sistemáticos. A cada medida associa-se um grau de incerteza que exprime o valor erro. Um modo de estabelecer o grau de incerteza consiste em calcular o erro absoluto e o erro relativo.

### 3. Introdução à mecânica; o movimento uniforme

A mecânica é a parte da Física que estuda o movimento dos corpos. Ela é, tradicionalmente, dividida em **Cinética**, **Estática** e **Dinâmica**. Os conceitos básicos são: o *ponto material*, a *trajetória*, o *sistema referencial*, a *velocidade escalar média* e a *lei horária do movimento*.

### 4. O movimento uniformemente variado

Um ponto material desloca-se com movimento uniformemente variado quando a variação de sua velocidade é proporcional ao tempo em que ocorre essa variação; a aceleração é constante.

A lei horária do movimento uniformemente variado (com partida do repouso) é:

$$S = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2.$$

A aceleração média é dada por  $a = \Delta v / \Delta t$ .

## 5. Os vetores; o movimento circular e o movimento harmônico

O deslocamento, a velocidade e a aceleração são grandezas vetoriais (elas se caracterizam por um número que exprime a medida de sua intensidade), por uma direção e por um sentido. A propriedade que distingue as grandezas vetoriais é a de poderem ser somadas de acordo com uma regra bem definida: a regra do paralelogramo (ou, de modo equivalente, pelo método da poligonal). Grandezas como a duração de tempo, a área e o volume, às quais não é possível associar uma direção, chamam-se escalares. Elas se caracterizam somente por um número e se somam como números.

O vetor-velocidade é definido como a rapidez com que varia o vetor-deslocamento. O vetor - velocidade - instantâneo é sempre tangente à trajetória e está orientado no sentido do movimento. Chama-se velocidade escalar a intensidade do vetor-velocidade, ou seja, seu valor numérico.

O vetor aceleração é definido como a rapidez com que varia o vetor - velocidade - instantâneo.

O movimento circular uniforme é o de um objeto que se move sobre uma circunferência com velocidade escalar constante. O valor da velocidade depende do raio  $r$  e do período  $T$  (o tempo que o ponto material gasta para efetuar uma rotação completa) segundo a relação:  $v = 2 \pi r / T$ .

A frequência  $f$  (o número de giros realizados na unidade de tempo) é inversamente proporcional ao período  $T$ :  $f = 1 / T$ , o vetor velocidade é diferente em cada instante, porque muda continuamente de modo a estar sempre tangente à circunferência. O movimento circular uniforme é, por isso, um movimento "acelerado".

O movimento harmônico é um tipo particular de movimento oscilatório. Ele é obtido projetando-se perpendicularmente sobre uma reta a sombra de um ponto que se desloca com um movimento circular uniforme.

## 6. As forças e o equilíbrio

Damos o nome de força a qualquer causa que inicie ou modifique o movimento de um objeto. Uma força é caracterizada por uma intensidade, uma direção e um sentido. A experiência revela que as forças se somam segundo a regra do paralelogramo (ou com o método da poligonal), e isso nos permite concluir que a força é uma grandeza vetorial.

Duas forças paralelas que têm a mesma intensidade, mas sentidos opostos constituem um binário. Aplicando um binário a um corpo, tem ele o efeito de fazê-lo girar para que o corpo esteja em equilíbrio, não bastando que a soma das forças que nele atuam seja igual a zero. Também deve ser nulo o efeito conjunto dos binários que, eventualmente, lhe são aplicados. Palavras chaves: Binário, Equilíbrio e Força.

## **7. Os princípios da dinâmica**

O objetivo da dinâmica é determinar como se move um objeto quando se conhecem as forças a que está submetido. É possível assim prever, além da trajetória, também a posição e a velocidade que ele apresenta em cada instante de tempo. O primeiro princípio da dinâmica, ou princípio da inércia, afirma que todo objeto continuará a deslocar-se com movimento retilíneo uniforme, se não sofrer a ação de forças que façam sua velocidade variar. A inércia é uma propriedade fundamental da matéria. Ela consiste na tendência que todos os objetos apresentam de continuar a mover-se com velocidade constante. A massa é uma grandeza física (escalar) que mede a inércia de um objeto. Quanto maior a massa, tanto maior a resistência que o objeto apresenta ao ser acelerado. O segundo princípio da dinâmica, ou lei fundamental da dinâmica, afirma que, em cada instante, a aceleração de um objeto é proporcional à força que lhe é aplicada. Ou seja, o vetor-força e o vetor-aceleração têm a mesma direção e sentido. Essa lei é expressa pela fórmula:  $F = m a$ . No sistema Internacional, a massa de um objeto é medida em quilogramas (kg) e a força em Newtons (N). 1 newton é a força que, aplicada sobre uma massa de 1 kg, lhe imprime uma aceleração de 1 m/s.

O terceiro princípio da dinâmica, ou princípio da ação e reação, afirma que, quando um objeto A exerce uma força sobre um objeto B, também B, por sua vez, exerce uma força sobre A. As duas forças têm a mesma intensidade e sentidos opostos:  $F$  de A sobre B = -  $F$  de B sobre A.

## **8. As forças e o movimento**

Na ausência de ar e próximo à superfície da Terra, todos os objetos caem com movimento uniformemente acelerado. Em função da aceleração da gravidade

(g).

O peso de um objeto é proporcional à aceleração da gravidade. A massa, porém, permanece sempre a mesma.

Desprezando a resistência do ar, o movimento de um projétil disparado horizontalmente compõe-se de dois movimentos independentes: um movimento retilíneo uniforme na horizontal e um acelerado na vertical.

Um objeto em movimento circular uniforme sofre uma força centrípeta, que atrai continuamente para o centro de rotação.

A força centrípeta que age sobre um satélite é a força de gravidade. Um objeto em movimento harmônico acha-se submetido a uma força elástica:  $F = -k s$ , onde  $s$  é o deslocamento em relação de repouso e  $k$  é uma constante. Essa força tem intensidade diretamente proporcional ao deslocamento e está apontada em sentido oposto ao do vetor-deslocamento. Para pequenos deslocamentos em relação à posição de equilíbrio, uma mola elástica e um pêndulo movem-se com movimento harmônico. O período de um pêndulo não depende da amplitude da oscilação (desde que pequena) nem de sua massa. Depende somente do comprimento do fio e da aceleração da gravidade  $g$ :  $T = 2\pi \sqrt{l/g}$ . Pode-se utilizar um pêndulo para medir o valor da aceleração da gravidade.

## 9. A gravitação universal

Até cerca de 1600, pensava-se que os fenômenos celestes fossem de natureza completamente diferente dos que ocorriam na Terra. Falava-se, então, em Física terrestre e Física celeste. A lei da gravitação universal, descoberta por Newton, afirma que dois corpos quaisquer se atraem com uma força diretamente proporcional à massa de cada um deles e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa. Na relação:  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$

$r$

$m_1$  e  $m_2$  são as massas dos dois corpos,  $r$  é a distância entre eles e  $G$  é uma constante universal (que não depende dos objetos que se atraem nem de suas posições). O valor de  $G$  é:

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nxm}^2/\text{Kg}^2$$

A velocidade com que um satélite gira em órbita circular diminui à medida que aumenta o raio da órbita. Também o período da órbita diminui com o aumento de  $r$ . Os satélites geoestacionários giram em torno da Terra sobre o plano equatorial a uma distância de 35 900 km da superfície. Há um período de cerca de 24h para um observador que está na Terra. Eles parecem fixos no céu. Em órbita, encontram-se os satélites de comunicação e alguns satélites meteorológicos.

## 10. A conservação da energia

O trabalho realizado por uma força aplicada a um corpo é igual ao produto da intensidade da força pelo valor do deslocamento. O trabalho é uma grandeza escalar medida em joules (J):  $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$ .

A potência é a rapidez com que uma força realiza um trabalho. É definida como a razão entre o trabalho e o tempo gasto para realizá-lo:  $P = W / t$ . A potência é medida em watts (w):  $1 \text{ W} = 1 \text{ J} / 1 \text{ s}$ .

A energia cinética de um corpo é igual à metade do produto de sua massa pelo quadrado de sua velocidade:  $K = 1 / 2 m v^2$ . O trabalho realizado sobre um corpo que está livre para se mover (ou seja, um corpo não submetido a outras forças, a não ser àquela que realiza o trabalho) provoca uma variação de sua energia cinética.

A energia potencial gravitacional: no caso de um corpo que se encontra a uma altura  $h$  do plano de referência, a energia potencial gravitacional é dada por  $U = G h$ , em que  $G$  é o peso do corpo. A energia potencial gravitacional é uma propriedade de um sistema de corpos (por exemplo, o sistema Terra + pedra). A energia potencial elástica de mola comprimida depende de seu grau de compressão. Não havendo atritos, a soma das energias cinética e potencial gravitacional se mantém constante durante o movimento (lei de conservação da energia mecânica). Quando a energia mecânica (cinética + potencial) não se conserva, converte-se em outra forma de energia.

Habitualmente, ela se transforma em energia interna dos corpos, relacionada ao movimento de agitação das moléculas. Generalizando: a energia total (ou seja, a soma da energia mecânica com todas as demais formas de energia) conserva-se. Uma lei de conservação afirma que, durante o desenvolvimento de um fenômeno, há uma grandeza que permanece constante. A quantidade de movimento de um corpo é uma grandeza vetorial definida como o produto da massa pela velocidade desse corpo:  $p = m v$ .

Há fenômenos em que a quantidade de movimento total se conserva (lei de conservação da quantidade de movimento).

## **11. As propriedades da matéria**

Uma molécula é um agregado de átomos. Ela é a menor unidade de que é constituída uma substância. Chamam-se elementos substâncias que não são decomponíveis em outras substâncias mais elementares. Na natureza, existem 92 elementos diferentes. Chama-se movimento browniano o movimento irregular de partículas imersas em um líquido ou em um gás (tais partículas são grandes em relação às moléculas). Esse fenômeno é devido ao bombardeamento que as partículas sofrem por parte das moléculas do líquido ou gás, que estão em continuo movimento (movimento de

agitação térmica). Massa atômica é a massa relativa de um átomo de certo elemento. Ela é expressa tendo como unidade de medida um doze avos da massa do isótopo mais leve do carbono. As massas das moléculas, expressas nessa unidade, recebem o nome de massas moleculares. Entre as moléculas, agem as forças intermoleculares. Essas forças são repulsivas quando a distância entre os centros das moléculas é inferior à dimensão das próprias moléculas. Aumentando a distância, as forças tornam-se atrativas, reduzindo-se a zero quando a distância entre as moléculas é da ordem de 10 m. Segundo prevaleça o efeito da atração entre as moléculas ou o do movimento de agitação térmica, uma substância apresenta-se em um dos três estados de agregação (sólido, líquido, gasoso). Um corpo sólido propriamente dito tem estrutura cristalina. Os líquidos têm volume próprio e são praticamente incompressíveis. Os gases, por sua vez, tendem a expandir-se e são compressíveis.

## 12. Os líquidos e os gases

A pressão  $p$  é definida como a razão entre a intensidade da força  $f$ , que age perpendicularmente sobre uma superfície  $S$ , e a área dessa superfície:  $p = F / S$ . No Sistema Internacional, a pressão é medida em pascais (símbolo: Pa):  $1\text{Pa} = 1\text{N} / 1\text{m}^2$ . A densidade de um corpo (sólido, líquido ou gasoso) é a razão entre sua massa  $m$  e o volume  $V$  que ele ocupa:  $d = m / V$ . Lei de Pascal (válida para líquidos e gases): a pressão exercida sobre uma superfície qualquer de um fluido transmite-se com a mesma intensidade a todas as demais superfícies que estão em contato com o fluido, independente de como essas superfícies estejam orientadas. Lei de Stevin (válida somente para os líquidos): se um líquido está sujeito à força-peso, cada uma de suas camadas está submetida à pressão da parcela do líquido que está acima dela. Essa pressão  $p$  é diretamente proporcional à profundidade  $h$  em que se encontra a camada, à densidade  $d$  do líquido e à aceleração da gravidade  $g$ :  $p = dgh$ . Lei de Arquimedes (válida para líquidos e gases): um corpo imerso num fluido recebe um empuxo para cima igual ao peso do fluido que foi deslocado pelo corpo. A lei de Arquimedes explica a flutuação dos navios e a ascensão dos balões no ar. A pressão atmosférica é a pressão que a atmosfera, devido a seu peso, exerce sobre qualquer corpo nela imerso. A pressão atmosférica ao nível do mar equivale à pressão exercida por uma coluna de mercúrio de 76 cm de altura ou à de uma coluna de água de 10,3 m de altura (ao nível do mar e em condições atmosféricas normais). Seu valor é de aproximadamente 10 Pa ou 1,03 kgf / cm<sup>2</sup>. A pressão atmosférica diminui com a altitude e varia conforme as condições meteorológicas.

Os barômetros são instrumentos para medir o valor da pressão atmosférica. A pressão de gases contidos em recipientes é medida com manômetros.

## Parte 2

### 1. Termologia: os termômetros e a dilatação térmica



A ideia de quente e de frio está baseada em nossas sensações. Para torná-la objetiva, utilizamos o conceito de temperatura. Para medir a temperatura, recorre-se ao fenômeno da dilatação térmica, ou seja, à variação das dimensões que os corpos sofrem quando sua temperatura se altera. Um termômetro é basicamente constituído de um termoscópio (ou seja, um indicador da dilatação térmica) e de uma escala termométrica. Como valor zero da escala Celsius foi escolhida a temperatura do gelo fundente à pressão normal ( $1\text{atm} = 1,01\text{ Pa}$ ), e como valor 100, a temperatura do vapor da água em ebulição a essa mesma pressão. A unidade de temperatura, o grau Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), é a centésima parte do desnível que existe num termoscópio entre os níveis atingidos pelo líquido nessas duas temperaturas (pontos fixos). A dilatação térmica linear de um sólido é o alongamento que uma barra desse material sofre com o aumento de sua temperatura. Verifica-se experimentalmente que a lei da dilatação linear é:  $l_t = l_0 (1 + \alpha t)$ , em que  $l_t$  é o comprimento da barra e a temperatura  $t^{\circ}\text{C}$ ,  $l_0$  é o seu comprimento a  $0^{\circ}\text{C}$  e  $\alpha$  é o coeficiente da dilatação linear (diferente para cada substância). O significado fundamental dessa lei é que o alongamento da barra é diretamente proporcional ao aumento da temperatura. A dilatação térmica volumétrica é a variação do volume de um corpo ocorrida quando sua temperatura se altera. A lei da dilatação volumétrica é:  $V = V_0 (1 + \gamma t)$ , em que  $V$  indica o volume do corpo à temperatura de  $t^{\circ}\text{C}$ ,  $V_0$  é o seu volume a  $0^{\circ}\text{C}$  e  $\gamma$  é o coeficiente de dilatação cúbica. Tanto para sólidos como para líquidos,  $\gamma$  difere de uma substância para outra. A água tem um comportamento anômalo com relação a outros líquidos. De  $0^{\circ}\text{C}$  a  $4^{\circ}\text{C}$ , seu volume diminui. Acima de  $4^{\circ}\text{C}$ , ele volta a aumentar normalmente. Nessa temperatura, a água atinge sua máxima densidade.

## 2. As leis dos gases e o significado da temperatura

Lei de Boyle: sob temperatura constante, o volume de uma dada massa de gás é inversamente proporcional à sua pressão, ou seja:  $p V = \text{constante}$  em que  $p$  e  $V$  são, respectivamente, a pressão e o volume.

Primeira lei de Gay - Lussac: mantendo constante a pressão, ao variar a temperatura  $t$ , o volume de uma dada massa de gás varia segundo a lei:  $V = V_0 (1 + \gamma t)$ ,  $V$  e  $V_0$  representam o volume do gás respectivamente a  $t^{\circ}\text{C}$  e a  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $\gamma$  é uma constante igual a  $1/273$ .

Segunda lei de Gay- Lussac: mantendo constante o volume, ao variar a temperatura  $t$ , a pressão de uma dada massa de gás varia segundo a lei:  $p = p_0 (1 + \gamma t)$ , em que  $p$  e  $p_0$  representam a pressão do gás respectivamente a  $t^{\circ}\text{C}$  e a  $0^{\circ}\text{C}$ . Essas três leis descrevem o comportamento de todos os gases, desde que estejam suficientemente rarefeitos e distantes do ponto de liquidificação. A escala absoluta de temperatura (escala Kelvin) é definida a partir da escala Celsius, mediante a relação:  $T = t + 273$ , em que  $T$  e  $t$  indicam, respectivamente, a temperatura expressa em kelvins e a expressa em graus Celsius. O zero da escala Kelvin corresponde a  $- 273^{\circ}\text{C}$ . Um gás é constituído por um número elevado de moléculas, que se movem continuamente em todas as direções. Esse movimento de agitação térmica faz as moléculas se chocarem entre si e contra as paredes do recipiente. Deve-se a pressão que um gás exerce

contra as paredes do recipiente aos inúmeros choques das moléculas contra essas paredes. As leis da Mecânica, aplicadas aos movimentos das moléculas, permitem determinar a relação que existe entre a energia cinética média das moléculas e a temperatura absoluta  $T$  do gás:  $K_m = \frac{3}{2} k T$ , em que  $k$  é a constante de Boltzmann. Essa equação permite interpretar a temperatura absoluta.

Como uma medida da energia cinética média das moléculas do gás, quanto maior é a temperatura, mais velozmente as moléculas se movem.

### 3. Calor

O calor é energia em trânsito, um fluxo de energia que se transmite de um corpo quente outro mais frio. A energia interna de um corpo é a soma das energias de todas as moléculas que o constituem. Os calores provenientes de um corpo mais

quente e o trabalho realizado por uma força externa são dois modos de aumentar a energia interna de um corpo. A capacidade térmica ( $C$ ) de um corpo é a energia que se deve fornecer a ele para que sua temperatura se eleve de 1 K. O calor específico ( $c$ ) é a capacidade térmica de uma unidade de massa (ou seja, 1 kg). A energia  $Q$ , que é preciso fornecer a um corpo (sob a forma de calor ou através de trabalho) para que sua temperatura aumente de  $T$  kelvins é diretamente proporcional ao calor específico desse corpo e à sua massa:  $Q = cm T$ . Uma caloria é a quantidade de energia que devemos fornecer a 1g de água para elevar sua temperatura de 14,5 °C a 15,5 °C, sob pressão de 1 atm. Uma caloria equivale a 4,186 J. O calor liberado numa reação de combustão provém de uma diminuição da energia interna do sistema combustível + oxigênio. O poder calorífico, ou calor de combustão, mede a quantidade de calor produzida na combustão completa de uma unidade de massa (ou de volume) do combustível. O calor se propaga de um corpo quente a outro mais frio por condução, convecção e irradiação. A condução, que é característica dos corpos sólidos, consiste na propagação de energia através dos choques das moléculas mais velozes, sem que haja deslocamentos de matéria. Em um fluido, o calor se propaga por convecção quando as diferenças de densidade entre as várias partes desse fluido (devido às diferenças de temperaturas) geram correntes que transportam o calor pelo interior de sua massa. Deve-se a propagação do calor por irradiação ao fato de que qualquer corpo emite (e absorve) radiações eletromagnéticas. Elas se deslocam com a velocidade da luz e também se propagam no vácuo. A quantidade de radiação que um corpo emite depende da temperatura em que se encontra. O efeito estufa consiste num aumento de temperatura num ambiente onde as radiações visíveis penetram e as radiações infravermelhas tendem a ficar aprisionadas. A constante solar é a energia que chega do sol a cada segundo sobre uma superfície de 1 m disposta perpendicularmente aos raios solares logo acima da atmosfera terrestre. A constante solar é igual a 1350 W / m. A Terra encontra-se num estado de equilíbrio térmico porque, a cada segundo, irradia para o espaço uma quantidade de energia igual à que absorve do sol.

#### 4. As mudanças de estado

Sob condições propícias de temperatura e pressão, todas as substâncias podem apresentar-se num dos três estados de agregação: sólido, líquido ou gasoso. A mudança de estado de uma substância é a sua passagem de um dos estados de agregação para outro. Para cada substância quimicamente pura, a fusão e a solidificação têm as seguintes propriedades: 1) para cada substância, sob uma dada pressão, a fusão e a solidificação ocorrem a uma temperatura precisa, chamada temperatura de fusão da substância; 2) para fazer fundir uma determinada substância que já se encontra em sua temperatura de fusão, é necessário fornecer-lhe uma quantidade de energia proporcional à sua massa. Durante o processo inverso, ou seja, durante a solidificação, a substância devolve ao ambiente essa mesma quantidade de energia; 3) durante todo o intervalo de tempo em que a fusão ou a solidificação se processa, a temperatura da substância se mantém constante. Chama-se calor latente de fusão de uma substância a quantidade de energia necessária para fundir completamente uma unidade de massa dessa substância, quando ela se encontra em sua temperatura de fusão. A vaporização compreende dois processos diferentes: a evaporação e a ebulição. Dizemos que há evaporação quando o processo ocorre apenas na superfície livre do líquido. Há ebulição, quando a formação de vapor ocorre em toda a massa do líquido. Em ambos os casos, podemos falar de calor latente de vaporização, definido como a quantidade de energia necessária para fazer passar uma unidade de massa da substância do estado líquido ao estado de vapor sem mudança de temperatura. A sublimação é a passagem direta do estado sólido ao gasoso, ou vice-versa. Sob condições normais de temperatura e pressão, poucas substâncias sublimam. A condensação e a solidificação do vapor de água presente no ar são responsáveis por diversos fenômenos atmosféricos: chuva, nuvens, neblina etc.

#### 5. A termodinâmica

A termodinâmica estuda as leis, segundo as quais os corpos trocam (cedendo e recebendo) trabalho e calor com o ambiente que os cercam. Todo sistema (um conjunto qualquer de corpos) tem uma energia interna bem determinada, que depende do estado em que o sistema se encontra. O primeiro princípio da termodinâmica afirma que a variação da energia interna de um sistema é igual à diferença entre a energia que nele entra e aquela que dele sai. Para esses fluxos de entrada e de saída contribuem tanto as trocas de calor como as de trabalho. Isso pode ser expresso com esta equação:  $\Delta U = Q + W$ , em que  $\Delta U$  é a variação da energia interna,  $Q$  é o calor que o sistema recebe do exterior e  $W$  é o trabalho realizado sobre o sistema pelas forças externas. Se o calor sai do sistema, é negativo; se o trabalho é realizado pelo sistema,  $W$  é negativo. Calor e trabalho são energias em trânsito equivalentes, porque tanto uma como outra podem fazer a energia interna de um sistema variar. Ambas podem ser medidas em joules. Quando um gás se expande sob pressão constante  $p$ , realiza este trabalho positivo:  $W$  do sistema =  $p \Delta V$ , em que  $\Delta V$  é o aumento de volume do gás. Uma máquina térmica é um sistema que realiza uma transformação: depois de sofrer uma

série de modificações, ela retorna ao estado inicial. De acordo com o primeiro princípio, o trabalho realizado pelo sistema, durante toda essa transformação, é igual ao calor que o sistema recebeu do exterior:  $W$  do sistema =  $Q$  ao sistema. É sempre possível transformar completamente calor em trabalho, mas a transformação inversa está sujeita a algumas limitações. O segundo princípio da Termodinâmica afirma que não é possível construir uma máquina térmica que transforme integralmente calor em trabalho. Uma parte do calor que o sistema recebe será descartada. Se uma máquina térmica troca calor com o exterior a duas temperaturas diferentes, seu trabalho útil é igual à diferença entre a quantidade de calor  $Q$  recebido da fonte com maior temperatura e a quantidade de calor  $Q$  transferida à fonte com menor temperatura:  $W$  do sistema =  $Q - Q$ . O rendimento de uma máquina térmica é definido como a fração do calor que é efetivamente transformada em trabalho, dentre todo o calor recebido da fonte mais quente. O rendimento máximo de uma máquina térmica que trabalha entre duas fontes de calor com temperaturas absolutas  $T$  e  $T$ , (sendo  $T > T$ ) é dado por:  $r = - T / T$ . Exemplos: o motor a quatro tempos e as máquinas refrigeradoras.

### Parte 3

#### 1. As lentes, o olho e os instrumentos ópticos

As lentes esféricas são corpos refringentes limitados por superfícies esféricas, quando atingidas por um feixe de raios de luz paralelos; as lentes convergentes os fazem convergir para um ponto. As lentes divergentes, ao contrário, os fazem divergir. Limitamo-nos a considerar aqui as lentes delgadas, ou seja, aquelas cuja espessura é pequena em relação aos raios das superfícies esféricas que as delimitam.

O eixo óptico de uma lente é a reta que liga os centros de suas superfícies esféricas.

O foco de uma lente é o ponto do eixo para o qual convergem, depois de refratados, todos os raios que incidem na lente paralelamente ao eixo óptico. A distância focal é a distância do foco ao centro da lente.

A distância fornecida por uma lente convergente pode ser real ou virtual, dependendo da distância do objeto à lente. A imagem formada por uma lente divergente é sempre virtual.

A máquina fotográfica é basicamente uma câmara escura. A luz entra nela por uma abertura regulável (o diafragma) e atravessa um sistema de lentes (a objetiva) que a faz convergir sobre o filme.

O projetor de cinema projeta um grande número de fotografias em rápida sucessão. A sensação de movimento é causada pela persistência das imagens na retina.

O olho é um sistema óptico no qual se sucedem três meios refringentes: a córnea e o humor aquoso, o cristalino, o humor vítreo.

A imagem de um objeto produzida pelo olho é a real e se forma exatamente sobre a retina, que é uma membrana de tecido nervoso constituída pelas terminações do nervo óptico.

No olho míope, a imagem de um objeto muito distante forma-se antes da retina. A miopia é corrigida com uma lente divergente. No olho hipermetrope, a imagem de um objeto muito distante se forma atrás da retina. Para corrigir a hipermetropia, usa-se uma lente convergente.

O microscópio, em sua forma mais simples, é constituído por duas lentes convergentes: a objetiva e a ocular. A objetiva forma uma imagem real, invertida e ampliada.

A luneta astronômica também é constituída por uma objetiva e uma ocular. A objetiva forma uma imagem real, invertida e reduzida, que é posteriormente ampliada e transformada em imagem virtual pela ocular. Exemplos: microscópio

## **2. Óptica: a óptica ondulatória**

Segundo a teoria corpuscular, a luz consiste num fluxo de partículas microscópicas, que são emitidas continuamente pelas fontes luminosas. A teoria ondulatória, por sua vez, sustenta que a luz é uma onda. As duas teorias parecem explicar igualmente bem a propagação retilínea, a reflexão, a refração e a dispersão da luz. No entanto, as medidas da velocidade da luz, realizadas nos diferentes meios de propagação, confirmam as previsões da teoria ondulatória e contrariam as da teoria corpuscular. A teoria ondulatória prevê ainda outros fenômenos: a difração e a interferência da luz. A difração é o fenômeno pelo qual a luz deixa de se propagar em linhas retas. Quando encontra obstáculos, a luz os contorna, invadindo a chamada zona de sombra. Trata-se de um fenômeno característico das ondas, que também se manifesta, por exemplo, na propagação do som ou das ondas sobre a água. A difração torna-se considerável, quando os obstáculos (ou aberturas) têm dimensões comparáveis ao comprimento de onda ou menores que ele. O comprimento de onda da luz pode ser medido por meio da interferência, outro fenômeno típico das ondas. Quando as ondas emitidas por duas diferentes fontes se sobrepõem, seus efeitos se somam de modo tal que, em alguns pontos, as duas perturbações se reforçam (interferência construtiva) e, em outros, se anulam (interferência destrutiva).

Fazendo a luz micrométrica passar através de duas fendas, forma-se, sobre uma tela posta adiante, um padrão de zonas luminosas e zonas escuras alteradas. As ondas luminosas são ondas eletromagnéticas, constituídas de forças elétricas e magnéticas que oscilam no espaço. Diferentemente das ondas elásticas (por exemplo, as ondas sonoras), que precisam de um meio material para se deslocar, as ondas eletromagnéticas propagam-se também no vácuo. A cor de um objeto é aquela que ele reflete em maior quantidade.

## Parte 4

### 1. Eletromagnetismo: quantidade de eletricidade e lei de coulomb

Um corpo eletricamente neutro não é desprovido de cargas, mas contém cargas positivas e negativas em igual número. Um corpo eletricamente carregado contém um excesso de cargas de um dos sinais.

Do ponto de vista de seu comportamento nos fenômenos elétricos, os diferentes materiais se agrupam em duas categorias: condutores e isolantes. Num material condutor, as cargas elétricas podem deslocar-se livremente de um ponto a outro, o que não é possível num material isolante.

A carga elétrica, ou quantidade de eletricidade, é uma grandeza física (escalar), que pode ser medida com um eletroscópio de folhas, uma vez fixada uma unidade de medida.

No Sistema Internacional, a unidade de medida de carga elétrica é o coulomb (C), a carga elétrica elementar, que é a carga (negativa) de um elétron ou (positiva) de um próton, vale  $1,60 \times 10^{-19}$  C.

A lei da conservação da carga afirma que a soma algébrica das cargas elétricas de um sistema isolado se mantém constante, quaisquer que sejam os fenômenos que nele ocorram.

Lei de Coulomb: a força de atração ou de repulsão que age entre dois corpos puntiformes eletrizados são diretamente proporcionais ao produto das quantidades de eletricidade  $Q_1$  e  $Q_2$  que esses corpos possuem e inversamente proporcionais ao quadrado de sua distância  $r$ :

$$F = K_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \text{ em que } K_0 = 8,99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

$\text{C}^2$

Da experiência de Rutherford, conclui-se que o átomo é constituído por um pequeníssimo núcleo positivo circundado por uma região muitíssima mais ampla, onde a carga negativa está dispersa.

Segundo o modelo de Bohr, em torno do núcleo movem-se os elétrons que são partículas negativas. Eles se deslocam em órbitas que se assemelham às dos planetas em torno do Sol. A carga positiva  $q$  do núcleo é sempre um múltiplo inteiro da carga  $e$  do elétron, ou seja:  $q = +Ze$ , em que  $Z$  é um número inteiro chamado número atômico. Como o átomo é, em seu conjunto, neutro,  $Z$  é também igual ao número de elétrons.

### 2. Campo elétrico e o potencial elétrico

Podemos afirmar que uma região do espaço abriga um campo elétrico (ou, simplesmente, que ela é um campo elétrico) quando, ao se colocar num ponto qualquer dessa região um corpo de prova eletricamente carregado, observamos que ele fica submetido a forças de origem elétrica. Esse conceito torna-se mais completo, se utilizarmos a definição de vetor-

camétricp: o vetor campo-elétrico  $E$ , num ponto  $P$  qualquer, é a razão entre a força  $F$  que age sobre a carga puntiforme posta em  $P$  e a própria carga

se colocarmos uma carga  $Q$  num ponto qualquer de um campo elétrico, ela fica sujeita à força:  $F=EQ$ , se o campo elétrico é gerado por uma carga puntiforme  $Q$  situada no ponto  $O$ , sua intensidade no ponto  $P$  pode ser determinada pela lei de Coulomb:

em que  $r$  é a distância entre os pontos  $O$  e  $P$  e  $KO$  é a constante da lei de Coulomb. O campo gravitacional existente num certo ponto é definido de modo análogo ao

campo elétrico. Ele é igual à razão entre a força gravitacional  $G$  que age sobre

a massa de prova  $m$  nesse ponto e o valor dessa massa:  $g = G/m$

M

A palavra campo indica o conjunto dos valores que uma grandeza física assume em cada ponto de uma certa região do espaço. Se a grandeza é representada por um vetor (força, velocidade...), dizemos que o campo é vetorial. Se a grandeza é escalar (pressão, temperatura,...) dizemos que o campo é escalar. Para representar graficamente um campo vetorial (especialmente um campo elétrico), desenhamos linhas do campo. No caso específico do campo elétrico, elas têm a seguinte propriedade: a tangente a uma linha do campo elétrico, num ponto qualquer, fornece a direção do campo elétrico nesse ponto. O sentido do vetor-campo-elétrico é aquele no qual a linha de campo é percorrida. Em todo campo elétrico há energia acumulada, que é chamada de energia potencial elétrica. Toda vez que as forças do campo aceleram uma carga elétrica, essa energia diminui, transformando-se em trabalho. A diferença de potencial elétrico (ou tensão elétrica)  $V$  existente entre dois pontos  $A$  e  $B$  de um campo elétrico é igual à razão entre o trabalho  $W$ , que as forças do campo realizam para deslocar uma carga de prova positiva  $q$  entre  $A$  e  $B$ , e o valor dessa carga:  $V = W/q$

$q^+$

Entre dois pontos do campo elétrico existe uma diferença de potencial de  $1V$  quando as forças do campo realizam um trabalho de  $U$  para deslocar uma carga de  $1C$  de um ponto ao outro:  $1V=1J$

$1C$

O elétron-volt (eV) é a quantidade de energia adquirida por uma carga igual à de um elétron quando ela é acelerada por uma diferença de potencial de  $1V$ . O elétron-volt pode ser expresso em joules, usando-se o valor da carga do elétron:  $1eV=1,6 \times 10^{-19} J$ .

**3. Corrente elétrica:** dizemos que um condutor é percorrido por uma corrente elétrica quando, em seu interior, há uma migração de partículas carregadas. A condição para que ocorra a passagem da corrente é que entre os extremos do condutor exista uma diferença de potencial.

A intensidade da corrente elétrica ( $i$ ) que percorre um condutor é a razão entre a quantidade de eletricidade  $Q$  que atravessa sua seção transversal num intervalo de tempo  $\Delta t$ , ou seja:  $i = \frac{Q}{\Delta t}$

A intensidade da corrente elétrica é uma nova grandeza física (escalar), cuja unidade de medida no Sistema Internacional é o ampere (A):

$$1\text{A} = 1\frac{\text{C}}{\text{s}}$$

$$1\text{s}$$

Dizemos que dois ou mais condutores estão ligados em série, quando estão dispostos em sucessão, ou seja, um em seguida ao outro. Os condutores em série são percorridos pela mesma corrente. Dizemos que dois ou mais condutores estão ligados em paralelo, quando têm suas primeiras extremidades ligadas num mesmo ponto e suas segundas extremidades ligadas em outro ponto. Nesse caso, entre os extremos de cada condutor existe a mesma diferença de potencial.

A relação entre a corrente  $i$  e a diferença de potencial  $\Delta V$  nos condutores metálicos é expressa pela primeira lei de Ohm:  $i = \frac{\Delta V}{R}$

$$R$$

Em que  $R$  é a resistência do condutor. A resistência é uma nova grandeza física (escalar), cuja unidade de medida no Sistema Internacional é o ohm ( $\Omega$ ):

$$1\Omega = 1\frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$\text{TA}$$

Se um condutor tem comprimento  $l$  e seção  $A$ , o valor de sua resistência é dado pela segunda lei de Ohm:  $R = \frac{\rho l}{A}$

Em que  $\rho$  é a resistividade da substância de que é constituído o condutor. Um condutor percorrido por uma corrente elétrica se aquece. Esse fenômeno é chamado efeito joule. A potência elétrica dissipada por um condutor percorrido pela corrente  $i$  (ou seja, a energia elétrica que, em cada segundo, se transforma em calor) é:  $P = \Delta V i$  onde  $\Delta V$  é a diferença de potencial entre os extremos do condutor. O quilowatt-hora é uma unidade de medida de energia. É igual à energia absorvida no intervalo de tempo de 1h por um dispositivo que emprega uma potência de 1000W.

#### 4. A eletrônica e os computadores



Os semicondutores são materiais sólidos que apresentam resistividade intermediária em relação à dos condutores e à dos isolantes. O silício, por exemplo, é um semicondutor cujos átomos formam entre si quatro ligações. Se no interior retículo for inserido como impurezas átomos que tendem a formar cinco ligações, obteremos um semicondutor de tipo n, que contém transportadores de cargas negativas. Se as impurezas forem átomos que tendem a formar três ligações, teremos um semicondutor do tipo p, que contém lacunas transportadoras de cargas positivas.

Um dos tipos de transistor é constituído por um cristal n (o emissor e o coletor). Em geral, compara-se um transistor a um amplificador de corrente. Nos circuitos integrados, os diversos componentes (resistores, transistores etc.), ao invés de serem construídos separadamente, são impressos todos juntos sobre uma pastilha de silício de poucos milímetros de lado, chamada chip. O computador é uma máquina que processa informações, executando as instruções de um programa. Ele reconhece apenas as sequências constituídas por dois símbolos, 1 e 0, expressos respectivamente pela presença e pela ausência de um impulso de tensão.

Os programas que estão habitualmente registrados na memória externa, são transferidos para a memória interna, onde as instruções são lidas pela unidade central de processamento (CPU), para, em seguida, executá-las.

## 5. campo magnético

Dizemos que um corpo está magnetizado quando tem a propriedade de atrair limalha de ferro. A magnetita é um ímã natural. Algumas substâncias, quando colocadas próximas a um ímã, magnetizam-se, ou seja, tornam-se ímãs artificiais. Tais substâncias são classificadas como ferromagnéticas. As duas extremidades de um ímã são chamadas pólos. Todo ímã gera, no espaço circundante, um campo de forças chamado campo magnético.

Em torno da Terra, existe um campo magnético chamado campo magnético terrestre. Uma pequena agulha magnética (ímã de prova) ali colocada se orienta de modo a apontar sempre a mesma extremidade.

Num dos pontos de um campo magnético qualquer, assumimos como direção e sentido a direção e o sentido da reta orientada do pólo sul ao pólo norte de uma agulha magnética, que esteja em equilíbrio nesse ponto. Um campo magnético pode ser descrito por meio de suas linhas de campo. Apesar de terem algumas semelhanças, o campo magnético e o campo elétrico são diferentes. Embora cargas elétricas positivas e negativas existam separadamente, os pólos magnéticos norte e sul não existem isolados, não sendo possível nem mesmo separá-los.

Dois fios retilíneos e paralelos atraem-se quando são percorridos por correntes de mesmo sentido e repelem-se quando as correntes têm sentidos contrários. A força que cada fio exerce sobre um trecho de comprimento  $l$  do outro fio é dada pela expressão:

$$F = k \frac{i_1 i_2 l}{r}$$

d

em que  $d$  é a distância entre os dois fios,  $i_1$  e  $i_2$  são as correntes que neles circulam, e  $k$  é uma constante que, no vácuo, é igual a  $2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ . Um campo magnético é sempre gerado por cargas elétricas em movimento e exerce forças sobre qualquer carga elétrica em movimento. No caso de um ímã permanente, as cargas em movimento são os elétrons que giram nos átomos do material.

A intensidade do campo magnético ( $B$ ) num ponto do espaço é definida como a força que age sobre um fio de comprimento unitário (1m) atravessado por uma corrente unitária (1A) e colocado nesse ponto perpendicularmente às linhas de força do campo magnético. A intensidade do campo magnético é medida em teslas (T):

$$1 \text{ T} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ A} \times 1 \text{ m}}$$

Um fio de comprimento  $l$ , percorrido por uma corrente  $i$  e disposto perpendicularmente às linhas do campo magnético, sofre a ação desta força:  $F = Bil$ , em que  $B$  é a intensidade do campo magnético. A força exercida por um campo magnético sobre um fio percorrido por corrente é a soma de todas as pequenas forças de Lorentz exercidas pelo campo magnético sobre os inúmeros elétrons de condução que se movimentam no interior do fio. A direção e o sentido da força podem ser determinados com a regra da mão direita: abre-se a mão direita, posicionando-a de tal modo que o polegar indique o sentido da corrente e os outros dedos indiquem a direção e o sentido do campo  $B$ . a força que age sobre o condutor emerge perpendicularmente da palma da mão.

## 6. A indução eletromagnética

O fluxo ( $\Phi$ ) do campo magnético  $B$ , através de uma superfície de área  $S$  disposta perpendicularmente às linhas do campo, é definido como o produto:  $\Phi = BS$ . Se a superfície é paralela à direção do campo magnético, o fluxo é zero. No Sistema Internacional, o fluxo do campo magnético é medido em webers (Wb):  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \times 1 \text{ m}^2$ .

A variação do fluxo magnético que passa através da superfície de um circuito gera, nesse circuito, uma tensão induzida:  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$

$\Delta t$

em que  $\Delta \Phi$  é a variação do fluxo ocorrida no intervalo de tempo  $\Delta t$  (lei de Faraday-Neumann). A tensão induzida é, portanto, igual à rapidez com que varia o fluxo magnético que passa através da superfície do circuito. Pela primeira lei de Ohm, a corrente induzida e a resistência  $R$  do circuito:  $i = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$

$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$

A energia elétrica presente na corrente induzida é o resultado da transformação de outra forma de energia. O sentido em que a corrente circula deverá ser, dentre os dois possíveis, aquele que esteja de acordo com a conservação da energia.

Em sua forma mais simples, um alternador é constituído de uma espira que gira imersa num campo magnético. A variação do fluxo magnético gera na espira uma tensão induzida. Se a espira gira de modo uniforme (varrendo ângulos iguais em tempos iguais), a variação, ao longo do tempo, da tensão e da corrente induzidas será senoidal. O valor eficaz  $V_{ef}$  de uma tensão senoidal relaciona-se com seu valor máximo  $V_0$  da seguinte maneira:  $V_{ef} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$

$V_2$

O valor eficaz da tensão alternada é o valor da tensão contínua que, aplicada a uma resistência, dissiparia, por efeito Joule, a mesma energia dissipada por essa tensão alternada.

O valor eficaz de uma corrente senoidal é definido de forma análoga ao da tensão eficaz:  $i_{ef} = \frac{i_0}{\sqrt{2}}$  onde  $i_0$  é o valor máximo da corrente.

$V_2$

Os alternadores das centrais elétricas geram três correntes senoidais defasadas de um terço de período entre si (corrente trifásica).

O transformador é um dispositivo que transforma uma tensão variável em outra tensão variável. Ele é constituído por um núcleo de ferro, em torno do qual estão enroladas duas bobinas que fazem parte de circuitos independentes: o circuito primário secundário (com  $n_1$  e  $n_2$  espiras). A razão entre as tensões eficazes  $V_{2ef}$  e  $V_{1ef}$ , do primário e do secundário, é igual àquela entre os respectivos números de espiras:

$$\frac{V_{2ef}}{V_{1ef}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Já que a potência elétrica de saída do transformador é (exceto por pequenas perdas de calor) igual à potência elétrica de entrada, temos:  $V_{2ef} i_{2ef} = V_{1ef} i_{1ef}$  em que  $i_{2ef}$  e  $i_{1ef}$  são, respectivamente, os valores eficazes das correntes do secundário e do primário. Como o produto entre tensão e corrente deve permanecer constante, um aumento da tensão provoca uma diminuição da corrente, e uma diminuição da tensão faz a corrente ficar mais intensa.

## 7. As ondas eletromagnéticas

Assim como um campo magnético variável gera, por indução eletromagnética, um campo elétrico, um campo elétrico variável gera, por sua vez, um campo magnético.

Entre esses dois campos, existe uma simetria profunda. A variação do fluxo de um deles gera linhas de outro campo. Em ambos os casos, essas linhas são fechadas e perpendiculares às do outro campo. Esses dois campos constituem uma única entidade: o campo eletromagnético.

Se o campo elétrico oscila num ponto do espaço, forma-se, nos pontos imediatamente vizinhos, um campo magnético também oscilante. Esse campo magnético gera, por

sua vez, nos pontos vizinhos a ele, outro campo elétrico oscilante e assim por diante. Nasce, assim, uma onda eletromagnética que se propaga no espaço e cuja existência não mais depende das causas que a produziram. As ondas eletromagnéticas propagam-se também no vácuo. São ondas transversais, em que o campo elétrico e o campo magnético, além de serem sempre perpendiculares entre si, também são perpendiculares à direção de propagação. Elas são geradas por cargas aceleradas e propagam-se no vácuo com a velocidade da luz ( $c = 3000000 \text{ Km/s}$ ). Para uma onda eletromagnética senoidal, podem-se definir o período  $T$ , a frequência  $f$  e o comprimento de onda  $\lambda$  de modo análogo às ondas elásticas.  $f = \frac{1}{T}$  e  $f = \frac{c}{\lambda}$

As ondas eletromagnéticas podem refletir-se, refratar-se e difratar-se. Quando sobrepostas, elas interferem entre si.

O conjunto das ondas eletromagnéticas constitui o espectro eletromagnético, que se estende por um intervalo de frequência de  $10^0 \text{ Hz}$ . As ondas de rádio ocupam a faixa do espectro onde os comprimentos de onda são maiores. Elas são utilizadas para as transmissões radiofônicas e de televisão. Uma ampla faixa dessas ondas é refletida pela ionosfera. As microondas, ao contrário, ultrapassam a ionosfera e, por essa razão, são utilizadas para as comunicações com satélites. As radiações infravermelhas são emitidas por corpos quentes. Quando absorvidos por um objeto, aquecem-no com grande eficiência. A radiação visível é constituída pelas ondas eletromagnéticas que percebemos como luz. As radiações ultravioletas favorecem diversas reações químicas (a produção de ozônio e de melanina, por exemplo). Os raios X são emitidos por elétrons muito velozes que se desaceleram bruscamente ao colidir contra um alvo metálico. Os raios X são radiações muito penetrantes. Ainda mais penetrantes são os raios gama, que são emitidos pelos núcleos dos átomos e nos aceleradores de partículas.

Para transmitir informações com auxílio de ondas eletromagnéticas, é necessário modulá-las, ou seja, introduzir variações em algumas de suas características. Na modulação de amplitude, faz-se a amplitude de uma onda senoidal variar de acordo com o sinal que se quer transmitir. Na modulação de frequência, a amplitude da onda senoidal permanece constante, mas se faz sua frequência variar de acordo com o sinal desejado. A câmara de TV transforma a imagem de uma cena num sinal elétrico, que é então usado para modular uma onda eletromagnética. O televisor recebe essa onda através da antena. Ele decodifica, dela extraindo o sinal elétrico desejado. A imagem captada pela câmara da TV é reconstruída sobre a tela por meio de um feixe de elétrons que cria uma sequência de pontos de diferentes luminosidades, conforme a intensidade do sinal elétrico. Uma câmara de TV em cores gera três sinais elétricos distintos, um para cada cor primária (verde, vermelho, azul). Num televisor em cores, três feixes de elétrons, independentes, incidem sobre a tela. Sua intensidade é controlada pelos três sinais de cor, que são extraídos do sinal da onda portadora modulada.

## **Parte 5**

### **1. Física atômica e subatômica**

A Física clássica, que engloba as teorias desenvolvidas até o final do século XIX, não conseguia descrever certos fenômenos de modo adequado. Entre eles, a invariância da velocidade da luz, o espectro das radiações emitidas por um corpo quente, a estabilidade dos átomos.

A teoria da relatividade restrita foi formulada em 1905 por Albert Einstein. Ela teve origem na tentativa de explicar um resultado experimental, que conflitava com os resultados previstos pela Física clássica. A experiência mostra que a velocidade da luz no vácuo tem sempre o mesmo valor  $c$  ( $= 3 \times 10^8$  m/s) mesmo quando a fonte luminosa e o observador que mede a velocidade da luz se movam um em relação ao outro. O trabalho de Einstein fundamenta-se na aceitação desse resultado. As consequências disso são:

1) A velocidade  $c$  da luz é invariável e constitui uma velocidade limite, uma vez que a velocidade de um corpo dotado de massa pode aproximar-se de  $c$ , mas não pode alcançar esse valor nem superá-lo.

2) O tempo não é mais um conceito absoluto.

3) Vale a equivalência massa energia ( $E = mc^2$ ), segundo a qual um corpo parado e não-sujeito à ação de forças possui uma energia (chamada energia de repouso) pelo simples fato de possuir uma massa. Tal energia é igual ao produto da massa do corpo pelo quadrado da velocidade da luz. Para descrever o espectro das radiações eletromagnéticas emitidas por um corpo quente, Max Planck introduziu a hipótese de que a energia de uma onda eletromagnética de frequência  $f$  pode apenas ter valores múltiplos de uma energia mínima igual ao produto  $hf$ . O valor da constante  $h$  foi determinado por Planck ( $h = 6,6 \times 10^{-34}$  Js).

Segundo essa hipótese, a luz consiste na emissão de um enorme número de pacotinhos de energia, chamados quanta de luz.

A radiação eletromagnética manifesta tanto propriedades ondulatórias (na interferência e na difração) como propriedades corpusculares (nos processos de absorção e de emissão).

Segundo as leis do eletromagnetismo clássico, os elétrons, ao girarem em torno do núcleo do átomo, deveriam irradiar ondas eletromagnéticas, perder energia e a estabilidade dos átomos. Bohr supôs que os elétrons possam percorrer somente algumas órbitas, que correspondem a energias bem-determinadas do átomo. Em cada órbita, pode haver no máximo dois elétrons (princípio de Pauli). A energia  $E$  correspondente à diferença entre os níveis de duas órbitas:  $E = E_e - E_i$

$E_e$  e  $E_i$  são, respectivamente, as energias do nível externo e do nível interno. A frequência do fóton emitido é dada pela relação:  $f = R$

$h$

Onde  $h$  é a constante de Planck. O modelo atômico de Bohr permitiu descrever corretamente os espectros dos átomos e as propriedades químicas dos elementos.

## 2. Física atômica e subatômica, radioatividade, fusão e fusão nuclear

Os núcleos atômicos são corpúsculos positivamente carregados, nos quais está concentrada a quase totalidade da massa do átomo. Eles são caracterizados por dois números inteiros:  $Z$  é o número atômico, que é o número de prótons do núcleo. O produto  $+Ze$  é a carga elétrica do núcleo. O número  $A$ , chamado núcleo de massa, é igual à soma dos prótons e dos nêutrons que constituem o núcleo. Para nos referirmos indiferentemente a um nêutron ou a um próton, usamos o termo núcleon. Cada núcleon é constituído por três quarks. As forças atrativas que agem entre os núcleos contrariam a repulsão coulombiana e conseguem manter o núcleo coeso. São as chamadas forças nucleares. Dois núcleos com o mesmo valor  $Z$ , mas diferentes valores  $A$  (ou seja, com o mesmo número de nêutrons) ocupam o mesmo lugar no sistema periódico dos elementos. Eles são chamados isótopos.

A radioatividade é o processo pelo qual os núcleos de alguns elementos emitem, num certo instante, um corpúsculo, transformando-se espontaneamente num núcleo de outro elemento. Os corpúsculos emitidos são, em alguns casos, partículas alfa, ou seja, núcleos de hélio (He); em outros, partículas beta, ou seja, elétrons. Ambos são emitidos com energia muito elevada, sempre da ordem de alguns megaelétron-volts (MeV, milhões de elétron-volts). Cada núcleo radioativo é caracterizado pela sua meia vida ( $T_{1/2}$ ), que é o tempo necessário para que uma dada massa desse elemento se reduza à metade, por efeito dos decaimentos. A radioatividade beta deve-se ao fato de os nêutrons livres não serem estáveis, mas se desintegrarem segundo o processo:

Assim, um nêutron transforma-se num próton e esse processo é acompanhado da criação de dois corpúsculos: um elétron e um neutrino-elétron. Essa última partícula é neutra, tem massa praticamente nula e sua velocidade é quase igual à da luz. O neutrino-elétron é, em essência, um elétron neutro. A força que produz o decaimento beta é a interação fraca, descoberta por Enrico Fermi, em 1933. Esse processo é devido à transformação de um quark  $d$  num quark  $u$ , no interior de um nêutron.

Os elementos radioativos que existem na natureza (como o rádio, o radônio, etc.) fazem parte de três famílias radioativas: a do urânio, a do tório e a do actínio. Para a utilização prática da energia nuclear, recorre-se a uma reação chamada fissão nuclear. Ela é provocada por um nêutron, ainda que de energia muito pequena, quando este é capturado por um núcleo de grande massa atômica, como o isótopo  $^{235}$  do urânio.

Uma importante reação de fusão nuclear é aquela em que o deutério e o trítio (dois isótopos do hidrogênio) se fundem, liberando energia e produzindo uma partícula alfa e um nêutron. Para que essa reação ocorra, é necessário que os dois núcleos se aproximem, vencendo a repulsão coulombiana. Isso acontece quando a temperatura da mistura deutério-trítio é da ordem de pelo menos dez milhões de graus Celsius.

Síntese elaborada por João Paulo da Silva

2. AZEVEDO, Maria Cristina P. S. de. Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula. In: CARVALHO, Anna Maria Pessoa de. (Org.).

Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática. São Paulo: Thomson, 2005. p. 19-33.

O artigo discute a questão da importância da problematização das atividades de física em sala de aula. Diz a autora que quando se trata de um planejamento e de uma proposta de ensino no campo da física, o termo *problema* assume uma inafastável importância: “Em um curso de Física, torna-se de fundamental importância apresentar aos alunos problemas para serem resolvidos, pois essa é a realidade dos trabalhos científicos em todo o mundo” (p. 19). Dessa maneira, o aluno entra em contato com as investigações científicas de maneira semelhante às feitas nos laboratórios de pesquisa. Tais propostas podem ser tanto “na forma de práticas de laboratório como de problemas de lápis e papel” (p. 19). O aluno, a partir de tais investigações, pode ver a ciência como um todo coerente e interdependente.

Só a partir da realização de atividades práticas e investigativas (ainda que nem sempre laboratório) o aluno se põe a questionar e dialogar, iniciando assim a construção de um conhecimento.

Um aspecto importante dessa investigação é o de que ela seja fundamentada, de que faça sentido para o aluno. Assim, o problema colocado pelo professor deve dizer respeito ao que está sendo estudado, incitando também a curiosidade, o desejo de experimentar e estimulando-o a questionar, para que ele obtenha “profundas mudanças conceituais, metodológicas e atitudinais” (p. 21). Tais aprendizagens são tão importantes quanto a de conteúdos e conceitos. O professor, desse modo, deixa de agir como transmissor do conhecimento e passa a agir como um guia.

Deve-se enfatizar o processo do conhecimento, tão relevante na sua construção quanto o seu produto. O aluno assim sai de sua postura passiva e passa a agir sobre seu objeto de estudo, relacionando-o com a realidade, buscando as causas, não só dessa relação, mas das suas próprias ações e interações na realidade, construindo também sua autonomia.

Segundo Gil e Castro, os seguintes aspectos da atividade científica devem ser observados quando se problematiza uma atividade em sala de aula:

- “1. apresentar situações problemáticas abertas;
2. favorecer a reflexão dos estudantes sobre a relevância e o possível interesse das situações propostas;
3. potencializar análises qualitativas significativas, que ajudem a compreender e acatar as situações planejadas e a formular perguntas operativas sobre o que se busca;
4. considerar a elaboração de hipóteses como atividade central da investigação científica, sendo esse processo capaz de orientar o tratamento das situações e de fazer explícitas as pré-concepções dos estudantes;

5. considerar as análises, com atenção nos resultados (sua interpretação física, confiabilidade etc.), de acordo com os conhecimentos disponíveis, das hipóteses manejadas e dos resultados das demais equipes de estudantes;
6. conceder uma importância especial às memórias científicas que reflitam o trabalho realizado e possam ressaltar o papel da comunicação e do debate na atividade científica;
7. ressaltar a dimensão coletiva do trabalho científico, por meio de grupos de trabalho, que interajam entre si” (p. 23).

Nesse tipo de trabalho, o aluno se envolve inclusive emocionalmente, pois passa a pôr em prática não somente suas habilidades, mas também suas emoções. As aulas de laboratório não devem ser simplesmente um espaço de obediência do aluno a instruções impostas por um manual ou um professor, sem que ele tenha nenhum poder de decisão. Ao contrário, deve ser apresentado ao aluno um problema para que ele, utilizando tanto os conceitos ou hipóteses científicas quanto suas habilidades e atitudes, inclusive sua emoção e compreensão da natureza da ciência, possa refletir sobre, chegando a resultados não somente no nível científico propriamente dito, mas para sua vida em geral.

Assim, o aluno deixa de ser mero observador das aulas, geralmente expositivas, e passa a interagir com os objetos apresentados nas atividades investigativas, “precisando argumentar, pensar, agir, interferir, questionar, fazer parte da construção de seu conhecimento” (p. 25). O professor, por sua vez, passa de um mero expositor a um orientador do processo de ensino.

Como exemplos de atividades investigativas há as “Demonstrações Investigativas”, o “Laboratório Aberto”, as “Questões Abertas” e os “Problemas Abertos”.

As “Demonstrações Investigativas” são experimentos em Ciências feitos com o objetivo de ilustrar uma teoria já estudada ou em estudo. Nesse caso, geralmente se parte da proposição de um problema por meio de questões feitas aos alunos para que se detecte neles que tipo de pensamento eles têm sobre o assunto. As respostas dos problemas dadas pelos alunos, muitas vezes características do senso comum ou da intuição, pois provêm de sua vivência cotidiana e de sua observação pessoal dos fenômenos do mundo, devem ser observadas pelo professor para que ele exerça o papel de construir com os alunos uma passagem do saber cotidiano e do senso comum para o saber científico. Muitas vezes é possível inserir nesse contexto ensinamentos sobre história da ciência e sobre como se deu a criação de determinado conceito. Assim, tal proposta permite ao aluno as seguintes contribuições:

“\*percepção de concepções espontâneas por meio da participação do aluno das diversas etapas da resolução de problemas;



- \* valorização de um ensino por investigação;
- \* aproximação de uma atividade de investigação científica;
- \* maior participação e interação do aluno em sala de aula;
- \* valorização da interação do aluno com o objeto de estudo;
- \* valorização da aprendizagem de atitudes e não apenas de conteúdos;
- \* possibilidade da criação de conflitos cognitivos em sala de aula.” (p. 27).

Já a atividade de “Laboratório Aberto” busca a solução de uma questão a ser respondida por uma experiência, que deve se dividir nos seguintes seis momentos: 1) Proposta do problema: o que se faz na forma de uma questão que não seja muito específica a fim de que possa gerar uma ampla discussão e cuja resposta deverá ser o objetivo geral do problema; 2) Levantamento de hipóteses: o que é feito pelos alunos logo após a colocação do problema; 3) Elaboração do plano de trabalho: distinção de como será realizado o experimento, decidindo quais os materiais necessários, como se montará o arranjo experimental, coleta e análise de dados, a partir de discussão feita com o professor e os alunos, sendo que é melhor que haja diversos grupos fazendo o mesmo experimento para que se possa comparar os resultados; 4) Montagem do arranjo experimental e coleta de dados: esta é a etapa mais “prática” do experimento, na qual os alunos manipulam o material, importante para eles possam ver como a Física é uma ciência experimental; depois de montarem o arranjo, devem passar à coleta dos dados, de acordo com o plano de trabalho elaborado pelo grupo; 5) Análise dos dados: fase em que os alunos verificam se os dados obtidos fornecem informações sobre a questão-problema, incluindo a construção de gráficos, obtenção de equações e teste das hipóteses (pode ser usado papel milimetrado e reta média ou o Excel numa sala de informática); como se trata da fase mais abstrata, em que os alunos devem fazer a tradução gráfica ou algébrica dos experimentos, cabe ao professor demonstrar que se trata de parte fundamental do trabalho científico, já que os alunos costumam ter dificuldades nessa fase; 6) Conclusão: aqui se formaliza uma resposta ao problema inicial discutindo a validade, ou não, das hipóteses iniciais e as conseqüências delas derivadas.

As “Questões Abertas” são as relacionadas a fatos do dia-a-dia dos alunos, cuja explicação está ligada aos conceitos discutidos em sala de aula nas aulas anteriores. Trata-se de perguntas do tipo “Em que situação podemos conseguir uma lata de refrigerante em menor temperatura: colocando-a em água a 0 °C ou colocando-a em gela a 0 °C?” É importante que sempre haja um registro escrito do que foi discutido em classe pelos alunos, para que eles guardem na memória as discussões da classe. Também podem ser colocadas questões abertas em provas. Quando discutir a correção da prova, o professor deve esclarecer o porquê da resposta correta, salientando possíveis respostas que, embora erradas, demonstrem certa coerência com os conceitos trabalhados em sala.

Os “Problemas Abertos” são situações gerais apresentadas à sala que diferem das “Questões Abertas” pois só abrangem os conceitos, devendo levar à matematização dos resultados. Não se coloca uma questão cotidiana, mas sim um *problema* que requer uma investigação científica. A intenção é de converter o problema em algo claro, o que é geralmente algo demorado. Para atingir o interesse do aluno, é importante que envolva a relação Ciência/Tecnologia/Sociedade. Primeiramente, o professor deve orientar aos alunos que eles discutam as suas hipóteses sobre o problema, é a chamada fase qualitativa, em que os alunos elaboram seus raciocínios, verbalizando. Após isso, parte-se para a solução algébrica das equações, possibilitando, também um exemplo numérico que satisfaça os alunos. É sempre importante que os alunos registrem todo o processo de aprendizagem e de resolução do problema.

No ensino por investigação, o aluno deve participar de todas as etapas da aprendizagem saindo de sua postura passiva e adquirindo uma postura ativa, elaborando raciocínios, falando, escrevendo, justificando suas idéias. Da mesma forma, o professor deve ter uma postura aberta para com as idéias dos alunos, valorizando as suas respostas certas e questionando as erradas, procurando demonstrar, sempre que houver, a coerência nos pensamentos de todos os alunos.

### 3. BEN-DOV, Yoav. Convite à Física. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1996.

#### **Introdução**

Será possível compreender a Física sem um conhecimento prévio de matemática?

O autor desta obra acredita que sim e pensa que, para melhor acompanharmos a Física de hoje, e talvez a de amanhã, é necessário abordar sua teorias sob uma perspectiva histórica.

#### **1. Elementos e causas**

A Grécia antiga contribuiu para a ciência ao concluir que a ciência era possível, que os fenômenos podiam ser demonstrados através de um modelo matemático, na tentativa de explicar a realidade em termos de elementos (a terra, a água, o ar, o fogo e o éter).

A representação medieval do mundo efetuava uma síntese entre a religião e o estudo da natureza, entre as considerações morais e científicas.

A filosofia aristotélica foi dominante em algumas civilizações, de onde sobreveio uma revolução científica que se deu início no século XIII, favorecendo a ciência

sob dois aspectos essenciais: introduziu, no debate filosófico, um rigor fundado

na troca de argumentos e ordenou suas ideias em uma teoria lógica e autônoma. No século XVI, o monge polonês Nicolau Copérnico propôs uma astronomia fundada sobre um movimento da Terra e dos planetas centrados no Sol, o que abriu caminhos para outras transformações, que acarretaram a queda da física antiga.

## **2. Espaço e movimento**

Em 1543, Copérnico expõe a hipótese de mobilidade da Terra e dos planetas em torno do Sol. Baseando-se nisso, Galileu propõe uma nova teoria, que redefine o conceito de movimento.

Para melhor compreensão, Newton propôs dois tipos de movimento: o absoluto e o relativo. O movimento relativo pode dizer, por meio de experiências, se estamos em movimento ou repouso; o mesmo não acontece com o movimento absoluto, que é definido como uma mudança de posição absoluta. A escola copernicana e aristotélica discutem sobre a existência do espaço absoluto, introduzindo o princípio da relatividade, inaplicável à física newtoniana.

## **3. Matéria e força**

Para que a cinemática de Galileu se tornasse uma teoria mecânica, era preciso acrescentar-lhe uma dinâmica. Isto foi feito, em 1687, por Isaac Newton, com a publicação dos *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Princípios matemáticos de filosofia natural). Esse livro continha uma teoria mecânica completa, permitindo-se calcular o movimento de qualquer corpo submetido a uma força, preenchendo as lacunas deixadas por Galileu e anunciando uma nova visão do mundo, uma visão mecanicista.

## **4. Calor e trabalho**

O século XIX viu surgir, através do estudo dos fenômenos ligados ao calor, uma nova abordagem científica, fundada em princípios gerais, que permitiu estudar sistemas em sua totalidade. A teoria física resultante dessa nova abordagem é chamada de termodinâmica, nome que significa, literalmente, movimento do calor.

## 5. Energia e entropia

Em 1843, James Prescott Joule determinou a equivalência do trabalho mecânico. A partir da existência de equivalentes mecânicos, elétricos e químicos do calor, admitiu-se a existência no universo de uma entidade física fundamental, que se manifesta sob formas diversas - trabalho, calor, ligações químicas, etc. - e à qual se deu o nome de força, conhecida hoje como energia. Com esses novos conceitos, alguns princípios foram formados, como: princípio da conservação de energia; primeiro e segundo princípios da termodinâmica; entropia.

## 6. Os átomos

Parmênides, no século VI a.C., concluiu que o fluxo incessante das mudanças que observamos à nossa volta não passa de uma ilusão de sentidos. Algumas décadas mais tarde, ao tentar conciliar a imagem perceptível de um mundo em perpétuo movimento com a irrealidade desse movimento, Demócrito e Leucipo inventaram o átomo.

Como eles, escapam os nossos sentidos, percebemos um mundo que não é o mundo real, mas sim um mundo de corpos com qualidades constantemente cambiantes, um mundo de corpos sujeitos à criação e à destruição. Só existem, realmente, átomos eternos; sua mudança reside nas relações que mantêm entre si e com o espaço.

## 7. O tempo

Embora pertencendo ao domínio da filosofia, o debate sobre a natureza do tempo toma, por vezes, argumentos da física. Temos um exemplo disso com Newton e Leibniz: ambos consideravam que a natureza do tempo era semelhante à do espaço; assim, o desacordo que se opunha com relação ao espaço não podia deixar de se estender à questão do tempo.

Toda a teoria física tem a ambição de prever a evolução de um sistema, a partir do conhecimento de seu estado em um dado momento. Vamos nos concentrar, antes, em uma questão que suscitou vivos debates no final do século XIX e que ressurgiu em nossos dias: a da direção do tempo, a diferença entre o passado, o

presente e o futuro.

## **8. A luz**

Existe, na natureza, uma entidade física que é imaterial, conhecida como luz. Durante muito tempo, seu estudo foi subordinado ao da visão, como se acreditava na Antiguidade.

Afinal... O que é a luz? É um corpúsculo, uma onda ou outra entidade? Após três séculos de debate, essa questão ainda está sem resposta. Hoje, os físicos aceitam a teoria quântica, que descreve um mesmo quadro conceitual à matéria e à luz.

## **9. O campo**

Certos fenômenos elétricos e magnéticos são conhecidos desde a Antiguidade e o estudo sistemático dos fenômenos elétricos só se iniciou em 1672. Somente após várias décadas de pesquisa que se chegou a estabelecer a corrente elétrica como o deslocamento de cargas elétricas. Isto permitiu um vínculo entre a eletricidade e o magnetismo e os modelos de éter, mas não explicou as leis eletromagnéticas.

## **10. Réguas e relógios**

No fim do século XIX, os físicos se esforçavam para descrever o éter. As pesquisas de um modelo de éter perderam todo o interesse em 1905, quando Einstein propôs a teoria da relatividade especial.

## **11. Gravitação e curvatura**

Foram as ideias de Mach que levaram Einstein a repensar os conceitos de relatividade do movimento e, de caráter absoluto, do espaço, e a formular uma teoria da relatividade que, nos nossos dias, substituiu a teoria do movimento, desenvolvida por Galileu e Newton. A insatisfação de Einstein estava ligada ao estatuto da teoria da gravitação.

## **12. Ondas e quantas**

A teoria da relatividade marcou, de fato, o início de uma revolução que abalou não só a mecânica de Newton, como também as próprias bases da Física do final do século

XIX. Hoje, designamos os três pilares da física (a mecânica, a termodinâmica e o eletromagnetismo) sob o nome de teorias da física clássica, para distingui-los das teorias da física moderna, que os substituíram no século XX. Ou seja, as teorias da relatividade e da mecânica quântica.

### 13. A partícula e o observador

A verdadeira natureza dos objetos quânticos, objetos cujo comportamento parece apresentar aspectos ao mesmo tempo corpusculares e ondulatórios, está, atualmente, longe de ser elucidada. Assim, o verdadeiro mistério da natureza da luz permanece inteiro.

Síntese elaborada por Lariene Marques de Paula

#### 4. BERMANN, Célio. Energia no Brasil: para quê? para quem? Crise e alternativas para um país sustentável. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

O autor disseca, com visão crítica, as opções energéticas adotadas pelo Brasil. Contesta, por exemplo, o conceito de "renovável" conferido à energia das usinas hidrelétricas, por conta da destruição ambiental causada pelas represas e das consequências sociais de se remover populações de áreas inundadas. A construção de barragens já inundou 34 mil quilômetros quadrados de terras e expulsou de seu habitat 200 mil famílias. Sobre as duas usinas nucleares instaladas, Angra I e II, lembra que tiveram um custo elevadíssimo e hoje tem segurança notadamente precária. Também critica a opção pelo transporte rodoviário, feita a partir dos anos 50, em detrimento das ferrovias, a poluição que os carros e caminhões espalham e a dependência em importação de petróleo e, ultimamente, em derivados como o óleo diesel e o gás GLP. Nas cidades, o panorama se agrava com a primazia do transporte individual sobre o coletivo. Ao longo da década de 80, houve uma redução significativa nos volumes de emissões de monóxido de carbono, que pode ser explicada pela diminuição do consumo de dois derivados de petróleo, o óleo combustível e a gasolina, graças ao Proálcool. Mas os dados de 1999 em relação aos de 1990, período em que o Proálcool entrou em colapso, indicam um aumento significativo das emissões, da ordem de 21,5%.

Regiões fornecedoras de petróleo e gás natural viveram surtos de aumento de renda com a chegada de grandes empresas e o recebimento de royalties. Mas convivem com os riscos e as alterações ambientais típicas das tecnologias petrolíferas e perderam faixas de domínio do litoral, cujos pontos turísticos e históricos sofrem com incêndios e acidentes ecológicos. As regiões produtoras de cana-de-açúcar também

experimentaram surtos de investimentos nos anos 70 e 80, facilitados pelo Proálcool e pelo crédito federal. Mas o benefício foi ofuscado por um feroz processo de concentração de terras e avanço dos canaviais, aniquilando as propriedades pequenas e de subsistência. O programa original do álcool estabelecia que nenhuma usina poderia moer mais de 50% da cana de sua própria produção, obrigando-a a comprar de outros produtores pelo menos a metade da matéria-prima que fosse utilizar. Esse instrumento, que prevenia a monopolização da terra pelos usineiros, foi derrubado como condição de recebimento de empréstimos junto ao FMI na década de 80. A recente privatização do setor energético também é alvo de críticas. O governo colocou em segundo plano o interesse da população e não se preocupou em estabelecer previamente uma regulação do setor, como ocorreu em outros setores privatizados. Os leilões das empresas acabaram se restringindo a uma disputa de propostas que apresentassem o maior preço, sem considerar o futuro das tarifas e o impacto social disso. Como agravante, a privatização se fez, em boa medida, com dinheiro público, por meio de financiamentos do BNDES e participação de fundos de pensão.

Em outro eixo do livro, o autor mostra que a oferta de energia no Brasil é um fator de desigualdade social e sugere medidas para democratizá-la. De acordo com dados de 1999, 15,2% dos domicílios brasileiros ainda usam lenha e carvão para cozinhar. Embora as taxas de eletrificação dos domicílios tenham crescido, 11,8% continuam sem eletricidade ou recorrem a ligações clandestinas. O consumo médio mensal de uma família de cinco pessoas deveria ser de 220 quilowatts/hora, para atender a necessidades básicas (funcionamento de geladeira, ferro elétrico, lâmpadas, televisão e chuveiros). Mas dados do Sistema de

Informações Empresariais do Setor de Energia Elétrica mostram que o consumo médio residencial fica aquém dessa marca, com 175 quilowatts/hora por mês, num sinal de carência energética. Calculando as tarifas vigentes e cruzando esses dados com a renda da população, o autor conclui que, para 58,3% das famílias brasileiras, ou cerca de 25 milhões de domicílios, a satisfação de necessidades com energia elétrica é comprometida pela baixa renda. Cem milhões de brasileiros correm o risco de sofrer com a privação de energia elétrica por serem pobres. Em contrapartida, grandes grupos industriais, que geram empregos escassos, recebem energia subsidiada. O subsídio previsto em contratos de fornecimento de energia pela usina de Tucuruí a gigantes do alumínio, como a Albrás e a Alumar, representa para a Eletronorte uma perda de US\$ 200 milhões ao ano. Esses contratos, firmados nos anos 80, vigoram até 2004, quando acumularão um subsídio de US\$ 5 bilhões.

O autor propõe alternativas, como a exploração da biomassa. O Brasil tem condições privilegiadas para o cultivo da biomassa, a partir da utilização da cana-de-açúcar ou de outras variedades, como o biodiesel extraído do dendê. O potencial da biomassa depende de dois fatores: terra fértil e insolação, ambos abundantes no país. Uma área estimada em 100 milhões de hectares está disponível para cultivo voltado para o aproveitamento energético, sendo que a utilização da metade dessa área poderia gerar US\$ 12 bilhões, anualmente, para os produtores rurais. Entre as possibilidades de aproveitamento da biomassa, a mais promissora é a chamada cogeração, a produção simultânea de energia elétrica e vapor. Com uma produção de 252 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2000-2001, o Brasil apresenta enormes

condições para desenvolver cogeração de eletricidade a partir do aproveitamento da queima do bagaço. Atualmente, 20 a 30 quilowatts/hora por tonelada de cana são produzidos nas próprias destilarias, tornando-as auto-suficientes.

Outra alternativa para o aproveitamento energético da biomassa é a produção de óleos vegetais carburantes. Algumas espécies se destacam devido ao grande potencial, como o buriti, o babaçu, a mamona, a soja e o dendê. O autor propõe a ampliação da produção dessas espécies, tendo como base pequenas propriedades rurais.

Também recomenda a disseminação de painéis coletores de energia solar para reduzir a demanda de eletricidade usada no aquecimento de água em domicílios. Esse tipo de energia ainda é restrito. Hoje, o Brasil conta com 1.500.000 metros quadrados de área coletora de aquecedores solares, num mercado que cresce na ordem de 100.000 metros quadrados ao ano. A energia dos ventos seria outra opção. Estima-se no Brasil um potencial eólico da ordem de 28,9 milhões de quilowatts. Isso representa mais de 40% da atual capacidade de geração instalada no país. O maior potencial está na Região Nordeste, nos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco. Nas áreas mais propícias, a disponibilidade dos ventos alcança 38% do tempo, o que reduz significativamente o problema de sua intermitência. A primeira turbina eólica instalada no país está localizada em Fernando de Noronha (75 quilowatts), proporcionando uma economia anual de 70 mil litros de óleo diesel, e a primeira central está localizada no Morro do Carmelinho, em Diamantina, com 1 megawatt (quatro turbinas de 250 quilowatts inseridas na rede elétrica existente). Projetos de novas fazendas eólicas estão sendo desenvolvidos. No Ceará, devem ser insta-

ladas duas centrais de 30 megawatts cada nas localidades de Paracuru e Camocim. O parque eólico do Mucuripe, também no Ceará, foi recentemente modernizado, dobrando sua potência de 1,2 megawatt para 2,4 megawatts. Atividades econômicas que gastam energia, mas ampliam as oportunidades de emprego e geram renda, deveriam ser priorizadas, como as áreas de alimentos e bebidas, cimento e têxtil. Suas plantas industriais geram muito mais postos de trabalho do que outros setores, como siderurgia, alumínio e ferros-liga, grandes consumidores de energia. A questão da eficiência do uso de energia também é discutida. Os setores residencial e de transportes são os que apresentam os menores rendimentos e, portanto, têm mais possibilidade de ganhos de eficiência.

O autor prevê um cenário insustentável, caso o Brasil continue a ampliar as atuais matrizes energéticas até o ano de 2020. Essa tendência se fundamenta nas seguintes hipóteses: o consumo total de energia cresceria à taxa média de 5,1% ao ano, enquanto a demanda de petróleo, a 5,5% e a de gás natural, a 12,2% ao ano. As emissões de gás carbônico na atmosfera atingiriam um volume três vezes maior que o de 1999 e cinco vezes maior que o de 1990. Apesar da produção brasileira de petróleo crescer, o problema da dependência continuaria, pois a capacidade de refino é restrita. A construção de termelétricas, apontadas pelo governo -Fernando Henrique como a saída para a necessidade de aumentar a energia, não está saindo do papel. Investidores se assustaram após a crise cambial.



Para democratizar o acesso à energia, propõe medidas de curto prazo, como a substituição do uso do GLP pelo gás natural (menos poluente e com mais condições de suprir a demanda), sendo necessários investimentos na extensão da rede de gás canalizado. Para universalizar a eletrificação no campo, sugere a disseminação de fontes energéticas descentralizadas, como painéis fotovoltaicos e pequenas centrais hidrelétricas. O país também deveria investir na redução das perdas nas linhas de transmissão e redes de distribuição, que representam 15% da energia gerada nas usinas. Usinas hidrelétricas antigas deveriam ser reformadas, substituindo turbinas antigas por novas, mais produtivas. O transporte rodoviário de cargas deveria ceder espaço ao ferroviário, ou também ao hidroviário, 40% mais barato.

Nada disso faria sentido, na concepção do autor, se o país não se esforçasse em mudar seu modelo econômico e reduzisse a exclusão social. Ele considera fundamentais três pressupostos. O primeiro é a reforma agrária, capaz de propagar um modelo agrícola gerador de renda. A eletrificação rural aumentaria a demanda por energia, mas esse tipo de agricultura é menos dependente de insumos e eletricidade, e poderia prever a produção de energia pelo uso da biomassa. O segundo é a atenuação do processo de urbanização, outro elemento que reduziria a exclusão social, concentrada nas violentas periferias das metrópoles. A reestruturação da indústria e das relações de trabalho é o terceiro pressuposto. O autor lembra que o aumento crescente da produtividade impede que os trabalhadores conquistem mais emprego e mais renda. Sugere, por exemplo, a redução da jornada de trabalho.

Síntese elaborada por Fabrício Marques

5. CACHAPUZ, Antonio et al. *A necessária renovação do ensino de Ciências*. São Paulo: Cortez, 2005.

### **Importância da Educação Científica na Sociedade Atual**

A educação científica converteu-se numa exigência urgente, num fator essencial do desenvolvimento das pessoas e dos povos. Uma alfabetização científica para todos os cidadãos torna possível o desenvolvimento futuro.

Tem sido também ressaltada num grande número de trabalhos de investigação, publicações, congressos e encontros.

A investigação em didática das ciências mostrou reiteradamente o elevado insucesso escolar, assim como a falta de interesse, repulsa, que as matérias científicas geram.

Alfabetização científica é, segundo Bybeer, a expressão de um amplo movimento educativo que se reconhece e se mobiliza atrás do termo “alfabetização científica”, mas que acarreta ao mesmo tempo, o perigo de uma ambiguidade que permite a cada pessoa atribuir-lhe significados distintos.

Para Marco, esse deveria ser o currículo científico básico:

- Alfabetização científica prática
- Alfabetização científica cívica
- Alfabetização científica cultural

Para Reid e Hodson deveria conter:

- Conhecimento de ciência
- Aplicações do conhecimento científico
- Saberes e técnicas da ciência
- Resolução de problemas
- Interação com a tecnologia
- Questões sócio-econômico-políticas e ético-morais na ciência e na tecnologia
- História e desenvolvimento de ciência e tecnologia
- Estado da natureza da ciência e a prática científica.

### **Contribuição da alfabetização científica para a formação de cidadãos**

Há a necessidade de uma formação científica que permita aos cidadãos participar na tomada de decisões, em assuntos que se relacionam com a ciência e a tecnologia.

Este argumento “democrático” é o mais amplamente utilizado por quem reclama a alfabetização científica e tecnológica como um componente básico da educação para a cidadania.

Podem contribuir pessoas que não sejam especialistas, com perspectivas e interesses mais amplos, sempre que possuam um mínimo de conhecimentos científicos específicos sobre a problemática estudada.

### **Alfabetização científica versus preparação de futuros cientistas**

Uma tese aceita pelos responsáveis dos currículos e pelos professores de ciências é que a educação científica tem estado orientada para preparar os estudantes como se fossem chegar a especialistas em Biologia, Física ou Química.

Tal orientação deve modificar-se porque a educação científica se apresenta como parte de uma educação geral para todos os futuros cidadãos.

### **Superação das visões deformadas da ciência e da tecnologia: Um requisito essencial para a renovação da educação científica.**

A melhoria da educação científica tem como requisito fundamental, modificar a imagem da natureza da ciência que transmitimos.

Para tanto é necessário modificar a epistemologia dos professores. Este estudo, numa potente linha de investigação, tenta fixar uma imagem basicamente correta sobre a natureza da ciência e da atividade científica.

### **Possíveis visões deformadas da ciência e da tecnologia**

A tecnologia é considerada uma mera aplicação dos conhecimentos científicos. Tem sido vista tradicionalmente como uma atividade de menor status que a ciência “pura”.

#### **Uma visão descontextualizada**

A atividade técnica precedeu em milênios a ciência e de modo algum pode ser considerada como mera aplicação de conhecimentos científicos. A educação científica perde com esta desvalorização da tecnologia.

#### **Uma concepção individualista e elitista**

Insiste-se em que o trabalho científico é um domínio reservado a minorias especialmente dotadas, transmitindo experiências negativas para a maioria dos

alunos e em particular, das alunas, com clara discriminação de natureza social e sexual: a ciência é apresentada como uma atividade eminentemente “masculina”.

### **Uma concepção empiro-indutivista e ateórica**

Defende o papel da observação e da experimentação “neutra”, esquecendo o papel essencial das hipóteses como focalizadoras da investigação e dos corpos coerentes de conhecimentos.

### **Uma visão rígida, algorítmica, infalível**

Amplamente difundida entre os professores de ciências, se utiliza de diversos desenhos. Em entrevistas realizadas com diversos professores, a maioria refere-se ao “Método Científico” como uma sequência de etapas definidas, em que as observações e as experiências rigorosas desempenham um papel destacada contribuindo à “exatidão e objetividade” de resultados obtidos.

### **Uma visão aproblemática e ahistórica**

O fato de transmitir conhecimentos já elaborados, conduz a ignorar quais foram os problemas que se pretendiam resolver, qual tem sido a evolução de ditos conhecimentos, as dificuldades encontradas etc., e mais ainda, a não ter em conta as limitações do conhecimento científico atual ou as perspectivas abertas.

### **Visão exclusivamente analítica**

O trabalho científico exige tratamentos analíticos, simplificadoros, artificiais.

A história do pensamento científico é uma constante confirmação de que os avanços têm lugar profundizando o conhecimento da realidade em campos definidos, que permite chegar a estabelecer laços entre campos aparentemente desligados.

## **Problema, Teoria e Observação em ciência: para uma reorientação epistemológica da Educação em Ciência**

### **Da epistemologia**

“A diferença fundamental entre ciência e filosofia da ciência é intencional: na ciência faz-se, na filosofia pensa-se como se faz, para que se faz e porque se faz”.

Apesar do crescente número de livros e artigos relacionados com as questões básicas da filosofia da ciência, os professores permanecem muito mal informados.

Torna-se necessário criar espaços e tempos em que o professor deve contatar com as principais concepções, refleti-las, confrontá-las, aprofundando as suas próprias concepções e retirando indicações, orientações e ensinamentos quanto às estratégias, métodos e procedimentos a adotar no seu trabalho docente.

### **Contexto da Justificação**

Bechelard cita que sem a interrogação não pode haver conhecimento científico; nada é evidente, nada nos é dado, tudo é construído.

Para Popper, toda a discussão científica deve partir de um problema, ao qual se oferece uma espécie de solução provisória, uma teoria-tentativa, passando-se depois a criticar a solução, com vistas à eliminação do erro.

### **A Observação e a Teoria em Ciência**

A raiz que norteia a observação, e quase sempre implícita nos currículos de ciência, é a empirista-indutivista. Os professores exigem observações exatas,

precisas, metódicas e repetidas, no entanto, as observações exatas, precisas, metódicas e repetidas, fazem crer aos alunos, que a aprendizagem foi de imediato atingida e que os conceitos foram compreendidos e construídos a partir das observações.

Interessa desenvolver estratégias de ensino apoiadas numa reflexão sobre o significado da observação. Ela deve funcionar como um processo de questionar as hipóteses que os alunos sugerem.

### **Implicações para a formação de professores**

Os professores bem formados nesta área podem recuperar um mau currículo e professores com graves deficiências de informação podem matar um bom currículo. Desejável mesmo é que o professor não assente o seu saber sobretudo na informação, mas que possa também desenvolver conhecimentos e saberes no modo como se investiga, como se faz ciência.

### **Defesa do Construtivismo: o que entendemos por posições construtivistas na Educação em Ciência**

O consenso construtivista na Educação em Ciência tem a sua origem em muitas investigações específicas relativas a diferentes aspectos do processo de ensino/aprendizagem das ciências, tais como aprendizagem dos conceitos, a resolução de problemas, o trabalho experimental ou as atitudes em relação, e para a ciência.

Esta discussão da aproximação construtivista em Educação em Ciência pode ajudar a clarificar o que é a orientação epistemológica desta aproximação, evitando a apropriação incorreta de propostas radicais do construtivismo

### **A Introdução dos Conceitos de Trabalho e Energia: exemplo de programa de atividades para orientar o trabalho dos estudantes**

O conceito de força permite explicar as mudanças de movimentos experimentadas pelos objetos e as transformações da natureza.

Sendo assim, sugere-se várias formas ou exemplos com relação a mudanças, transformações que ocorrem na natureza para se propor aos alunos, e assim também quanto a força.

## **A atenção à situação de emergência planetária: um programa de atividades dirigido aos docentes**

Na conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, foi exigida uma ação decidida dos educadores para que os cidadãos e cidadãs tomem consciência da situação e possam participar na tomada de decisões de uma forma fundamentada.

O que decorre é que ainda educamos os jovens como se não houvesse uma emergência planetária.

Este livro tenta contribuir para a necessária transformação das concepções dos professores sobre a situação do mundo, para que a habitual falta de atenção sobre o assunto se transforme numa atitude de intervenção consciente.

## **Desenvolvimento sustentado e direitos humanos**

É estranho se estabelecer uma ligação entre a superação dos problemas que ameaçam a sobrevivência da vida na Terra e a universalização dos direitos humanos.

A universalização dos direitos humanos aparece hoje com a ideia chave para orientar corretamente o presente e futuro da humanidade. Trata-se de um conceito que tem vindo a desenvolver-se até envolver três gerações.

## **A didática das ciências como um novo corpo de conhecimentos**

A necessidade de uma educação científica para todos, e as dificuldades que lhe são inerentes, culminam numa problemática de indiscutível interesse que deu origem, em primeiro a tentativas de renovação do ensino das ciências e à emergência de um novo campo de conhecimentos.

A psicologia da educação assumiu-se como um corpo de conhecimentos muito antes de podermos falar das Didáticas Específicas, principalmente porque a preocupação dos problemas de ensino e aprendizagem se centraram inicialmente no ensino de 1º Ciclo.

## **Alguns obstáculos a ter em conta**

Chamamos a atenção contra a concepção de uma Didática das Ciências que seja apenas uma aplicação prática da psicologia da aprendizagem. Trata-se de um importante obstáculo para o seu desenvolvimento que em si mesmo implica na perigosa crença de que ensinar é uma atividade simples para a qual basta apenas ter conhecimentos científicos e alguma prática.

Enquanto esta crença existir, na sociedade, nas autoridades acadêmicas e, sobretudo, nos próprios docentes, a Didática das Ciências terá uma influência muito limitada sobre as atividades escolares, o que, por sua vez, se converte num sério obstáculo para o desenvolvimento do novo corpo de conhecimentos.

## **Perspectivas para o futuro**

A primeira tendência é o reforço dos vínculos entre as distintas linhas de investigação centradas em aprofundar os fins e fundamentos de um modelo alternativo de ensino-aprendizado das ciências, ou de elaborar e experimentar proposta de formação de professores.

A aposta na procura de coerência global, superando os tratamentos pontuais, constitui uma característica que se acentuará até se converter num ponto fundamental da investigação em Didática das Ciências.

6. CHAVES, Alaor S.; VALADARES, Eduardo C.; ALVES, Esdras G. *Aplicações da Física Quântica: do transistor à nanotecnologia*. São Paulo: Livraria da Física. 2005. (Temas Atuais de Física/SBF).

### **Aplicações da Física Quântica do transistor à nanotecnologia**

CHAVES, Alaor S.; VALADARES, Eduardo C.; ALVES, Esdras G. *Aplicações da Física Quântica do transistor à nanotecnologia*. Coleção Temas atuais de Física / SBF. São Paulo: Livraria da Física. 2005.

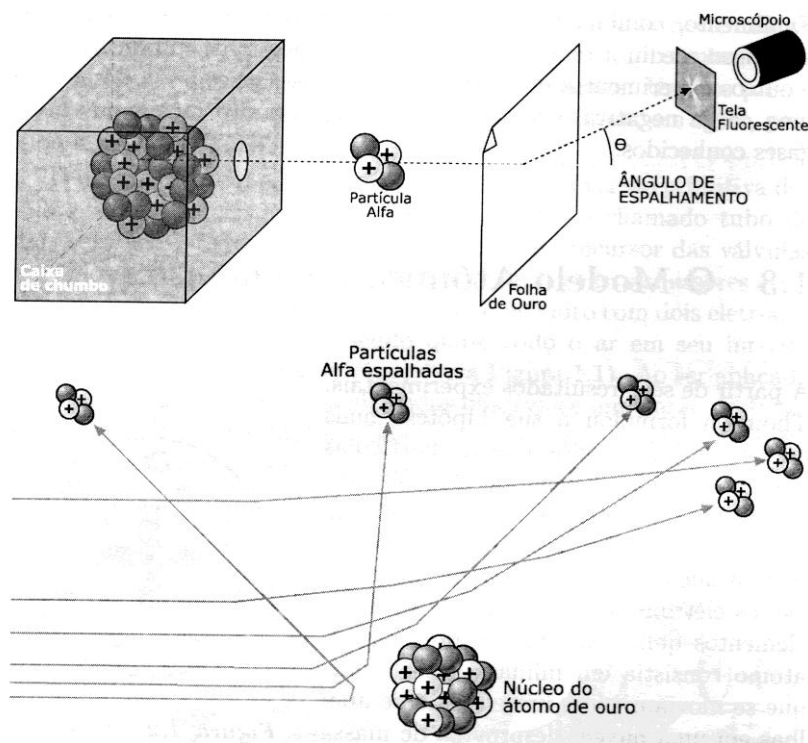
#### **A Pré-História da Nanotecnologia**

Diversos dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos, bem como o transistor e o laser, funcionam com base na existência de elétrons e na natureza quântica da matéria e da luz. O desenvolvimento de tais dispositivos foi possível devido aos avanços em ciência básica e sua aplicação em soluções para o cotidiano e a melhoria da qualidade de vida.

Os fundamentos da tecnologia atual remontam às ideias dos filósofos gregos



Leucipo e Demócrito, que consideravam a matéria constituída por *átomos*, partículas minúsculas, indivisíveis. O elétron só foi descoberto em 1897 por Thomson que criou um modelo por analogia a um enxame de abelhas em uma nuvem desprovida de massa e que possuía carga positiva, de modo que o conjunto seria eletricamente neutro. Rutherford comprovou o modelo de Thomson, propondo um novo modelo composto por um núcleo maciço com carga positiva em torno do qual gravitavam alguns elétrons, em analogia com o sistema solar. No modelo de Rutherford o átomo seria instável, do ponto de vista do eletromagnetismo clássico, sendo que os elétrons, por estarem acelerados, emitiriam ondas eletromagnéticas e perderiam energia até colidir com o núcleo, o que é negado pelas evidências. Para Bohr, as leis do mundo macroscópico não se aplicariam ao mundo atômico. Max Planck.



*Figura 1: Experimento de Rutherford para identificar núcleo atômico a partir dos desvios de partículas alfa ao incidirem em uma fina folha de ouro (CHAVES, p. 4)*

Do ponto de vista do eletromagnetismo clássico, o modelo de Rutherford para o átomo seria instável. Os elétrons em órbita em torno do núcleo atômico, por estarem acelerados, emitiriam ondas eletromagnéticas, como ocorre em uma antena transmissora, e perderiam energia até colidir com o núcleo. Assim, a matéria seria instável, o que contraria todas as evidências. Bohr supôs que as leis físicas descrevem o mundo macroscópico não se aplicariam ao mundo atômico. Na virada do século XIX para o século XX, Max Planck já havia introduzido o conceito de energias discretas para descrever o processo de interação entre radiação e matéria.

Para explicar o processo de absorção de radiação pela matéria, Einstein atribuiu à luz o caráter de partícula, mais tarde denominada de fóton, cuja energia  $E$  é proporcional à frequência  $f$  da onda eletromagnética correspondente  $E = hf$ , onde  $h$  é a constante de Planck. Bohr incorporou essas noções para descrever o átomo de hidrogênio, que possui um único elétron. Segundo Bohr, esse elétron só poderia se encontrar em certas órbitas circulares associadas a números inteiros ( $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ ). A emissão de um fóton se daria se o elétron passasse de uma órbita de maior energia para outra de menor energia. A energia do fóton emitido seria igual à diferença de energias das duas órbitas. A absorção de luz corresponderia ao processo inverso. Com isso, o espectro de emissão do átomo seria formado por linhas discretas, em contraste com o espectro contínuo da luz do Sol. O espectrômetro proposto ao final do capítulo permite observar o espectro discreto na faixa do visível de alguns gases, presentes nas lâmpadas dos postes de iluminação pública e em lâmpada fluorescente.

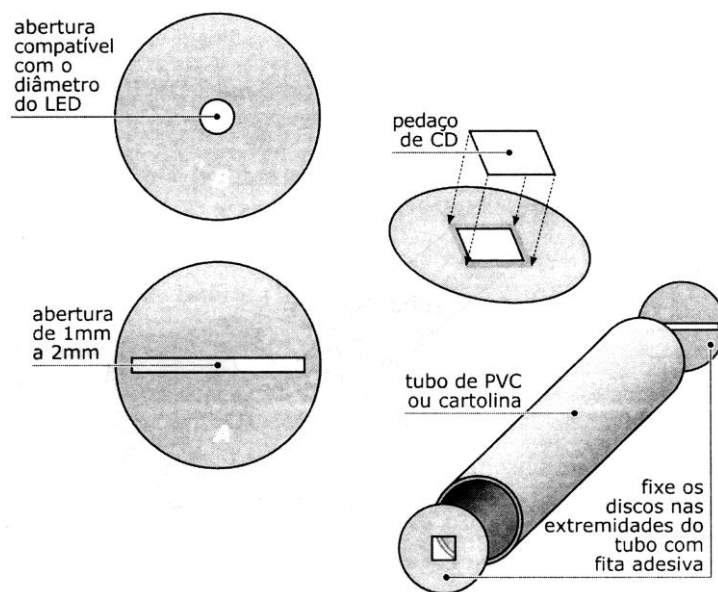


Figura 2: Espectrômetro de CD

O modelo de Bohr pressupõe que os elétrons dos átomos descrevem órbitas bem definidas em torno do núcleo atômico, assim como os planetas em torno do Sol. De Broglie sugeriu que o elétron, assim como a luz, se comporta como onda e também como partícula. A natureza dual do elétron é incompatível com a ideia de órbitas. O princípio da incerteza de Heisenberg, um dos pilares da Mecânica Quântica, estabeleceu que é impossível se determinar simultaneamente a posição e o momento do elétron, assim como o valor preciso de sua energia em um dado instante. Schrodinger introduziu uma equação de onda não relativística (válida apenas para velocidades muito menores que a velocidade da luz no vácuo), que associa ao elétron uma função chamada função de onda, expressa em termos das coordenadas espaciais  $x = (x, y, z)$  e o tempo  $t$ . Em geral  $\psi(r,t)$  é um número complexo e portanto não pode ser associado a uma grandeza física mensurável. Toda equação de onda fornece um espectro discreto de frequência para ondas confinadas espacialmente (ondas estacionárias), como ocorre na corda de um violão e em um tambor. A equação de Schrodinger aplicada a elétrons confinados, por exemplo, ligados a núcleos atômicos, fornece um espectro de átomos com mais de um elétron, o espectro de moléculas e sólidos cristalinos, que envolvem um número enorme de núcleos atômicos e de elétrons.

Dois ou mais átomos podem se ligar formando uma molécula estável. As ligações favorecidas quando a energia do conjunto se torna menor que a soma das energias de cada átomo isolado. Quando uma molécula é formada a partir de átomos com vários elétrons, aqueles mais fortemente ligados aos núcleos originais são pouco afetados. Contudo, os elétrons mais externos, denominados elétrons de valência, que se encontram mais fracamente ligados ao núcleo atômico, têm as suas funções de ondas distorcidas à medida que os átomos se aproximam. Os elétrons de valência são os responsáveis pelas ligações químicas. Com isso, a molécula passa a ter novos níveis de energia associados aos elétrons da molécula responsáveis pelas ligações químicas e a modos vibracionais e/ou rotacionais. No caso de um sólido, as múltiplas interações entre os átomos distorcem os níveis discretos dos átomos individuais, dando origem a faixas de energias (bandas), separadas por bandas proibidas, mais conhecidas como gaps.

A característica mais marcante dos metais é que eles são bons condutores de eletricidade à temperatura ambiente, ou seja, apresentam baixa resistividade elétrica,  $\rho$ , que é uma característica do material. A resistividade  $\rho$  está relacionada com a resistência elétrica  $R$  de um fio de comprimento  $L$  e área transversal  $A$  através da relação  $R = \rho L/A$ . Todavia, com o aumento da temperatura a sua resistividade aumenta. Já os semicondutores (por exemplo, silício e germânio) apresentam uma resistividade comparativamente bem maior à temperatura ambiente. Ao contrário do que ocorre nos metais, a resistividade elétrica dos semicondutores diminui à medida que a sua temperatura aumenta. Os materiais isolantes, por sua vez, usualmente não dispõem de elétrons livres, por isso não conduzem eletricidade, mesmo a temperaturas elevadas.

O comportamento elétrico dos diversos materiais pode ser compreendido, em

linhas gerais, a partir do conceito de bandas de energia e utilizando-se o princípio de exclusão de Pauli, que regula a distribuição dos elétrons nas bandas. De acordo com esse princípio, se uma banda fica cheia, a banda seguinte passa a ser ocupada, como em um estacionamento de carros com vários andares. Uma vez ocupada uma vaga, ela deixa de existir.

Nos semicondutores puros, isto é, sem átomos estranhos presentes (impurezas), a zero grau absoluto, a mais baixa temperatura possível, os elétrons preencheriam totalmente a banda de mais baixa energia denominada banda de valência, ficando vazia a banda seguinte, denominada banda de condução. Quando a temperatura do semicondutor é elevada, elétrons da banda de valência absorvem energia térmica da rede cristalina, o suficiente para alcançar a banda de condução, onde são livres para participar da condução elétrica. A vaga deixada na banda de valência, denominada lacuna, também contribui para a corrente elétrica. A lacuna pode ser vista como uma vaga em um estacionamento muito cheio. O manobrista dos carros pode mudá-la de lugar quando transfere um carro que ocupava um espaço no estacionamento para essa vaga, gerando uma nova vaga no lugar onde se encontrava originalmente. Na presença de um campo elétrico (aqui representado pelo manobrista), a lacuna (vaga) se move no sentido oposto ao dos elétrons (carros), daí ser atribuída a ela uma carga elétrica positiva, portanto oposta à dos elétrons ao mudarem de lugar. A elevação da temperatura resulta em um número maior de elétrons e lacunas disponíveis para a condução elétrica, proporcionando assim um aumento da condutividade do semicondutor.

## Dispositivos Semicondutores e os Limites da Microeletrônica

É praticamente impossível controlar o número enormemente grande de elétrons livres presentes nos metais. Por outro lado, os semicondutores, que se encontram no meio do caminho entre os metais e os isolantes, podem ser modificados de forma controlada, alterando-se com extrema precisão o número de elétrons livres disponíveis em áreas pré-definidas do material. A partir de um mesmo pedaço de semicondutor puro é possível obter-se regiões com propriedades elétricas distintas, um fator decisivo na fabricação de dispositivos isolados (discretos) e de circuitos integrados de grande complexidade. Descrevemos a seguir os princípios de funcionamento de alguns desses dispositivos, utilizados em computadores, sensores, aparelhos de televisão e em várias outras aplicações presentes no nosso dia a dia, que atestam o impacto da microeletrônica no mundo atual.

O número de elétrons livres disponíveis na banda de condução de um material semicondutor pode ser alterado de forma bastante controlada. O mesmo se aplica às lacunas na banda de valência. O processo que permite variar o número de portadores livres nesses materiais é denominado dopagem. Em um semicondutor, as ligações entre os átomos do cristal estão associadas aos elétrons de valência. Se um átomo do material for substituído por um átomo

estranho com impureza, com um elétron de valência a mais, esse elétron extra não participa das ligações que dão origem à estrutura cristalina. Como ele se encontra fracamente ligado à impureza, sua transferência para a banda de condução à temperatura ambiente é altamente provável (o elétron extrai a energia necessária para tal da agitação térmica da rede cristalina). Neste caso, a impureza é chamada doadora, pois ela doa um ou mais elétrons para a banda de condução, ficando com uma carga elétrica positiva.

Caso a impureza tenha um elétron de valência a menos, ela tenta capturar um elétron de algum átomo vizinho para satisfazer suas ligações, ficando assim carregada negativamente. Com isso é gerada uma lacuna na banda de valência, e a impureza é chamada aceitadora, já que ela aceita um elétron. Como mencionado, na presença de um campo elétrico externo, atuam como portadores de carga positiva. No caso da impureza doadora, a dopagem é denominada do tipo  $n$  uma vez que essas impurezas disponibilizam elétrons livres, com carga negativa ( $n$ ), na banda de condução. As impurezas aceitadoras produzem dopagem do tipo  $p$ , pois geram lacunas na banda de valência dotadas de carga positiva ( $p$ ).

Uma junção PN é obtida quando uma região de um material semiconductor puro é dopada com impurezas do tipo  $n$  e uma região vizinha é dopada com impurezas do tipo  $p$ . O lado  $p$  é comparativamente mais rico em lacunas, porém pobre em elétrons livres. O inverso se passa no lado  $n$ . Assim como um gás tende a ocupar um vácuo, elétrons livres da banda de condução da região  $n$  e lacunas da banda de valência da região  $p$  cruzam a interface entre as duas regiões, aniquilando-se mutuamente. Eles deixam atrás de si íons das impurezas dopantes. Assim, nas vizinhanças da interface, surge uma região de carga elétrica positiva no lado  $n$  de onde foram removidos elétrons, e uma região de carga elétrica negativa no lado  $p$ , de onde foram removidas lacunas, correspondentes às vagas de um estacionamento, ocupadas por elétrons (carros). Este processo de aniquilamento mútuo termina quando as barreiras de carga positiva no lado  $n$  e de carga negativa no lado  $p$ , próximos à interface, tornam-se suficientemente fortes para deter o avanço de elétrons para o lado  $p$  e de lacunas para o lado  $n$ . Esta região de carga elétrica é denominada região de depleção, já que ela é desprovida de portadores livres. As junções PN podem atuar como capacitores, já que na junção existe uma região de carga positiva e outra de carga negativa, de modo que a junção, como um todo, é neutra. Mas sua função é muito mais complexa que a de um capacitor convencional.

O processo de condução nos diodos é baseado na existência de uma junção PN. Os diodos apresentam uma característica que é a de conduzir corrente elétrica apenas em uma direção, denominado retificação, sendo fundamental para uma série de aplicações práticas como, por exemplo, a conversão de corrente alternada em corrente contínua, já que quase todos os equipamentos funcionam com corrente contínua. Leds (do inglês Light Emitting Diode) são diodos emissores de luz, cujo princípio de funcionamento é basicamente o mesmo de um diodo comum. A diferença reside no fato que, em um LED, o

processo de recombinação (aniquilamento mútuo de elétrons e lacunas) gera luz. Resistores dependentes da luz ou fotoresistores são dispositivos fabricados a partir de semicondutores fracamente dopados que mudam a sua resistência elétrica quando há incidência de luz. A luz incidente gera pares elétron-lacuna que são portadores de cargas livres. Quanto maior a intensidade do feixe de luz, maior é o número de fótons incidentes e também o número de pares geradores com a absorção desses fótons. A condutividade elétrica do dispositivo aumenta em decorrência do maior número de portadores livres disponíveis para o processo de condução elétrica.

Antes do advento do transistor, eram utilizadas válvulas (tubos de vidro nos quais é produzido vácuo e onde são colocados três ou mais eletrodos) para amplificar pequenos sinais elétricos, por exemplo, em rádios e outros equipamentos de áudio e tvs. As válvulas, além de volumosas, eram frágeis e pouco confiáveis, consumiam muita potência e geravam calor excessivo. Também demandavam um certo tempo para funcionar, já que um dos eletrodos deveria ser aquecido para emitir elétrons (efeito termoiônico). Os transistores, por sua vez, além de serem minúsculos comparados às válvulas, são mais confiáveis, duram mais, produzem menos calor, consomem muito menos energia e se prestam à integração em ultra-alta escala, o que não ocorre com as válvulas. É bom assinalar, contudo, que as válvulas continuam existindo na maioria dos projetos de amplificadores de áudio de topo de linha, assim como em diversos outros equipamentos para um áudio profissional. Mas mesmo nestes casos a sua utilização envolve uma combinação híbrida de circuitos digitais e válvulas. Os primeiros computadores a válvula ocupavam espaços enormes e eram bastante limitados em sua capacidade de processamento comparados com as atuais calculadoras de bolso ou PCs, baseados em transistores e circuitos integrados.

A invenção do transistor estimulou o desenvolvimento de circuitos eletrônicos cada vez mais complexos, contendo centenas ou mesmo milhares de componentes discretos como transistores, diodos, resistores e capacitores. Interconectar todos esses elementos de modo a formar circuitos eletrônicos constituía um grande desafio. O custo para soldar manualmente milhares de componentes a milhares de pequenos fios era muito elevado. Tratava-se de um processo artesanal que demandava um tempo considerável e era pouco confiável, uma vez que cada solda representava uma fonte potencial de problemas. O desafio de se fabricar, em larga escala, componentes eletrônicos interconectados, de forma barata e confiável, levou ao desenvolvimento de técnicas de miniaturização que culminaram com a invenção dos circuitos integrados.

### Dos Lasers “Gigantes” a Nanolasers

A compreensão da natureza quântica da luz permitiu o desenvolvimento do laser, que por sua vez gerou um sem número de aplicações práticas. Os primeiros desses dispositivos a base de gases eram pouco eficientes e enormes se comparados aos atuais lasers semicondutores. A transição dos lasers gigantes para os nanolasers demandou o desenvolvimento de novas técnicas de crescimento de filmes semicondutores com espessura controlada em escala atômica. Não seria exagero comparar os primeiros lasers a gás a válvulas e os lasers semicondutores aos compactos transistores.

O laser é um amplificador óptico capaz de gerar um feixe de luz intenso, direcionado e com uma frequência bem definida. Ele consiste, basicamente, de um meio ativo, que pode ser sólido, líquido ou gasoso, onde a luz é gerada e amplificada, inserido entre dois espelhos paralelos ou arranjos equivalentes (cavidades ópticas, análogas à caixa de ressonância dos instrumentos musicais). Um desses espelhos reflete quase totalmente a luz nele incidente, ao passo que o outro é semitransparente, deixando passar uma fração do feixe incidente.

A utilização de lasers, mesmo de baixa potência, requer algumas medidas de segurança. Nunca se deve apontar o feixe do laser para os próprios olhos ou para os olhos de outra pessoa, nem incidir o feixe em um espelho de modo a atingir o olho de alguém. O raio laser pode causar danos permanentes à retina.

Os elétrons de um átomo tendem a ocupar os níveis de mais baixa energia. Contudo, eles podem ser transferidos para níveis desocupados de mais alta energia por meios externos. As transições desses elétrons para níveis de mais baixa energia envolvem a emissão de fótons. Existem dois modos pelos quais um átomo excitado pode emitir um fóton ao retornar ao seu estado original de mais baixa energia. A emissão pode ser (a) espontânea ou (b) estimulada. Na emissão espontânea, um elétron excitado decai para um estado de mais baixa

energia sujeito apenas à ação das chamadas flutuações quânticas do vácuo. Essas flutuações são inevitáveis e estão presentes em todos os pontos do espaço. Por isso, as transições eletrônicas induzidas pelas flutuações do vácuo são denominadas espontâneas. Na emissão estimulada, um fóton incidente estimula o átomo excitado a emitir um fóton idêntico ao fóton incidente. Para que haja uma produção maciça de fótons idênticos (amplificação de luz) é necessário que o número de átomos no estado excitado seja superior ao de átomos não excitados (inversão da população). Do contrário, haverá mais processos de excitação eletrônica que absorvem fótons do que processos de decaimento que os produzem o que irá gerar absorção de luz, e não amplificação. Em suma, para que o meio amplifique a luz, ele deve gerar mais fótons do que absorve. Todavia, quando há uma pronunciada inversão de população, estando o meio em uma cavidade óptica, a emissão sucessiva de um número enorme de fótons com a mesma frequência. Uma vez que a maior parte desses fótons fica confinada na cavidade óptica, ocorre um processo de clonagem de fótons com amplificação em cascata. Este processo produz luz monocromática e coerente, ou seja, todos os fótons têm a mesma frequência e a mesma fase, já que todos são, a princípio, iguais.

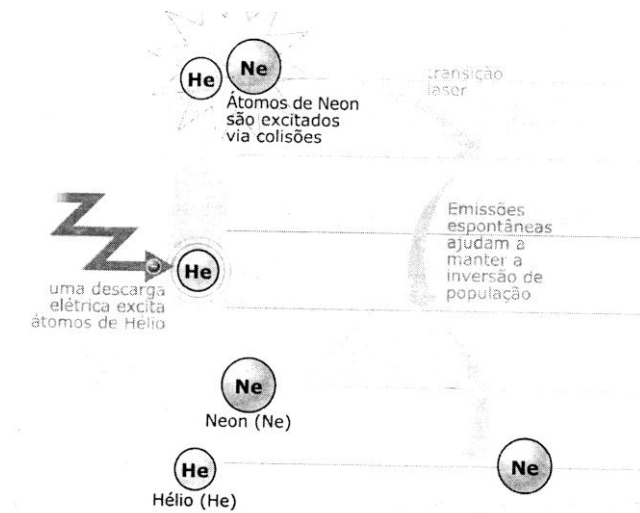


Figura 3: Mecanismo de inversão de população em um laser de He-Ne. Fonte: Chaves, p. 40

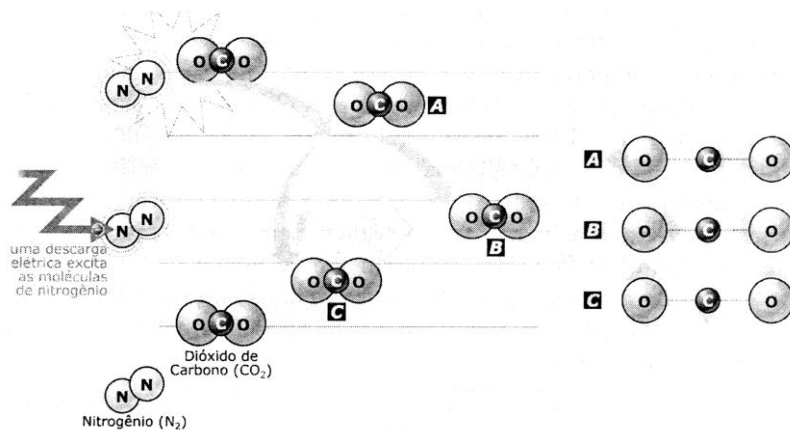




Figura 4: Mecanismo de inversão de população em um laser de CO<sub>2</sub>. Fonte: Chaves, p. 41

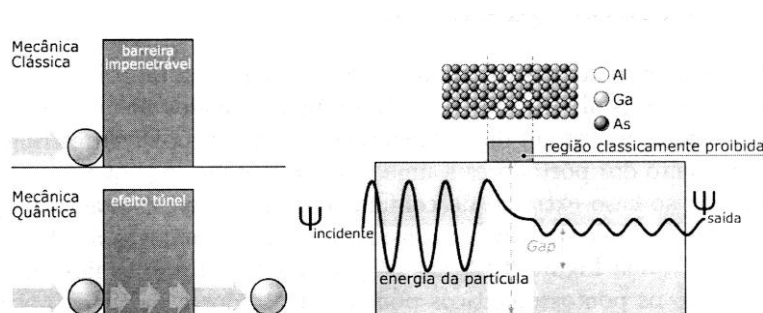


Figura 5: Tunelamento quântico, atravessando barreiras classicamente intransponíveis. Note que o comprimento de onda da função de onda nos dois lados da barreira é o mesmo, já que a energia do elétron é a mesma.

## O Potencial Gigantesco do Infinitamente Pequeno

Nos últimos anos, o termo nano tem aparecido com frequência na mídia, associado às palavras nanociência e nanotecnologia. Nem sempre o que é divulgado tem base científica. Por exemplo, robôs ultraminiaturizados capazes de operar maravilhas no mundo microscópico são ainda ficção científica. Realisticamente, temos hoje dispositivos eletrônicos ou eletromecânicos de dimensões nanométricas, também conhecidas como sistemas nanométricos eletromecânicos obtidos por nanofabricação.

O lado atualmente mais visível da nanotecnologia está ligado ao desenvolvimento de novos materiais avançados, à síntese controlada de moléculas gigantes com propriedades inéditas, ao desenvolvimento de medicamentos mais eficientes e seguros, e a uma grande variedade de outros avanços extraordinários com base na manipulação da matéria em escala atômica. Estamos no limiar de uma verdadeira revolução tecnológica, cuja evolução deverá abranger décadas, com um impacto que provavelmente deverá superar o de todas as revoluções técnicas do passado. Dela resultarão materiais inéditos, grandes avanços na medicina e na farmacologia, métodos muito mais eficientes para a indústria química e petroquímica, computadores com um grau de sofisticação e complexidade sem precedentes provavelmente baseados em outros princípios físicos, maior eficiência no uso da energia, grandes inovações na área do meio ambiente e vários outros avanços que podemos apenas vislumbrar.

A nanociência e a nanotecnologia têm um caráter interdisciplinar, envolvendo principalmente a física, a química, a ciência dos materiais, a biologia e a

engenharia elétrica. Com o crescente poder de processamento dos computadores e o uso de métodos teóricos e computacionais da química quântica é possível explicar as propriedades de aglomerados atômicos de complexidade crescente na escala nanométrica, e mesmo prever com segurança as propriedades de objetos nanométricos ainda não produzidos. No nanomundo, os fenômenos de natureza quântica se manifestam com frequência de forma surpreendente. Graças aos avanços da nanociência e da nanotecnologia, pela primeira vez é possível estudar as propriedades dos componentes básicos dos seres vivos e, assim, abordar em condições talvez mais favoráveis daquele que é o maior de todos os desafios científicos: a compreensão da vida.

Um ponto importante no qual se baseia a nanotecnologia é o fato de que o tamanho de um objeto afeta as suas propriedades quando se atinge a escala nanométrica. Um pequeno cubo de ferro ilustra bem o que acontece quando é subdividido sucessivamente, gerando blocos cada vez menores. O cubo original apresenta propriedades específicas do elemento ferro: ponto de fusão, cor característica, imantação (transforma-se em ímã permanente na presença de um campo magnético), etc. Enquanto as dimensões dos pequenos cubos se encontrarem fora da escala nanométrica, as suas propriedades físicas não dependem do tamanho dos blocos. Embora os cubos deixem de ser visíveis quando o seu lado fica menor que um décimo de milímetro, ainda assim podemos observá-los com um microscópio óptico e verificar que eles apresentam as propriedades usuais do ferro. Talvez a sua cor mude, sinal que algo estranho acontece quando os blocos se tornam minúsculos. Quando os cubos atingem a escala nanométrica, mudanças drásticas começam a ocorrer. Os nanoblocos fundem-se a temperaturas mais baixas e deixam de formar ímãs, entre várias outras alterações dependentes do tamanho dos cubos.

O exemplo dos blocos de ferro evidencia que as propriedades especiais dos nano-objetos decorrem do seu tamanho diminuto. A Nanociência e a nanotecnologia dedicam-se a desvendar essas novas propriedades e a explorar as suas múltiplas aplicações tecnológicas. É importante ressaltar, todavia, que além do tamanho dos objetos, o que define a nanociência e a nanotecnologia são os novos procedimentos utilizados para se investigar o nanomundo. Os químicos, por exemplo, há muito estudam como os átomos se juntam para formar moléculas. Deste modo, a química deveria ser incorporada, pelo menos em parte, à nanociência. O mesmo poderia ser dito em relação à biologia, uma vez que os organismos vivos são formados a partir de objetos nanométricos, ou seja, a partir de moléculas complexas ou de arranjos ainda mais complexos dessas moléculas.

A nanoquímica vai muito além dos procedimentos tradicionais adotados pelos químicos para sintetizar compostos, como misturar, agitar, aquecer, filtrar, destilar, etc. Os químicos, além desses métodos, utilizam agora técnicas mais elaboradas. Inicialmente uma nova molécula é projetada. Para fabricá-la são utilizados métodos que envolvem manipulação da matéria na escala atômica, não raro em ambiente de ultra alto vácuo. Para que a molécula adquira as propriedades desejadas, um novo átomo ou conjunto de átomos ligados deve

ser adicionado em um ponto predeterminado da molécula. É como se os químicos brincassem de “lego”, com a diferença de que as peças básicas agora são átomos e moléculas. Enfim, o que caracteriza tanto a nanociência quanto a nanotecnologia é a adoção de técnicas que permitem tanto visualizar como manipular a matéria na escala nanométrica, incluindo a manipulação direta de átomos.

A utilização técnica de propriedades da matéria dependentes do tamanho dos objetos não é algo inédito. Talvez a olaria seja o exemplo mais antigo. As argilas são materiais que contém grãos minúsculos, que podem chegar a dimensões nanométricas. A plasticidade da argila molhada decorre da sua minúscula granulação. Após a moldagem de um objeto, ele é cozido. Com isso seus grãos se ligam endurecendo a argila. Utensílios e objetos de arte feitos de cerâmicas à base de argilas estão entre os artefatos arqueológicos mais antigos já encontrados. A tinta nanquim, produzida pelos chineses há cerca de 2 mil anos é constituída de partículas nanométricas de grafite suspensas em água. Os chineses descobriram empiricamente que a adição de goma arábica à emulsão impede que as partículas de grafite se juntem. Segundo a compreensão atual, as moléculas da goma recobrem as partículas de grafite, impedindo dessa forma que se agreguem. Outro exemplo notável são os vitrais das igrejas medievais. Os vidreiros da época descobriram que a adição de partículas de ouro de tamanhos diversos aos vidros lhes conferia cores variáveis e brilhantes. Somente hoje, após o desenvolvimento da mecânica quântica e da óptica física, podemos entender como as dimensões das partículas de ouro determinam as componentes da luz visível absorvida e emitida pelas partículas.

Um exemplo atual são os catalisadores, substâncias que facilitam reações químicas que, sem a sua presença, seriam extremamente lentas. Os catalisadores sólidos, todos eles compostos de grãos de tamanho nanométrico, são utilizados intensivamente na indústria química há mais de um século. Grãos de pequenas dimensões têm uma superfície exposta considerável, que os torna superiores em termos de interação efetiva com os reagentes químicos comparados aos grãos maiores. Como a ação dos catalisadores se dá na superfície dos grãos, quanto maior a relação superfície, maior será a sua eficiência. A nanociência e a nanotecnologia se tornam possíveis graças a dois avanços decisivos. O primeiro deles está associado à invenção de instrumentos de visualização e manipulação da matéria, os chamados microscópicos de varredura por sonda. O outro fator decisivo foi o desenvolvimento de equipamentos capazes de produzir filmes sólidos com controle de espessura em escala atômica.

A auto-organização é um fenômeno fascinante que se manifesta na natureza de forma extremamente diversificada, abrangendo desde a escala atômica à escala macroscópica. Um exemplo de auto-organização em que esses dois limites são visíveis é o de cristalização de um material. Quase todos os componentes simples, quando resfriados lentamente, ao se solidificarem formam uma estrutura cristalina tridimensional. Trata-se de um arranjo de átomos que

se repete no espaço, de forma semelhante a ladrilhos de um piso. É extraordinário que átomos ou moléculas, que no estado líquido se movimentam de forma caótica, possam se ordenar de forma tão simétrica e perfeita ao se solidificar, como ocorre em um cristal. Essa auto-organização dos átomos na escala atômica gera outra auto-organização. Ela se manifesta no cristal em faces planas formando entre si ângulos bem definidos. Aqui a auto-organização macroscópica é consequência da auto-organização nanoscópica.

Materiais nanoestruturados por auto-organização estão sendo utilizados como catalisadores de alto-desempenho. Dentre eles se destacam as zeólitas, compostos complexos contendo silício, alumínio, oxigênio e uma variedade de outros elementos. As zeólitas apresentam poros com dimensão de fração de nanômetro e são encontradas em minérios. Elas também podem ser sintetizadas sob condições de altas pressões e a temperaturas de algumas centenas de graus Celsius.

O átomo de carbono é um elemento versátil que pode ser encontrado em vários arranjos atômicos. Ele é a base de vários materiais de grande importância tecnológica e também da própria vida. Um de seus arranjos mais conhecidos é a grafite, no qual átomos de carbono formam redes hexagonais dispostas em planos paralelos, havendo uma fraca ligação entre planos vizinhos. Os nanotubos de parede única são caracterizados por dois parâmetros: o seu diâmetro e a quiralidade, associada à orientação dos hexágonos de carbono em relação ao eixo do tubo. Em aplicações avançadas, é desejável que os nanotubos apresentem diâmetro e quiralidade uniformes, daí a importância do controle desses dois parâmetros no processo de síntese. Dessalinizadores de água à base de nanotubos de carbono já são uma realidade. Como também lâmpadas incandescentes em que o tradicional filamento de tungstênio foi substituído por um fio composto por nanotubos. A lâmpada demonstrou a capacidade de irradiar intensamente a temperaturas bem abaixo das lâmpadas tradicionais que utilizam filamento de tungstênio.

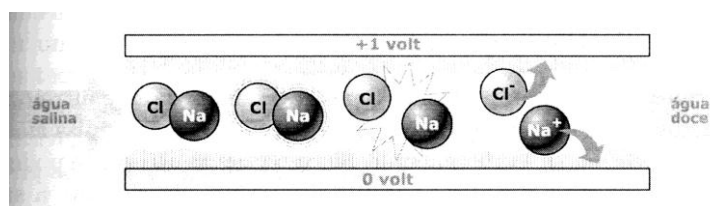


Figura 4: Dessalinizadores de água baseados em nanotubos de carbono. Fonte: Chaves, p. 63

A área de medicamentos está sendo revolucionada pela nanotecnologia. Isto se deve ao fato que quase a metade dos compostos com ação farmacológica não são solúveis em água. Assim, quando preparados da forma convencional, eles não são fixados pelo organismo. Compostos nanogranulados têm a sua ação assegurada. Isso decorre de sua grande solubilidade e por serem

absorvidos pelos tecidos doentes mesmo no estado sólido. Atualmente estão sendo desenvolvidas algumas drogas extremamente eficientes baseadas em partículas nanométricas. Pretende-se que elas circulem no sangue e sejam absorvidas seletivamente por células cancerosas, por exemplo. A seletividade dessas drogas reduz drasticamente efeitos colaterais indesejáveis. Uma das grandes deficiências da farmacologia tradicional é o seu empirismo, talvez, em grande parte, inevitável, tendo em vista a complexidade dos processos bioquímicos. Na maioria dos casos descobre-se que uma droga funciona no combate a determinada doença por tentativa e erro. Como o seu mecanismo de atuação é muitas vezes desconhecido, não há controle efetivo da droga, tornando-se difícil prever os seus efeitos colaterais adversos. Frequentemente, as sequelas de uma droga ficam evidentes após um tempo prolongado de uso. Um dos objetivos da nanotecnologia é desenvolver drogas cuja ação possa ser melhor compreendida. Com isso pretende-se controlar a sua capacidade de inibir ou promover ligações com moléculas presentes na membrana celular. Imagine uma molécula solúvel cuja conformação especial permitia neutralizar o efeito de uma dada molécula que pode ser nociva ao organismo. As duas moléculas se reconheciam mutuamente e se combinariam. Depois disso a molécula potencialmente nociva deixaria de ser ativa. Medicamentos desse tipo podem vir a ser consideravelmente mais seguros e eficazes.

A nanotecnologia está obtendo progressos consideráveis no que se refere à disponibilidade de uma droga. Existem dois aspectos a serem considerados. Um deles é manter níveis mais ou menos estáveis de concentração da droga no organismo por tempos relativamente longos. Para se obter uma concentração estável tem sido usado o artifício de encapsular drogas no interior de partículas poliméricas nanométricas. O polímero é selecionado para dissolver-se lentamente no interior do organismo, liberando a droga e disponibilizando-a aos poucos. Medicamentos assim encapsulados são conhecidos como drogas tamponadas. Em alguns casos, o polímero apenas se dissolve em circunstâncias especiais e desejáveis. Nanopartículas magnéticas biocompatíveis constituem outra linha de ação da nanotecnologia aplicada a medicina. Dois tipos de processos devem ser considerados. Um deles, drogas que devem atuar em um ponto específico do corpo humano, por exemplo no cérebro ou em um tumor, são encapsuladas em nanopartículas magnéticas e injetadas no organismo. Através de ímãs, e utilizando-se alguma técnica que permita visualizar o trajeto das partículas no corpo, o médico as arrasta até o local desejado, onde a droga é liberada. Assim, são obtidas altas concentrações da droga no local desejado sem que elas se disseminem por todo o corpo e ataquem outros órgãos. As soluções proporcionadas pela nanotecnologia para os graves problemas ambientais da atualidade atestam a sua grande versatilidade. Um exemplo ilustrativo é o uso de partículas magnéticas extremamente porosas na remoção de petróleo em águas contaminadas por acidentes de vazamento.

Os exemplos apresentados ilustram o enorme potencial da nanotecnologia em campos bastante diversificados com impacto direto no dia a dia das pessoas. Essa nova revolução tecnológica que se delineia representa também o estágio

mais radical de aplicação da Mecânica Quântica, que inspirou o transistor, o laser e as ferramentas que têm permitido manipular átomos e moléculas. Os desdobramentos desse campo de pesquisas multifacetado em rápida expansão são imprevisíveis. Todavia, é de se supor que a nanotecnologia afetará drasticamente o modo como vimos e vemos o mundo. O meio ambiente, o funcionamento de nosso corpo e de outros organismos vivos e a busca de uma matriz energética inédita serão alvos dos futuros avanços, gerando grandes oportunidades e desafios.

7. DELIZOICOV, Demétrio; ANGOTTI, José André; PERNAMBUCO, Marta Maria. *Ensino de Ciências: fundamentos e métodos*. São Paulo: Cortez, 2003.

Flávia Motta Lima- Curitiba/PR

O presente livro faz parte de uma coleção denominada – Coleção Docência em Formação, esta é destinada a formação inicial de professores e na formação continuada de professores que se encontram em exercício, fornecendo subsídios formativos em consonância com as novas diretrizes curriculares e a LBD, apresenta as Ciências Naturais como um conteúdo cultural relevante para que possamos compreender e atuar no mundo contemporâneo. Incentivar os professores a mudanças em sua docência, saber usar e disseminar novos conhecimentos e práticas aos alunos, é a proposta dos autores do livro.

O capítulo 1 aborda os desafios do ensino de Ciências, que não é restrito a esta disciplina, e sim a toda educação escolar que vive em um momento de transformações, devido aos desafios do mundo contemporâneo, que refletem na formação inicial e continuada de professores que apresenta sinais inequívocos de esgotamento.

A primeira questão levantada pelos autores é a forma como a Ciência é trabalhada, apresentada como uma ciência morta, pelo distanciamento do uso dos modelos e teorias para compreensão dos fenômenos naturais e fenômenos vindos da ação do homem além de apresentar a ciência como um produto acabado e inquestionável.

Em outros tempos, poucos alunos chegavam ao ensino médio e a minoria fazia o nível superior. Hoje, não foi só o número de estudantes que aumentou; modo como eles chegaram também mudou: novas formas de expressão, crenças diferenciadas, expectativas de vida diferenciadas, ou seja, temos um novo público que traz a necessidade de mudanças no ensino de ciências.

Assim, temos dois tipos de ensino de Ciências: um voltado para a formação de cientistas e outro, que é a *ciência para todos* que exige mudanças na atuação do professor, na medida em que este deverá se mobilizar na busca por construir o entendimento de que o processo de produção do conhecimento, que caracteriza a ciência e tecnologia, não pode ser desvinculado da realidade, pois é resultado da ação humana sócio-historicamente determinada e submetida a pressões internas e externas.

Um ponto interessante destacado pelos autores diz respeito à Cultura, termo este que nos remete à Arte, Cinema, Letras e desvincula a Ciência e Tecnologia que são também formas de cultura com teorias e práticas em seu sentido mais amplo.

Os autores destacam que o livro didático é ainda insuficiente como principal ferramenta de trabalho do professor. Hoje, há uma grande discussão nacional sobre os equívocos, principalmente de conceitos e metodologias, apresentados nos livros didáticos, e pouco se tem dado importância a outras fontes de informações como livros paradidáticos, recursos midiáticos e rede *web*.

Outra forma de desvinculação do processo de ensino/aprendizagem são os espaços de divulgação científica e cultural como: museus, planetários, exposições, feiras e clubes de ciências, estes chegam a ser tratados como opções de lazer e não como fontes de aprendizagem e extensão do espaço escolar.

Trabalhar com produção científica no ensino de Ciências exige que antes o professor faça uma reflexão baseada em quatro pontos: o primeiro é que o conhecimento científico não é pronto, verdadeiro e acabado, pois é um processo em constante transformação e dinâmico; o segundo ponto é sempre abordar a conceituação científica contida nos modelos e teorias; o terceiro ponto é analisar qual conhecimento científico deve ser ensinado aos alunos e quais não serão abordados e por que, e o último ponto, a ser levado em consideração no trabalho com a produção científica, é a relação ciência-tecnologia, sendo que esta não pode ser ignorada quando se ensina Ciências.

Portanto, o ensinar Ciências no ensino fundamental e médio é permitir ao aluno se apropriar da estrutura do conhecimento científico e de seu potencial explicativo e transformador, garantindo assim uma visão mais ampla e abrangente dos modelos e teorias.

Alguns temas, quando tratados no ensino de Ciências, são brevemente apresentados aos alunos, ignorados ou até mesmo desatualizados. Um exemplo disto é o modelo atômico que trabalha a questão dos elétrons, prótons e nêutrons, mas sabe-se pouco sobre os *quarks*

que estão lá presentes no núcleo atômico; outro exemplo é o tema *deriva continental* - falamos das placas tectônicas, camadas rochosas e fósseis, mas pouco se fala da movimentação do manto superior a uma profundidade de 700 km da superfície, sugerindo correntes profundas de convecção.

A forma como são descritos os ventos, marés, nuvens, auroras boreal e austral, extinção de espécies seguramente não acontecem na Terra como se explica nas aulas de Ciências e em outras disciplinas.

Uma explicação básica para a existência de vida na Terra é a presença do processo de fotossíntese como sendo a única fonte de energia para os seres vivos e isto acontecendo há cerca de 4 bilhões de anos atrás, mas estudos recentes mostram que um dos indicadores de aumento de oxigênio da Terra, um minério primevo de óxido de ferro, não supera 2,7 bilhões de anos.

Quando se trata de código genético, um exemplo, que não é abordado em sala de aula, é o fato de que bactérias presentes em fundos de poços de petróleo possuem o mesmo código genético que bactérias que vivem em nosso intestino.

Esses são alguns temas que são parcial ou totalmente abstraídos do ensino de ciências.

### **Aluno como sujeito do conhecimento**

Ao pensar nos alunos, geralmente, os categorizamos em um grande grupo, não os pensamos como pessoas concretas, com desejos, aspirações, dificuldades, capacidades. Sabemos pouco sobre os alunos: quem são, o que esperam da escola, o que os preocupa, como aprendem. Reflitamos um pouco mais sobre isso.

Quando se fala em sujeito de aprendizagem, estamos nos referindo a uma pessoa que realiza uma ação e não quem sofre ou recebe esta ação, que é construída pela interação entre o sujeito e o meio que o circunda, natural e social. Ultimamente, tem se pensado muito no desempenho da ação docente e pouco se tem pensado sobre o efeito desta sobre o aluno, que tipo de aprendizagem se está propiciando, se o currículo está adequado ao meio do aluno, não se pára para pensar do porquê da sequência de conteúdos em livros e guias curriculares, será que o aluno é o foco da aprendizagem? É preciso pensar mais sobre quem é esse aluno.



Trabalhar com o conhecimento científico, nos dias de hoje, é relacioná-lo com estilos de vida como o naturalismo, questionar decisões políticas e econômicas etc. Portanto, a ciência não é mais um conhecimento exclusivo do espaço escolar, nem restrito a uma camada social; é algo contemporâneo que influencia decisões mundiais. Por isso, trabalhar com as informações da ciência de forma isolada e tradicional leva a um ensino fora do contexto mundial.

### **Quem é o sujeito do conhecimento?**

A existência humana pode ser caracterizada em três esferas: **a simbólica, a social e a produtiva**, sendo que estas identificam o perfil do aluno que possui origens diversas e vive o mundo contemporâneo.

A **esfera simbólica** refere-se àquele sujeito que está continuamente construindo explicações sobre o mundo que o cerca, desde o seu nascimento e ao longo de toda a sua vida; é nesse ambiente que ele constrói tanto a sua linguagem, quanto as explicações e conceitos vindos das suas relações e da sua constituição orgânica.

No ensino de Ciências Naturais, parte-se do princípio de que o sujeito já vem com seus conhecimentos prévios a respeito do objeto de ensino, sendo esta ciência composta de um conjunto de explicações com características próprias e procedimentos acerca da natureza e os artefatos materiais.

Assim, os sujeitos vão construindo suas ideias, conceitos, um conjunto de pensamentos em uma relação lógica ou em um emaranhado de informações, mas que levam a ação do sujeito em seu mundo.

A aprendizagem em Ciências Naturais parte de um conhecimento prévio chamado de *cultura primeira ou prevalente*. Este conhecimento se dá a partir de sensações orgânicas, experiências sobre objetos, artefatos e fenômenos, relações direta ou indireta com outras

pessoas ou com meios de comunicação, preceitos religiosos e tradições locais. Mediante isso, a cultura primeira e o conhecimento sistematizado caminham juntos convivendo e alimentado-se mutuamente.

Portanto, o conhecimento em Ciências Naturais causa impactos na visão de mundo, interagindo com interpretações religiosas, comportamento e hábitos da tradição, e isto possibilitará que o aluno perceba as diferenças estruturais nos procedimentos e conceitos.

O estudo da **esfera social** será dividido em quatro grupos: unidade familiar, escola, trabalho e outras relações sociais.

A **unidade familiar** pode ser considerada desde a tradicional - aquela composta pelo pai, mãe, filhos, a família extensa aquela constituída pelos avós, primos e outros parentes, à instituição onde os adolescentes encontram-se internados, e ao grupo primário atribuída ao grupo de adolescentes que vivem nas ruas. Esta organização apresentada acima possui suas regras, valores, hábitos e comportamento peculiares e faz com que os adolescentes criem bagagens e demandas diferentes e é esta heterogeneidade que é trazida para a sala de aula.

Com isto, trabalhar com Ciências Naturais como um processo hierarquizado de informações, com sequências rígidas e fragmentadas de ensino, somente irá adiar ao aluno a possibilidade de compreensão e explicação da realidade e a possibilidade de intervenção nesta.

Outro espaço social é a escola onde ocorrem relações sociais mais amplas, mas com regras instituídas. Portanto, as relações são mais normativas do que afetivas e construídas em torno da aprendizagem.

A escola é um espaço com autonomia para ter seu próprio projeto pedagógico, regulamentos e normas. Neste espaço, conflitos de adolescência são tratados de formas diferenciadas - alguns com sucesso e outros não. É nesta realidade que o professor de Ciências está imerso, é um desafio tornar o conteúdo atraente para a curiosidade ilimitada do adolescente.

É na escola que se aprende a enfrentar situações do cotidiano, a resolução de problemas individuais e coletivos, trabalhos em grupo, ou seja, diversas situações com seus limites e possibilidades.

Mas um espaço social é o trabalho que implica na convivência determinada pela produção material e intelectual - a marca desta relação social é a impessoalidade. Neste meio,

encontramos crianças e adolescentes submetidos a cargas horárias, muitas vezes extenuantes, com atividades que exigem muito esforço físico, e até mesmo a situações de risco e de insalubridade.

Ser escolarizado passa a ser uma condição indispensável para o mercado de trabalho ou a pessoa é vista como insuficiente para o cargo pretendido, e além da escolaridade, a tendência dos empregos, atualmente, é exigir a demonstração da capacidade do indivíduo de se adaptar as novas formas de trabalho.

A relação do professor de Ciências, nesse mundo do trabalho, é considerada positiva, pois além da sua formação básica, ele dispõe de farto material da área nos meios digitais e impressos como internet, vídeos, jornais e revistas, sendo preciso apenas o professor selecionar estas informações e reagrupá-las, possibilitando ao aluno o desenvolvimento de algumas habilidades necessárias para a inserção no mercado.

A última relação de sociabilidade é aquela que ocorre particularmente com adolescentes: é a relação de namoro, amigos, grupos religiosos e esportivos, participação em grêmios escolares e em jogos/competições esportivas, são espaços onde os adolescentes exercem sua autonomia individual ou em grupo, e onde ele se expressa, experimenta, reestrutura valores e comportamentos.

Voltando a última esfera, que caracteriza a existência humana - a **produtiva**, que é a capacidade humana de intervir no seu ambiente ou nas próprias relações. Surgiu, assim, o campo das ciências naturais - a partir dos conhecimentos e técnicas para a intervenção na natureza e na busca de sua compreensão, sendo que o resultado dessa intervenção é e foi positivo, pois permitiu a geração de novas tecnologias.

### **Relação entre conhecimentos do professor e dos alunos**

O professor, além de ser o porta-voz de um conteúdo escolar em sala de aula, é mediador da aprendizagem do aluno, e é nesta relação que ele busca sua realização profissional e pessoal, por meio de resultados positivos de seu trabalho - um exemplo deste resultado é ver alunos aprendendo e gostando de aprender.

O aluno é sujeito da sua própria aprendizagem, é nas relações pessoais que ele compartilha, convive e aprende novos conhecimentos.

A interação estabelecida em sala de aula entre o professor e alunos é sempre entre o professor com um grupo de alunos, mesmo tendo alunos com tempos, demandas diferentes, esta relação sempre será com o grupo.

O desafio ao professor é tornar a aprendizagem dos conhecimentos científicos algo prazeroso e significativo para a vida do grupo de alunos. Buscar o novo em Ciências Naturais é trazer para a sala de aula recursos midiáticos como jornais, revistas e novidades da Internet, visitações a museus, exposições de cunho científico, além de tornar o espaço físico da escola um local de divulgação científica como murais, jornais da escola, livros de ficção científica, feira de ciências e isto não é restrito à sala de aula, mas ao pátio e corredores da escola.

## **Conhecimento e sala de aula**

*“A sala de aula é o local privilegiado do ponto de vista das relações que se estabelecem entre aluno e aluno, aluno e professor e destes com o conhecimento, uma vez que, cotidianamente, essas relações têm ocorrência sistemática, sendo planejadas com base em alguma perspectiva didático-pedagógica.” (Delizoicov, D, 2007.)*

Quando é apresentado o sujeito do conhecimento podemos denominar aquele que conhece e o objeto do conhecimento àquilo que se quer conhecer, já para a visão clássica da

ciência isto é questionável, pois para o surgimento de novos conhecimentos científicos é preciso ter uma intensa interação entre o sujeito e o objeto de estudo.

Uma preocupação do filósofo Gastón Bachelard é a descontinuidade do processo de apropriação dos conhecimentos tanto para os estudantes quanto para quem produz cientificamente. Ele e outros epistemológicos acreditam que teorias formuladas somente a partir de objetos ou aquelas que envolvem somente o sujeito, não são referências adequadas às teorias do conhecimento. Assim, o que temos de mais atual é o surgimento de teorias cuja premissa é a interação não neutra entre sujeito e objeto.

Disto aparece o sujeito coletivo constituído pelas esferas simbólica, social e produtiva, conforme apresentado em **Quem é o sujeito do conhecimento?** Este sujeito coletivo é o sujeito individual quando passa a interagir, a se relacionar com o meio físico e social pelos quais se apropria de padrões quer de comportamento quer de linguagem, para uma abordagem do objeto do conhecimento.

### **Dimensão educativa das interações**

O conhecimento pode ser dividido em duas categorias: o conhecimento científico e o senso comum, este último faz parte do conhecimento prévio do aluno. Segundo Paulo Freire e George Snyders contemplam, em suas concepções, a proposta do ensino sempre como uma abordagem temática que possibilite a ocorrência de rupturas durante a formação do aluno. Esta abordagem temática são os objetos de estudo ou objetos do conhecimento; outro ponto a ser destacado na proposta de Freire e Snyders é quanto ao currículo escolar, que deve ser estruturado com atividades educativas, com seleção de conteúdos que constem na programação das disciplinas e com uma abordagem sistematizada em sala de aula, rompendo assim com a forma posta do ensino tradicional que tem como princípio a conceituação científica. Segundo os dois autores, a conceituação científica será abordada no processo educativo ficando subordinada às temáticas significativas quanto à estrutura do conhecimento científico.

Assim é legado à educação escolar um trabalho didático-pedagógico que leva os alunos a fazerem rupturas durante o processo educativo, na abordagem dos conhecimentos que serão organizados em temas que, então, se tornarão conteúdos programáticos.

## **Dimensão didático-pedagógica das interações**

Quando se fala do processo didático-pedagógico é preciso garantir a apreensão do significado e interpretação dos temas pelos alunos e que estes possam ser problematizados. Segundo Freire nem só os significados e interpretações dos temas serão apreendidos e problematizados pelos alunos, o que o professor traz em sua bagagem pessoal e de formação é considerado também no processo educativo.

Com isto, é importante compreender a necessidade de estruturar o currículo por temas e com situações que sejam significativas para o aluno, ao invés de estruturar o currículo na perspectiva conceitual. Dessa forma, teremos os conhecimentos e compreensão dos sujeitos da educação – aluno e professor - em relação ao tema e ao objeto de estudo.

Assim, os alunos terão mais a dizer sobre racionamento de energia, poluição do ar e AIDS do que em relação à radiação solar, mudança de estado da matéria, indução eletromagnética pressupostos que serão do conhecimento do professor de Ciências.

*“Em síntese: a abordagem dos conceitos científicos é ponto de chegada, quer da estruturação do conteúdo programático quer da aprendizagem dos alunos, ficando o ponto de partida com os temas e as situações significativas que originam, de um lado, a seleção e organização do rol de conteúdos, ao serem articulados com a estrutura do conhecimento científico, e de outro, o início do processo dialógico e problematizador.”*  
(Delizoicov, D. 2007)

Paulo Freire propõe o processo de codificação-problematização- decodificação, para a dinâmica da interação na sala de aula, que tem como meta subsidiar o enfrentamento e a superação do que é apresentado pelo aluno em sua cultura primeira. Com isto, o professor verifica qual o significado que o sujeito-aluno atribui às situações, o aluno problematiza por meio de formulação de problemas a serem enfrentados com uma interpretação científica introduzida pelo professor.

Um dos pontos a serem trabalhados no processo educativo pelo professor é apreender o conhecimento já construído pelo aluno, pois assim conseguirá aguçar as contradições e localizar as limitações desse conhecimento (cultura primária) e propiciar um distanciamento crítico do educando ao se defrontar com o conhecimento que ele já possui e, ao mesmo tempo, propiciar a alternativa de apreensão do conhecimento científico.

Para se estabelecer uma dinâmica da atuação docente em sala de aula, algumas iniciativas educacionais caracterizaram esta dinâmica em momentos pedagógicos com funções específicas e diferenciadas aqui descritas:

### **Problematização inicial**

É o momento inicial onde o professor apresenta situações reais que os alunos conheçam e vivenciam em que são introduzidos os conhecimentos científicos. É o momento no qual os alunos são desafiados a expor o que pensam sobre o assunto e o professor irá problematizar este conhecimento, fomentando discussões, lançando dúvidas sobre o assunto e fornecendo explicações.

O objetivo deste momento é propiciar um distanciamento crítico do aluno, ao se deparar com interpretações das situações propostas pelo professor.

### **Organização do conhecimento**

É o momento em que os alunos estudarão os conhecimentos selecionados pelo professor como necessários para a compreensão dos temas e da problematização inicial. Neste momento, o aluno irá resolver problemas e atividades propostas em livros didáticos que desempenharão uma função formativa na apropriação de conhecimentos.

## **Aplicação do conhecimento**

É o momento em que é abordado sistematicamente o conhecimento incorporado pelo aluno e em que são analisadas e interpretadas as situações que determinaram seu estudo; é neste momento que os alunos são capacitados para empregar seus conhecimentos, e em que eles poderão articular a conceituação científica com situações reais.

## **Escola, currículos e programação de Ciências**

### **Temas e conteúdos programáticos escolares**

Os autores, ao longo do livro, trabalham a reflexão e prática de uma educação progressista que tem a estruturação curricular baseada em temas, que compõem os eixos estruturantes do currículo escolar, e no caso da disciplina de Ciências, além de privilegiar e desenvolver a conceituação científica, esta estruturação contribuirá com a exploração dos conhecimentos em ciência e tecnologia.

A programação da disciplina de Ciências tem muito com que contribuir, ao explorar temas relativos às teorias e modelos comprometidos com revoluções científicas (Khun, 1975).

Quando se opta por trabalhar com a abordagem temática, faz-se também uma ruptura com a lógica com que os programas têm sido elaborados, estes baseados na abordagem conceitual e os conteúdos escolares baseados em conceitos científicos.

Os autores lançam algumas questões para reflexão:

Por que se prioriza o ensino de determinados conteúdos?

Por que se omitem conteúdos igualmente importantes?



Quais critérios direcionam a inclusão e a exclusão dos conhecimentos científicos produzidos, que são cada vez mais volumosos, relevantes e mesmo surpreendentes?

Quais conteúdos constarão ou não da programação da disciplina de Ciências?

Optar pela abordagem temática implica mudanças na formação inicial da graduação de professores, baseada atualmente em conhecimentos clássicos e que não privilegia a tecnologia e os conhecimentos contemporâneos.

Ao se trabalhar com a abordagem temática é preciso, inicialmente, se fazer uma investigação temática que tem como meta tanto obter os temas geradores quanto planejar sua abordagem problematizadora no processo educativo.

*A sua última etapa [da investigação temática] se inicia quando os investigadores, terminadas as descodificações nos círculos, dão começo ao estudo sistemático e interdisciplinar dos seus achados...*

*Estes temas devem ser classificados num quadro geral de ciências, sem que isto signifique, contudo, que sejam vistos na futura elaboração do programa como fazendo parte de departamentos estanques.*

*Significa, apenas, que há uma visão mais específica, central, de um tema conforme a sua situação num domínio qualquer das especializações (Freire, 1975, p.134-135)*

Articular temas e conceituação científica, além do conhecimento prévio do aluno, é um dos grandes desafios a serem enfrentados na elaboração de programas que comporão o currículo escolar. No caso do ensino de Ciências Naturais, é proposta a eleição de conceitos *supradisciplinares*, que serão balizadores nas aquisições do saber nessa área.

Estes conceitos supradisciplinares que aqui serão chamados de *conceitos unificadores* são complementares aos temas e divididos em quatro categorias de acordo com os autores:

**Transformações:** da matéria viva e/ou não viva, no espaço e no tempo.

**Regularidades:** categorizam e agrupam as transformações mediante regras, semelhanças, ciclos abertos ou fechados, repetições e/ou conservações no espaço e no tempo.

**Energia:** conceito que incorpora os dois anteriores, com a vantagem de atingir maior abstração e muito ligada à linguagem matemática.

**Escalas:** envolver conceitos de escalas macro e microscópicas, ergométricas e em nível espacial.

Estes conceitos tendem a aproximar as várias ciências, criando vínculos e estreitamentos entre os cientistas, professores e currículos.

Usualmente, nas aulas de Ciências, utiliza-se a classificação dos animais e vegetais segundo as ordens e classes, embora sejam úteis, estas classificações tendem a representar o conteúdo de forma estática e estratificada.

Assim, os conceitos unificadores passam a ser pontes de transição entre um saber e outro e permeiam o saber que domina o senso comum e o saber sistematizado.

A tarefa de articular temas e conceitos unificadores, que visa à elaboração de um programa ou de um planejamento, é um trabalho a ser realizado em equipe. Os autores apresentam um mapa conceitual que mostra uma visão geral do processo de produção compartilhada do programa, na perspectiva de uma abordagem temática e conceitual unificadora.

**Temas e/ou  
situação  
significativa**

Fonte: Ensino de Ciências: Fundamentos e Métodos

Um auxílio aos professores na identificação de quais conteúdos os alunos precisam se apropriar, para compreenderem os fenômenos e temas da perspectiva do conhecimento científico, é partir de *questões geradoras* articuladas com os conceitos científicos que juntos compõem o programa de ensino.

**Escolher e organizar meios**

Podemos definir três grandes eixos que balizam a atuação docente: o primeiro é o **conhecimento** que se quer tornar disponível, o segundo são **situações significativas** que envolvem temas e sempre relacionados com a realidade em que o aluno está inserido e o terceiro são os **fatores** que estão **diretamente ligados à aprendizagem** do aluno. Uma das formas de articular esses três eixos é o uso do tema gerador.

### **Meios e materiais: fontes de busca**

Sabe-se da deficiência dos livros didáticos, mas mesmo assim vêm sendo utilizados como única fonte de informações, criando prática rotineira nas escolas.

O professor é o organizador das suas atividades e quanto maior seu acesso a alternativas de materiais, maior oportunidade terá de encontrar conteúdos mais adequados para o trabalho com os alunos. Organizar banco de materiais, textos de recortes de jornais e revistas, livros, vídeos, revistas de divulgação científica são exemplos de alternativas que o professor tem a sua disposição, preservando assim a sua responsabilidade e o aspecto criativo e prazeroso de sua atividade.

### **Questões de linguagem**

A dificuldade que os alunos, principalmente do ensino fundamental, têm em lidar com a linguagem escrita é um fator que cria dificuldade para sua utilização na introdução de novos conhecimentos. A escrita e o seu uso são restritas às disciplinas de linguagem e, nas demais disciplinas, esta não tem um papel de expressão, o que talvez explique a dificuldade que os alunos apresentam em construir um conhecimento baseados na leitura e escrita.

Outra dificuldade apresentada pelos autores são as ilustrações que se encontram nos livros didáticos, que levam à construção errônea de conceitos, relações e dimensões. Por exemplo, na representação do sistema solar é comum acentuar a forma elíptica das órbitas, sendo que estas apresentam a forma circular praticamente.

## Referências Bibliográficas

## Questões

a) A *cultura primeira ou prevalente* é um conhecimento que se dá a partir de sensações orgânicas, experiências sobre objetos, artefatos e fenômenos, relações diretas ou indiretas com outras pessoas ou com meios de comunicação, preceitos religiosos e tradições locais, nas Ciências Naturais este tipo de cultura:

- a) não causa nenhum impacto, pois não está relacionado a Ciências Naturais;
- b) este tipo de cultura causa impacto somente nas questões religiosas do aluno;
- c) causa impactos na visão de mundo, interagindo com interpretações religiosas, comportamento e hábitos da tradição isto possibilitará que o aluno perceba as diferenças estruturais nos procedimentos e conceitos.
- d) causa impacto na visão de mundo, mas o aluno não percebe as diferenças estruturais nos procedimentos e conceitos;
- e) nenhuma questão está correta

b) As esferas que caracterizam a existência humana são:

- a) social, política e mundial
- b) simbólica, social e produtiva
- c) produtiva, manual e adquirida
- d) simbólica, política e social
- e) nenhuma das alternativas está correta.

c) A relação do professor de Ciências no mundo do trabalho é considerada positiva, pois, além da sua formação básica, dispõe de farto material da área nos meios digitais e impressos como internet, vídeos, jornais e revistas, em relação a esta afirmação ser escolarizado no mundo de trabalho é:

- 1- condição dispensável e suficiente ao cargo pretendido em qualquer estágio escolar;
- 2- condição indispensável e muitas vezes insuficiente ao cargo pretendido;
- 3- condição indispensável e não está relacionada ao cargo pretendido;
- 4- está relacionada ao cargo pretendido, mas poderá ser abaixo do que é solicitado.
- 5- nenhuma das questões está correta.

- d) Podemos definir o sujeito coletivo como:
- a. o sujeito que vive em grupo, mas que não interage com os demais integrantes deste grupo;
  - b. o sujeito que vive individualmente que se relaciona somente com o meio em que vive;
  - c. sujeito individual, mas quando passa a interagir, a se relacionar com o meio físico e social;
  - d. sujeito que vive em grupo e se relaciona somente com o meio em que vive;
  - e. nenhuma das alternativas está correta.
- e) A proposta principal dos autores do livro, Ensino de Ciências: fundamentos e métodos, é o ensino de Ciências pautado na abordagem temática, que com a conceituação científica e o conhecimento prévio do aluno comporão o currículo escolar, portanto trabalhar com a abordagem temática acarretará em quais mudanças relacionadas à formação do professor:
- a. nenhuma, pois a formação atual é adequada à proposta do currículo;
  - b. na formação inicial da graduação de professores, baseada atualmente em conhecimentos clássicos e que não privilegia a tecnologia e os conhecimentos contemporâneos.
  - c. somente na formação continuada, pois a formação inicial de professores se aprende apenas o básico;
  - d. na formação inicial que não deverá privilegiar conhecimentos de ciência e tecnologia;
  - e. nenhuma das alternativas está correta.

Alternativas corretas: 1. c

2. b

3. b

4.c

5.b

**8. EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold. A evolução da Física. Rio de Janeiro: Jorge Zahar. 2008.**

**1. A ascensão do conceito mecânico (13-61)**

**1.1. A grande história de mistério (13-14)**

A despeito de tudo já feito no campo da física e da leitura dos livros que melhor representam os avanços até então alcançados nesse ramo do conhecimento que se dispõe a

elucidar as leis que governam os fenômenos físicos verificados na realidade, ainda nos encontramos longe de uma solução completa, se é que tal coisa possa existir. Este livro se propõe a “esboçar em traços largos (...) o trabalho dos físicos que corresponde à reflexão pura do investigador” (14).

### **1.2. A primeira pista (15-20)**

Os autores dizem que uma pista falsa pode levar a conclusões errôneas no encadeamento do pensamento lógico. Assim, afastam a intuição do método científico, pois ela leva a conclusões incorretas e que não correspondem à realidade. O conceito de força, por exemplo, não deve ser deduzido simplesmente da observação, mas da especulação, que teve início com os pensamentos de Galileu e Newton. A mera intuição leva a crer que a velocidade de uma coisa depende das forças exteriores que atuam sobre ela; porém, a abstração permite concluir que a velocidade de uma coisa será eternamente a mesma desde que não haja alguma força que atua sobre ela, para diminuí-la ou aumentá-la. O atrito, a gravidade, portanto, são forças. É o que Newton concisamente chamou de Lei da Inércia.

### **1.3. Vetores (20-25)**

Considerando os movimentos retilíneos, a relação entre as forças é simples, podendo ser apenas em duas direções, para aumentar a velocidade do corpo ou para diminuí-la. Porém, não há apenas movimentos retilíneos na natureza. Uma curva não é tão simples como uma reta. E os movimentos da Terra e dos astros, aos quais tão bem se aplicam as leis da mecânica, são curvilíneos. Quando empurramos uma esfera por sobre uma superfície lisa e reta ela irá se mover na direção da força sobre ela aplicada. Porém, se o impulso for perpendicular à esfera, a velocidade, de acordo com a lei da inércia, não irá se modificar (numa situação ideal), mas irá tão somente alterar sua direção. Com essa observação de que as forças atuam não somente na velocidade mas também na direção introduz-se na Física o conceito de *vetores*. O *vetor* é uma quantidade que possui tanta grandeza como direção, sendo simbolizado por uma seta, cujo comprimento em alguma escala de unidades escolhida é uma medida de velocidade, e cuja direção é a do movimento. Pode-se também utilizar o símbolo da seta tracejada para indicar a velocidade atingida após um impulso indicado, podendo ser por ele aumentada ou diminuída.

### **1.4. O enigma do movimento (25-36)**

Porém, não se deve apenas cuidar de representar os movimentos em linha reta, já que a maioria dos movimentos encontrados na natureza não é assim, mas em curva. Tecnicamente, “uma linha reta é um exemplo especial e comum de uma curva” (26). Quando se representa um movimento curvilíneo por uma linha curva, costuma-se simbolizar com um ponto a posição da partícula que se movimento em algum instante do tempo. Lembremos mais uma vez tratar-se de experiências idealizadas, se em algum momento se pudesse suprimir todas as forças externas que atuam sobre a partícula, nesse instante, conforme a lei da inércia, ela iria presumidamente vagar eternamente numa direção que pode ser representada por um vetor que representa a velocidade nesse dado instante, e cuja *tangente* é o seu prolongamento. Essa partícula em pontos diferentes da linha curva apresenta velocidades diferentes que podem ser simbolizadas por vetores com comprimentos diferentes e em direções diferentes. Quanto às retas, “a tangente a uma reta é a própria reta” (28). Os vetores

podem ser usados, portanto, no caso de uma reta e no caso de uma curva, quando ele indica a velocidade num determinado ponto e a direção (tangente). Quando o movimento é curvo, é porque há forças atuando, pois somente no movimento uniforme e retilíneo não há participação de nenhuma força. Numa parábola ou num movimento circular, há forças que alteram ora a velocidade ora a direção. Pode-se descobrir, ademais, em que direção essa força atua, podendo ser demonstrada por vetores. Desenha-se dois vetores muito próximos um do outro, designando a diferença de velocidade entre eles, a partir da direção desse segundo vetor, sabe-se qual a direção da força. Como exemplo, pode-se entender qual a direção da força de gravidade da Terra que atrai a Lua em seu movimento de translação. Tem-se, portanto, a seguinte afirmação: “força e alteração de velocidade são vetores que têm a mesma direção” (32). Sem recorrer à linguagem da Matemática, pois não é esse o objeto do livro, mas sim o de demonstrar princípios e ideias fundamentais da Física, sem no entanto, comprová-las por meio dos cálculos, os autores aludem ao chamado movimento elíptico da Terra em torno do Sol. O diagrama vetorial (construção de dois vetores próximos um do outro para extrair de sua diferença a direção da força atuante) faz demonstrar que a força se direciona para o Sol. Newton demonstrou, em sua Lei da Gravitação, que a força de atração entre dois corpos depende da distância entre eles.

### **1.5. Resta uma pista (36-39)**

Há uma pista importante em mecânica que restou negligenciada durante quase trezentos anos que está relacionada ao conceito de *massa*. Se uma mesma força for aplicada a corpos diferentes, mesmo sendo as demais condições idênticas entre eles, sua velocidade final não será igual. É que quanto maior a massa do corpo, menor a velocidade final a ser atingida com a mesma força atuante. Há além do modo mais comum de determinar a massa de um corpo, que é o da pesagem numa balança, um outro modo: medindo a velocidade atingida por um corpo em razão da força sobre ele atuante, é possível descobrir qual a massa desse corpo. Quando se pesa um corpo em uma balança, utiliza-se a força da gravidade que o impulsiona sentido ao centro da Terra, sendo a gravidade, nesse caso, essencial para a medida da massa do corpo. Já no outro caso, não se necessita da força de gravidade para medir a massa. Dá-se o nome de *massa gravitacional* para o primeiro caso e de *massa inercial* para o segundo, cujos resultados são exatamente os mesmos, conforme demonstra a experiência. Para a Física clássica, tal identidade entre as duas massas era algo meramente acidental, sem maior importância; já para a Física moderna, essa identidade é fundamental e constitui importante passo na construção da teoria geral da relatividade. Dois corpos de massa diferente levam o mesmo tempo para cair, se sobre eles atuar somente a força da gravidade em iguais condições. Assim, a força atuante sobre eles não pode ser a mesma, já que suas massas são diferentes, donde se conclui que a massa inercial que diminui proporcionalmente à massa gravitacional é igual a esta.

### **1.6. Será o calor uma substância? (39-46)**

Há dois conceitos diversos que durante muito tempo foram confundidos: o de *temperatura* e o de *calor*. A temperatura de dois corpos pode ser a mesma, independentemente da quantidade de calor. Se dois corpos forem deixados num mesmo ambiente, há a tendência a que eles igualem a sua temperatura. Quanto maior a massa de um

corpo, maior a quantidade de calor necessária para que ele atinja determinada temperatura. Do mesmo modo, materiais diferentes dependem de quantidades de calor diferentes para atingir determinadas temperaturas (cada substância possui seu *calor específico*). Há vários experimentos possíveis para se determinar o calor específico de uma substância. Demonstra-se por esses experimentos que o calor não pode ser uma substância, senão uma energia.

### **1.7. A “montanha russa” (46-49)**

Numa montanha russa idealizada (descontada a força perdida pelo atrito) pode-se prever ao longo de todo o tempo qual a velocidade do carrinho. Quando este atinge o ponto mais alto, sua velocidade é zero. Nesse momento, diz-se que ele tem a maior *energia potencial* de todo o percurso, mas nenhuma *energia cinética*, ou energia de movimento. Nos outros momentos, ele possui as duas energias, em diferentes proporções. A soma das duas quantidades de energia recebe o nome de *constante de movimento*, e permanece durante todo o percurso inalterada. No caso real, em que há perda de energia em virtude do atrito, a *constante de movimento* se altera e se torna cada vez menor, não podendo o carrinho atingir o ponto mais alto duas vezes. Há aqui uma correspondência importante entre os aspectos mecânico e calorífico, pois a energia despendida pelo atrito gera calor. Assim, a soma das três energias (cinética, potencial, e calorífica produzida pelo atrito) permanece igual. Essa soma recebe o simples nome de energia.

### **1.8. Razão de transformação (49-52)**

A soma entre as energias cinética e potencial constitui a chamada *energia mecânica*. Se estiver certo que essa energia se converte em calor, deve haver uma *razão de transformação* entre os dois. Segundo experimentos (que não cabem aqui pormenorizar) descobriu-se que a quantidade de calor produzida pelo atrito de corpos é proporcional à quantidade de energia despendida. Após isso, descobriu-se que há muitas outras formas de energia além dessas duas (energia de radiação solar, energia química do carvão, energia elétrica etc.). Concebe-se assim a *energia* como uma substância em contraposição à outra substância já conhecida, qual seja, a de *matéria*, ambas obedecendo à lei da conservação, segundo a qual um sistema isolado não pode se alterar nem em massa nem em energia total.

### **1.9. As bases filosóficas (52-55)**

“A ciência connexionando a teoria e a experiência, começou realmente com o trabalho de Galileu” (53). Muitos físicos, após Galileu, enunciaram ser essencial à compreensão da natureza, que se conhecesse os fenômenos de atração e repulsão imutáveis, cuja intensidade depende inteiramente da distância (e.g. Helmholtz). Já para um cientista do século XX, parece desinteressante logo concluir que haja um quadro infalível a ser descoberto no universo. A questão de que tais forças dependem da distância entre os corpos não parece clara. Esse chamado *conceito mecânico* de fato influenciou durante séculos o pensamento dos cientistas. Mas antes de passar ao declínio desse conceito, merecem serem tiradas algumas conclusões a seu respeito.

### **1.10. Teoria cinética da matéria (55-61)**



Talvez seja possível explicar os fenômenos do calor simplesmente pelos movimentos de partículas que atuam entre si através de forças simples. Talvez, então, esteja o calor conectado ao movimento. A *teoria cinética* tem por objetivo justamente apresentar o conceito de matéria dessa maneira, sendo o calor uma movimentação acelerada das moléculas. Quanto maior essa energia cinética molecular média, maior o calor. “Assim, o calor não é, de acordo com esse quadro, uma forma especial de energia, diferente da energia mecânica, sendo apenas a energia cinética do movimento molecular” (55-56). O mesmo se observa em inúmeros fenômenos químicos, como na liquefação de gases, em que a energia cinética da substância cai em virtude do decréscimo de temperatura.

### **Resumo dos autores para o capítulo (61):**

“Em Mecânica, a trajetória de um corpo em movimento pode ser predita, e seu passado revelado, caso sejam conhecidas sua condição atual e as forças que agem sobre ele. Assim, por exemplo, as trajetórias futuras de todos os planetas podem ser previstas. As forças ativas são as forças gravitacionais de Newton, que dependem somente da distância. Os grandes resultados da Mecânica clássica sugerem que o conceito mecânico pode ser consistentemente aplicado a todos os ramos da Física, que todos os fenômenos podem ser aplicados pela ação das forças que representam a atração ou a repulsão, dependendo somente da distância e atuando entre partículas imutáveis.

“Na teoria cinética da matéria vemos como esse conceito, emanando de problemas mecânicos, abrange os fenômenos do calor e conduz a um quadro “coroadado de êxito” da estrutura da matéria”.

## **2. O declínio do conceito mecânico (62-103)**

### **2.1. Os dois fluidos elétricos (62-70)**

Uma série de experimentos realizados demonstra que um sistema elétrico com polos negativo e positivo obedece em seu conjunto ao que foi anteriormente dito quanto a uma substância, já que a quantidade entre um e outro polo aumenta ou diminui proporcionalmente ao outro polo, sendo que a soma entre os dois permanece sempre a mesma. Porém, há uma diferença com relação à energia e à matéria, pois há duas substâncias elétricas, a negativa e a positiva. Diz-se de um corpo que ele é eletricamente neutro quando os fluidos elétricos positivos e negativos se anulam exatamente. Outra conclusão desses experimentos é a de que os fluidos elétricos do mesmo tipo se repelem e os de tipo diferente se atraem. Há, também, um tipo de corpos no qual os fluidos se deslocam livremente, chamados *condutores*, e um no qual não conseguem fazê-lo, chamados *isolantes*. Não há condutor ou isolante ideal, mas gradações que mais se aproximam de um ou de outro (metais, Terra, o corpo humano, são condutores; vidro, borracha, porcelana, são isolantes; embora não sejam igualmente bons). As velhas teorias da Mecânica clássica não explicam a eletrostática. A lei de Newton sobre a gravitação, por exemplo, só serve para explicar a atração elétrica no caso de dois corpos estarem carregados com fluidos elétricos, podendo se atrair ou se repelir. “A atração gravitacional está sempre presente, enquanto as forças elétricas só existem se os corpos

possuem cargas elétricas” (68). Como as experiências não demonstram alteração de peso entre substâncias elétricas positivas ou negativas, conclui-se que se trata de substâncias sem peso. Por analogia, tem-se que a Temperatura (conceito clássico) está para o que se chama *potencial elétrico*, e o Calor (conceito clássico), está para a *carga elétrica*. Quando dois corpos de diferente massa têm a mesma carga elétrica, é evidente que na menor ele está mais comprimido, possuindo esta maior potencial elétrico, pois a tendência de essa carga elétrica escapar é maior. Mas a semelhança apontada entre calor/temperatura e carga/potencial elétrico não vai muito longe, como se verá. Algo semelhante ocorre com relação ao magnetismo.

## **2.2. Os fluidos magnéticos (70-74)**

Igualmente ao que ocorre em eletrostática, no magnetismo há atração e repulsão. Um ímã é um condutor (*dipolo magnético*) que tem em seus extremos dois fluidos de tipo diferentes. Há atração numa extremidade, repulsão na outra e um equilíbrio de forças no meio. Porém, há uma diferença com relação aos conjuntos elétricos. Se cortarmos este último ao meio, teremos dois polos isolados (negativo e positivo) de cada lado. No caso magnético, as duas metades partidas passam a se comportar da mesma forma que o conjunto anterior, possuindo igualmente dois polos. Daí tendemos a concluir que no magnetismo há pequenas partículas (polos magnéticos elementares) cuja ordem reina no ímã todo, orientando-se e reorientando-se quando o cortamos, dando origem novamente a dois polos. Devemos mencionar um fato conhecido cuja comprovação não é certa: a Terra é um grande dipolo magnético, cujo Polo Norte é aproximadamente o negativo, e o Polo Sul, o positivo (nomes como positivo e negativo são meras convenções para que assim possamos aplicar a todos os casos). Uma agulha magnética apontará sempre para o Polo Norte da Terra, obedecendo ao comando da força magnética da Terra. As explicações obtidas pela Mecânica clássica não são de todo suficientes quando aplicados aos campos da eletrostática e do magnetismo.

## **2.3. A primeira dificuldade séria (74-78)**

A experiência de Volta (bateria voltaica), feita no final do século XVIII, demonstrou relações entre o fenômeno elétrico e magnético. Demonstrou também o aparecimento de uma força ainda não conhecida, que atuava simultaneamente às energias eletrostática e magnética (outros experimentos como o de Oersted e Rowland foram importantes para essas constatações). Notou-se que através de alguns desses aparelhos uma corrente elétrica era estabelecida e atuava durante um tempo até a duração do experimento. Mas o mais notável era que uma espécie de energia magnética aparecia misteriosamente e, na medida em que a velocidade de um corpo em movimento no experimento aumentava, a força atuante sobre outro corpo (uma agulha) também aumentava, demonstrando que tal força não dependia apenas da distância entre os corpos, como as leis da Mecânica clássica previam.

## **2.4. A velocidade da luz (79-81)**

Galileu previu que a luz haveria de ter uma velocidade que, embora muito superior a tudo que até então se poderia medir em termos de velocidade, deveria poder ser medida. Então ele iniciou alguns experimentos que não obtiveram perfeição nessa medida, mas o mais importante foi que ele abriu os campos para a resolução dessa dúvida, o que se desenvolveu

ao longo dos anos até que, nos nossos dias, pode-se conhecer com precisão que a velocidade da luz no vácuo é de 300.000 quilômetros por segundo (segundo uma técnica de precisão ideada por Michelson).

### **2.5. A luz como substância (81-84)**

Não sendo perturbada, a luz caminha na velocidade acima designada. Porém, quando há obstáculos (ar, vidro, água ou outras substâncias), a luz tem seu curso desviado e sua velocidade diminuída. No vácuo, sua propagação é linear. Quando há um obstáculo como o vidro ou o ar ocorre o que se chama *refração*. É preciso admitir aqui que os corpos iluminados emitam partículas de luz (*corpúsculos*), que, ao atingirem nossos olhos, criam a sensação de luz. A Mecânica clássica explica bem o reflexo da luz enquanto matéria (*corpúsculos*) a exemplo de bolas arremessadas contra a parede, porém deixa dúvidas quanto à refração (na água, por exemplo). Pode ser, no entanto, que exista uma força que aja sobre esses corpúsculos ao seu contato com a água, caso em que tal fato se explicaria igualmente pelo conceito mecânico (questão que será melhor descrita a frente).

### **2.6. O enigma da cor (84-87)**

Foi Newton, novamente, quem explicou pela primeira vez o fenômeno da riqueza das cores no mundo. Com um experimento realizado com vidros de formatos não esféricos (prismas) ele fez a luz do Sol se refratar numa parede e vislumbrou uma quantidade de cores muito grande. Assim, demonstrou que a luz do Sol (branca) se dá pela união de muitas outras cores, cada uma sendo uma substância diferente, ou sendo formada por substâncias diferentes. Essa gama de cores é chamada *espectro* (ou *espectro visível*) e sua decomposição é chamada *dispersão*. As experiências de Newton demonstraram que os *corpúsculos* pertencentes a cada cor se comportam como substâncias imutáveis. A ideia de que há muitas substâncias diferentes compondo a luz requer uma nova teoria para explicar os fenômenos a ela concernentes, pois não se pode tratar da luz como se fosse uma substância homogênea. Então, cabe perguntar à teoria Mecânica o que é uma onda.

### **2.7. Que é uma onda? (87-91)**

Uma onda não é matéria, mas energia propagada através da matéria. Dois conceitos físicos importantes acerca das ondas são o da velocidade com que a onda se espalha, que depende do meio de propagação, e o do comprimento de onda, que não depende somente do meio. Trata-se de um conceito mecânico e cinético, pois se reduz ao movimento de partículas que são constituintes da matéria. Mas há diferença entre o movimento das partículas e o movimento da onda em si. Quando eles se igualam, todos os movimentos se dão em linha reta, caso em que dizemos tratar-se de *longitudinal*. Mas há também ondas chamadas *transversais*, que ocorrem quando o meio de propagação da onda é uma espécie de geleia, uma substância aderente, fazendo as partículas vizinhas umas às outras imitarem os movimentos entre si, também produzindo uma onda (é o que ocorre quando se joga uma pedra na água, criando-se ondas transversais, cuja direção é diversa da direção do próprio meio; já as ondas sonoras são exemplo de ondas longitudinais).

### **2.8. A teoria ondulatória da luz (91-98)**

Diferentemente de Newton, para quem a luz seria corpuscular, Huygens apresentou uma teoria da luz como onda, sendo transferência de energia e não de substância. Se para a teoria corpuscular a velocidade da luz é a velocidade com a qual os corpúsculos caminham no espaço vazio, para a teoria ondulatória é a velocidade de onda (conceito acima definido). Quanto a esta última teoria, surgiu a dúvida de como uma onda se propagaria no vácuo, que para ser respondida foi necessário admitir a existência de uma substância hipotética, o *éter*, dentro da qual o universo estaria imerso. Outra hipótese surgida a partir da teoria de Huygens é a de o *éter* não é tal como o ar ou a água, mas tal como a geleia, produzindo ondas transversais, e não longitudinais, dentre as quais estaria a luz. Quanto ao fenômeno da refração observado no momento em que a luz atravessa um prisma, cada teoria o explica segundo os seus princípios, que a tabela a seguir expõe brevemente:

LINGUAGEM CORPUSCULAR	LINGUAGEM ONDULATÓRIA
Os corpúsculos pertencentes a cores diferentes têm a mesma velocidade <i>in vácuo</i> , mas velocidades diferentes no vidro.	Os raios de comprimentos de onda diferentes pertencentes a cores diferentes têm a mesma velocidade no éter, mas velocidades diferentes no vidro.
A luz branca é uma composição de corpúsculos pertencentes a cores diferentes, enquanto, no espectro, eles são separados.	A luz branca é uma composição de ondas de todos os comprimentos, enquanto, no espectro, elas são separadas.

A teoria ondulatória incitou avanços que permitiram concluir, por diversos experimentos, que o comprimento de onda de uma luz vermelha, por exemplo, é de 0,00008 cm, e o de uma luz violeta de 0,0004 cm, sendo esse, portanto, a metade daquele. Por isso se comportam de maneira diversa quando atravessam um prisma, mas na luz solar eles se propagam de maneira retilínea, não ostentando sua natureza ondulatória a menos que sejam submetidos a atravessar obstáculos ou aberturas muito pequenas. A teoria corpuscular da luz foi momentaneamente derrotada pela teoria ondulatória, embora esta última tenha, posteriormente, demonstrado seu caráter problemático.

### 2.9. Ondas luminosas longitudinais ou transversais? (98-100)

Se aceitarmos a vitória da teoria ondulatória, teremos de enfrentar uma dúvida: quais as propriedades mecânicas do éter? Para isso, é fundamental solucionarmos o problema de, se as ondas nele propagadas são de fato transversais ou longitudinais. Evidente que seria mais fácil para a compreensão mecânica do éter se nele se propagasse ondas longitudinais. “Imaginar-se uma geleia como meio formado de partículas de tal modo que as ondas transversais se propaguem por seu intermédio não é fácil tarefa” (99). O próprio Huygens acreditava ser a natureza do éter semelhante ao ar, e não à geleia. Mas foram seus seguidores que demonstraram, através sempre da experiência, que o éter não é como o ar, devendo ser admitido seu caráter “gelatinoso”.

## **2.10. O éter e o conceito mecânico (100-103)**

Mas para conceber o éter como substância gelatinosa sem deixar de lado o conceito mecânico, os físicos tiveram que fazer diversas suposições que restaram antinaturais e artificiais. As conclusões posteriores que dessas experiências puderam-se tirar provocaram um verdadeiro afastamento do conceito mecânico. Outra constatação que derrubou o conceito mecânico é a de que o éter não impede as partículas de nele se propagarem, como ocorre com o vidro ou mesmo o ar, sendo assim ele não poderia ser matéria. Há interação entre o éter e a matéria nos fenômenos óticos, mas não nos fenômenos mecânicos. Por essa razão e pelas outras relatadas nesse capítulo a física moderna levantou dúvidas quanto aos fenômenos óticos, eletrostáticos e magnéticos, questão da igualdade entre massa gravitacional e massa inercial, todas propostas pela Mecânica clássica, e por ela mal resolvida. Mas a física moderna, ao resolver os problemas da Mecânica, introduziu outros problemas irresolutos, muito mais profundos. “Os nossos conhecimentos são agora mais amplos e mais profundos do que os dos físicos do século XIX, mas também o são as nossas dúvidas e as nossas dificuldades” (102).

### **Resumo dos autores para o capítulo (102-103):**

“Testemunhamos, nas velhas teorias dos fluidos elétricos e nas teorias corpuscular e ondulatória da luz, outras tentativas de explicar o conceito mecânico. Mas encontramos graves dificuldades na aplicação ao campo dos fenômenos elétricos e óticos.

“Uma carga em movimento age sobre uma agulha magnética. Mas a força, em vez de depender apenas da distância, depende também da velocidade da carga. A força não repele nem atrai, agindo perpendicularmente à linha que liga a agulha e a carga.

“Em ótica, temos de decidir em favor da teoria ondulatória contra a teoria corpuscular da luz. As ondas se expandindo em um meio que consiste em partículas, com forças atuando entre elas, são, certamente, um conceito mecânico. Mas qual é o meio através do qual a luz se espalha e quais são suas propriedades mecânicas? Não há esperança alguma de reduzir os fenômenos óticos a fenômenos mecânicos antes de ser essa pergunta respondida. Mas as dificuldades de resolver esse problema são tão grandes que temos de desistir dele, desistindo também, assim, do conceito mecânico”.

## **3. Campo, relatividade (104-200)**

### **3.1. O campo como representação (104-114)**

Foi a partir dos trabalhos de Faraday, Maxwell e Hertz que se possibilitou o desenvolvimento da Física moderna, com a criação de novos conceitos. Começando pela Mecânica, por uma mera opção didática, revelou-se a necessidade da criação do conceito de *campo*. Tomando como exemplo o Sol, um corpo atrativo, a força que impulsiona outros corpos na sua direção cria em torno de si um campo, em meio ao qual um corpo que ali estivesse (corpo de provas) seria atraído, com mais ou menos força de acordo com a distância. Quanto mais próximo do Sol, maior a densidade das linhas (vetores) que indicam força. Para Newton, a força de gravitação dependia exclusivamente da distância, não levando em conta o

tempo. Mas sobrelevando essa questão um momento e deslocando a teoria do campo para outro campo que não o da gravitação, seja, a eletrostática, os autores demonstram que ela é igualmente válida. A experiência de Oersted com a agulha já punha à prova a teoria Mecânica, pois mostrava que a velocidade da carga que girava em torno da agulha era determinante da força que sobre ela atuava, exemplificando uma estranha relação entre eletrostática e magnetismo. Mas a teoria do campo explica essa relação, mostrando que o campo criado pela eletricidade aumenta sua força à medida que a velocidade da carga aumenta. “Toda corrente está ligada a um campo magnético, i. e., uma força sempre age sobre um campo magnético colocado próximo de um fio pelo qual passe uma corrente” (109). Os autores fazem alusão a dois exemplos para demonstrar a teoria do campo. O primeiro é um *solenóide*, uma espiral cilíndrica de fio que, ao se deslocar uma corrente elétrica pelo fio, um campo magnético interage com a eletricidade, estabelecendo um pólo positivo e um negativo. O outro exemplo é o de uma barra-ímã, cujo ímã passa a ser a “fonte” do campo, interagindo igualmente com uma corrente elétrica. Assim, os autores concluem: “Todas as ações de um solenoide através do qual flui uma corrente, e as de uma barra-ímã correspondente, são idênticas, porquanto somente o campo é por elas responsável, e o campo é, em ambos os casos, do mesmo caráter” (111). E quanto mais rapidamente se altera o campo elétrico, mais forte é o campo magnético criado.

### **3.2. Os dois pilares da teoria de campo (114-118)**

Toda alteração num campo magnético é acompanhada de um campo elétrico. Esse fato igualmente se comprovou por experiências (Faraday), que demonstram que um simples campo magnetostático (que não se altera com o tempo), como um ímã parado, não provocam alteração de um campo elétrico, mas quando esse ímã é movido, se alterando no tempo, cria um campo elétrico, que logo se apaga, desde que o ímã seja novamente impulsionado e assim sucessivamente. Assim se tem a base da teoria do campo eletromagnético. Ainda uma coisa a ser observada é que uma alteração no campo elétrico ocasiona uma abrupta alteração no campo magnético, que volta a interagir sobre o elétrico, como no caso em que ao retirar um aparelho rapidamente da tomada, interrompendo assim uma corrente elétrica, nota-se uma centelha. Nessa linguagem nova, um campo magnético deve ser considerado como um depósito de energia, que, pelo princípio da conservação da energia.

### **3.3. A realidade do campo (119-124)**

Importante ressaltar agora as equações de Maxwell, que demonstraram ser mais ricas do que o que até aqui foi descrito nesse âmbito, permitindo formar um padrão para um novo tipo de lei. Resumidamente, suas equações são leis que representam a *estrutura* do campo. Um dos principais passos dessas equações é eliminar as variáveis de tamanho e formato dos circuitos, pois são irrelevantes para que se reconheça nos sistemas uma constante, evidentemente uma idealização imaginária, mas que pode se aplicar com exatidão sobre qualquer circuito. Mais do que isso, visam demonstrar que a *realidade* do campo eletromagnético, mesmo que não haja fios elétricos a comprovarem a existência de circuitos elétricos (caso da experiência de Faraday), ou um polo magnético a comprovar sua existência (experiência de Oersted). Sua importância está em que “o campo eletromagnético, uma vez criado, existe, age e se altera de acordo com as leis de Maxwell” (121), sendo todo o espaço

cenário dessas leis, o que não ocorria com as leis mecânicas, só aplicáveis a pontos em que estivessem presentes matéria ou cargas. Surge assim o conceito de *onda eletromagnética*, que se propaga sempre de maneira transversal, se espalhando no espaço vazio em velocidade igual à velocidade da luz. Hertz comprovou a existência das ondas eletromagnéticas e demonstrou experimentalmente ser a sua velocidade igual à da luz. Hoje em dia, há diversos aparelhos muito mais sofisticados que o de Hertz que detectam a presença dessas ondas a milhares de quilômetros.

### **3.4. Campo e éter (124-127)**

Nota-se, portanto, uma proximidade inafastável entre a luz e as ondas eletromagnéticas, sugerindo uma conexão entre as propriedades óticas e elétricas que leva a crer seja a luz uma onda eletromagnética, sendo a única diferença entre as duas o comprimento de onda, que é muito pequeno para a primeira, e muito grande para a segunda. Percebe-se que o velho conceito mecânico não explica os fenômenos agora descobertos, e que uma nova teoria surge, com um novo conceito que agora se reconhece seja basilar: o campo. O que não quer dizer que haja ou deva haver uma destruição das velhas teorias mecânicas, e sim que o desenvolvimento da Física deve muito às descobertas realizadas por Galileu e Newton, mas agora já os vê com longinquamente, uma vez que alcançou outro patamar científico. Quanto ao conceito de éter, ainda resta dúvida, e a teoria da relatividade visa continuar sua melhor elucidação.

### **3.5. O andaime mecânico (127-135)**

Toda a teoria mecânica está baseada na lei da inércia. Se por algum motivo, a lei da inércia for alterada, também o serão todas as outras conclusões, ou seja, toda a Mecânica ruirá. A Terra, por exemplo, que está a girar, é o lugar onde temos de realizar todas as nossas experiências, estando nós, por isso, limitados a aceitar como verdadeiros todos os experimentos que se comprovem: *“a Terra é o nosso sistema coordenado”* (128). Para a realização de qualquer experiência é preciso ter uma *estrutura de referência*. Nas experiências da Física clássica, a referência é um andaime mecânico (podendo ser ruas, avenidas, torres etc.). Como estamos na Terra e toda experiência é realizada nela, não temos dificuldade em realizar uma estrutura de referência ligada a ela. Essa estrutura é o que se chama em Física moderna de *sistema coordenado*, que por diante será chamado simplesmente SC. Quando enunciamos uma lei, não devemos esquecer que ela vale com relação apenas a um SC escolhido. Assim, isso pode ser expressado pelo chamado *“princípio de relatividade de Galileu: se as leis da Mecânica são válidas em um SC, então elas são válidas em qualquer outro SC que se mova uniformemente em relação ao primeiro”* (131). Dados dois SC conhecidos, se realizarmos uma experiência em apenas um deles, é possível conhecer o que aconteceria no outro (tratando-se, por exemplo, de uma partícula). Resumindo essas conclusões os autores assim dizem (135):

“1) Não conhecemos regra alguma para determinar um sistema inercial. Dado um, contudo, podemos determinar um número infinito deles, porquanto todos os SC que se movem uniformemente uns em relação aos outros são sistemas inerciais, se um deles o for.

“2) O tempo correspondente a um acontecimento é o mesmo em todos os SC. Mas as coordenadas e as velocidades são diferentes, alterando-se de acordo com as leis de transformação.

“3) Embora as coordenadas e a velocidade se alterem ao passar de um SC para outro, a força e a alteração da velocidade e, portanto, as leis da Mecânica são invariáveis relativamente às leis de transformação”.

### **3.6. Éter e movimento (135-145)**

Os autores se questionam sobre se o princípio da relatividade de Galileu pode ser aplicado a fenômenos não mecânicos, aqueles nos quais melhor se aplicam os conceitos de campo. Esses problemas são os que conduzem ao ponto de partida da teoria da relatividade. Tudo se resume ao fato de se poder ou não aplicar essas conclusões no caso de uma onda que se propaga na velocidade da luz (fenômenos óticos e elétricos). O ar é deslocado junto com o seu SC correspondente, mas será que o mesmo acontece com o éter? É evidente que não, pois o éter em tudo penetra, não havendo portas fechadas a ele, como no caso do ar ou de outras substâncias. Não pode ser o éter contido em nenhum sistema, pois é ele quem circunda tudo, é nele que tudo está imerso. Todas as evidências em experimentos realizados para averiguar tal fato demonstram que o éter não pode ser carregado por nenhum SC: *“A velocidade da luz é sempre a mesma em todos os SC, independentemente de a fonte de luz estar ou não em movimento ou de como se mova”* (139). E eles concluem: *“A velocidade da luz não depende do movimento da fonte emissora. Não se admitir que o corpo em movimento carregue consigo o éter que o envolve”* (140). Assim, concluir por admitir que haja um mar de éter com todos os SC em repouso nele ou movendo-se em relação a ele. É, portanto, necessário abandonar o princípio de relatividade de Galileu. Mas a suposição de que existe um SC distinguido e de que os corpos em movimento não arrastam consigo o éter, antes caminhando em um mar etéreo sempre calmo, é igualmente problemático, visto que experimentos (principalmente os de Michelson-Morley) demonstraram que a natureza se move com uma velocidade relativamente elevada, e que a velocidade da luz é a mesma em todo e qualquer SC. Todas as tentativas de descobrir as propriedades do éter até aquele momento malograram. Então, os físicos desistiram de usar a palavra éter, admitindo apenas que haveria no espaço uma propriedade física capaz de transmitir ondas eletromagnéticas.

### **3.7. Tempo, distância, relatividade (146-158)**

Qualquer experimento físico poderá ser usado como relógio, se ele for feito repetidas vezes (como no caso de uma ampulheta que é virada repetidas vezes quando todo seu conteúdo tiver passado para a parte de baixo). Em cada caso, a unidade de tempo será o tempo necessário para que o experimento se conclua a cada vez. Em dois pontos distantes, dois relógios perfeitos indicam exatamente o mesmo tempo. Porém, isso não quer dizer que numa experiência apenas um relógio seja suficiente, embora para a Mecânica clássica fosse. Mas se quisermos fazer experimentos na velocidade da luz (medida importante na teoria da relatividade), veremos que mais de um relógio é necessário. Quando são observados dois fenômenos em SC diferentes, um em movimento e o outro não, se forem colocados relógios em cada SC veremos que o ritmo dos relógios varia de acordo com o movimento do SC e do observador. Igualmente, o tamanho e a distância entre corpos se alteram quando estão em



movimento. “Podemos muito bem imaginar que não apenas o relógio em movimento muda de ritmo, mas também que uma régua em movimento muda de comprimento, enquanto as leis das alterações forem idênticas para todos os SC inerciais” (152). E logo à frente os autores prosseguem dizendo: “A observação mostra, indiretamente, por meio dos fenômenos do campo eletromagnético, que um relógio em movimento muda de ritmo e uma régua muda de comprimento, enquanto, com base nos fenômenos mecânicos, não pensamos que isso acontecesse. Devemos aceitar o conceito de tempo relativo em todo SC, por ser a melhor maneira de sairmos de nossas dificuldades” (153). Assim, de acordo com a teoria da relatividade, a velocidade da luz forma o limite superior das velocidades para todos os corpos materiais, sendo que não pode haver uma velocidade maior que a da luz.

### **3.8. Relatividade e mecânica (158-163)**

Embora a teoria da relatividade tenha surgido do campo, ela deve poder ser aplicada a todo domínio físico, abrangendo todas as suas leis, donde surge uma grande dificuldade, pois as leis do campo e as leis mecânicas são muito diferentes. Mas se reconhece que as leis da Mecânica clássica, embora não possam ser aplicadas à velocidade da luz, servem muito bem quando aplicadas a pequenas velocidades, sendo, para estas, perfeitamente válidas. Como em quase todas as nossas observações lidamos com velocidades pequenas, muito longe de alcançarem a velocidade da luz, as leis da Mecânica clássica continuam plenamente úteis. A constante encontrada pela Física moderna da velocidade da luz condiz com os avanços em outros campos do conhecimento, como na Química moderna, que encontrou apenas poucos elementos (elétrons, prótons e nêutrons) de que são constituídas todas as matérias conhecidas. Essas micro partículas às vezes são ejetadas com uma velocidade muito grande, que se aproxima da velocidade da luz, como ocorre com elementos radioativos. Como já foi visto, a Física clássica distinguia duas substâncias: matéria e energia. Para a Física moderna, também já o vimos, não há diferença de natureza entre matéria e energia, ou entre massa e energia: “Energia tem massa e massa representa energia. Em vez de duas leis de conservação, temos apenas uma, a de massa-energia” (162). Porém, o aumento de massa de um corpo quando é aquecido é incomensuravelmente pequeno, e não pode ser medido nem por balanças de precisão. A prova de que energia tem massa só pode ser obtida por meio de experiências indiretas, o que ocorre porque a massa tem um certo predomínio sobre a energia, sendo a razão de intercâmbio entre a matéria e a energia muito pequena.

### **3.9. O contínuo de espaço-tempo (163-171)**

Em Física, é importantíssimo caracterizar quando e onde ocorre exatamente cada fenômeno analisado. Existem contínuos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. O nosso espaço é um contínuo tridimensional. Mas não deve bastar à Física, pois é necessário também a ela que se designe o tempo em que cada evento ocorre, ocorreu ou ocorrerá. É possível, para facilitar a visualização, a criação de um plano no qual o eixo vertical seja o eixo do espaço, e o horizontal, o eixo do tempo (plano de espaço-tempo). Se soubermos com precisão a posição ocupada por um corpo em cada momento, teremos uma linha contínua traçada sobre esse plano, evidenciando um conhecimento completo do movimento. Assim, dos dois contínuos unidimensionais (espaço e tempo) temos um contínuo bidimensional representado pelo plano. Mas se em dois SC diferentes, e movendo-se uniformemente um em

relação ao outro, se encontrarem também dois observadores, eles determinarão coordenadas espaciais diferentes, mas a mesma coordenada do tempo, para um certo acontecimento. De acordo com a teoria da relatividade, diferentemente do que ocorria para a Física clássica, o tempo que leva para uma partícula se movimentar, representado pelo plano de espaço-tempo, não é o mesmo para todos os observadores, o que só se perceberá se em um dos SC o observador se movimentar numa velocidade próxima à da luz (lembramos que a Física clássica ainda nos auxilia bastante, entretanto, quando se trata de pequenas distâncias). Mas os dois pontos demonstrados pelo plano de espaço-tempo não são suficientes para caracterizar um acontecimento físico: são necessários quatro números, e não apenas dois. O espaço é tridimensional e o instante do evento é o quarto número, formando um *continuo quadridimensional*. Isso era verdadeiro para os físicos clássicos, mas eles se preocupavam em demonstrar variações apenas entre espaços tridimensionais, dado que para eles o tempo era absoluto. Do ponto de vista da teoria da relatividade, porém, tanto o espaço quanto o tempo se alteram ao passar de um SC para outro (conforme experimentos de Lorentz, por exemplo).

### **3.10. Relatividade generalizada (171-175)**

A Física clássica reconhecia a possibilidade de existência de um sistema inercial, dizendo ser ele um SC no qual não haveria quaisquer forças atuando. Mas dado que a própria Terra não constituiria, segundo essa teoria, um sistema inercial, pois está em rotação, verificasse que essa teoria está como que assentada sobre areia, uma vez que não se pode saber a qual estrutura ela se refere. Sob esse prisma, até mesmo a constatação de Copérnico de que é a Terra que gira em torno do Sol não passa de uma mudança de SC da Terra para o Sol, não resolvendo de fato o problema, apenas o deslocando. Mas se todo o movimento é relativo, não importa ter a Terra ou o Sol como SC. “As duas sentenças ‘o Sol está em repouso e a Terra se move’ ou ‘o Sol se move e a Terra está em repouso’ significariam simplesmente duas convenções concernentes a dois SC diferentes “ (...) O movimento absoluto só é tornado possível pela ideia de um sistema inercial, para o qual as leis da natureza são válidas” (174)”. Tem de ser possível, portanto, uma Física na qual o movimento seja sempre relativo. O SC inercial, cujas leis da Mecânica se aplicam plenamente, é apenas um exemplo dentre outros de SC, para os quais a teoria da relatividade deve poder ser aplicada igualmente, sob o nome de *teoria da relatividade generalizada* (a outra teoria antes enunciada, que só se aplicava aos sistemas inerciais, é chamada *teoria da relatividade especial*).

### **3.11. Dentro e fora do elevador (176-182)**

Se imaginarmos um elevador caindo de um arranha-céu muito mais alto dos que conhecemos hoje, e com um observador interno e um externo, criar-se-iam dois SC, cujas descrições dos acontecimentos difeririam entre si, embora pudessem ser consideradas ambas consistentes. A equivalência entre massa inercial e gravitacional existente e verificada mais uma vez na experiência do elevador é uma pista ao argumento de que, embora o campo gravitacional exista para o observador externo e não, em condições ideais de experiência, para o observador interno, há uma ‘ponte’, o campo gravitacional, que torna possível a descrição em ambos os SC. A teoria da relatividade generalizada deve responder à questão da gravitação de maneira diferente da Física newtoniana, devendo as leis da gravitação ser formuladas,

como todas as leis da natureza, para todos os SC possíveis, enquanto as leis da Mecânica clássica são válidas apenas para os SC inerciais.

### **3.12. Geometria e experiência (182-192)**

Imaginemos um mundo onde só existam criaturas bidimensionais, que seriam capazes de escrever, num plano geométrico, diversas formas como círculos ou triângulos. Desconhecendo a terceira dimensão, imaginemos que ela repentinamente lhes aparecesse. Se isso acontecesse, não estando acostumadas a ela, essas criaturas não se aperceberiam de nenhuma mudança, dado que continuariam a desenhar seus formatos em duas dimensões, sem qualquer modificação. Mas se um dia avançarem seus estudos, descobrirão novos princípios geométricos que se apliquem a um mundo não mais apenas bidimensional, fazendo ruir a sua velha Geometria. Assim, descobrirão princípios que se aplicarão a todos os corpos, inclusive aos bidimensionais, que, inobstante, não se coadunará com os antigos. Quanto ao nosso mundo tridimensional, pode-se dizer que toda nossa Geometria seja euclidiana, vez que seus princípios aplicam-se perfeitamente. Porém, nos deparamos com a impossibilidade de uma Física relativista se coadunar com a Geometria euclidiana. Se tivermos, por exemplo, um disco gigante com dois círculos concêntricos desenhados sobre ele, um muito pequeno e um muito grande, e se o disco girar rapidamente, pode-se imaginar a presença de dois observadores, um dentro do disco e outro fora, com a criação de dois SC. Para o que está fora, as leis euclidianas se aplicam plenamente, mas não se pode dizer o mesmo para o que está dentro do disco. Quando o observador interno procura medir o raio e a circunferência do círculo pequeno, para verificar se o princípio euclidiano se verifica, conclui que em se tratando de um círculo muito pequeno, as leis da Mecânica clássica a ele perfeitamente se aplicam, não ostentando nenhuma diferença quanto ao constatado pelo observador externo. Porém, ao tentar medir o disco maior o observador interno, a sua régua de medição se move junto com ele, o que não produz mudanças na medida do raio, mas na medida da circunferência sim. Segundo a teoria da relatividade restrita, a comprimento da circunferência grande será diferente quando medido por cada observador, demonstrando que o observador interno não pode confirmar a validade da Geometria euclidiana (segundo a qual a razão das duas circunferências seria igual à razão dos dois raios). Mas embora o instrumental matemático da Física moderna seja mais complicado, suas suposições físicas são mais simples e naturais.

### **3.13. Relatividade generalizada e sua verificação (192-196)**

O problema fundamental da teoria da relatividade generalizada é o da gravitação. Os autores enunciam as principais particularidades que levaram a uma nova teoria da gravitação (193-194):

“1) As equações gravitacionais da teoria da relatividade generalizada podem ser aplicadas a quaisquer SC. É meramente questão de conveniência escolher-se qualquer SC em um caso especial. Teoricamente, todos os SC são permissíveis. Ignorando a gravitação, voltamos automaticamente ao SC inercial da teoria da relatividade restrita.

“2) A lei da gravitação de Newton liga o movimento de um corpo aqui e agora com o movimento de um corpo ao mesmo tempo a uma grande distância. Essa é a lei que formou um modelo para todo o nosso conceito mecânico. Mas o conceito mecânico ruiu. Nas equações de

Maxwell, realizamos um modelo para as leis da natureza. As equações de Maxwell são leis estruturais. Ligam acontecimentos que ocorrem agora e aqui com acontecimentos que ocorrerão um pouco mais tarde nas vizinhanças imediatas. São as leis que descrevem as alterações do campo eletromagnético. As nossas novas equações gravitacionais são também leis estruturais descrevendo as alterações do campo gravitacional. Esquemáticamente falando, poderíamos dizer: a transição da lei da gravitação de Newton para a relatividade geral se assemelha algo com a transição da teoria dos fluidos elétricos com a lei de Coulomb para a teoria de Maxwell.

“3) O nosso mundo não é euclidiano. A natureza geométrica do nosso mundo é moldada por massas e suas velocidades. As equações gravitacionais da teoria da relatividade generalizada tentam revelar as propriedades geométricas de nosso mundo.”

A velha teoria da gravitação de Newton, assim como o SC inercial, é um exemplo limitativo, que pode ser aplicado para forças gravitacionais relativamente fracas. Ao limite, tanto o tempo absoluto quanto o sistema inercial, aos olhos da nova teoria, desapareceram. Comprova-se que, no caso de Mercúrio, por exemplo, o planeta mais próximo do Sol, não apenas sua trajetória elíptica em torno do Sol é mantida, tal como a dos outros planetas, mas ela também realiza uma rotação lenta em relação ao SC unido ao Sol (que em três milhões de anos completa uma rotação). Tal efeito é menor em se tratando de cada um dos outros planetas mais afastados do Sol.

### **3.14. Campo e matéria (197-199)**

Não resta dúvida, por tudo isso, que não se pode mais basear toda a Física sobre o conceito de matéria, já que o conceito de campo se mostrou igualmente indispensável. Mas surge a dúvida de se podemos pensar *matéria* e *campo* como duas realidades distintas e diferentes. Não cabe uma distinção do tipo matéria designa massa enquanto campo designa energia, pois vimos que não há diferença de natureza entre massa e energia. Pode-se dizer que “Matéria é onde a concentração de energia é grande, e campo onde a concentração de energia é pequena” (198), havendo nesse caso uma diferença quantitativa. Como não se pode constituir uma Física somente sobre o conceito de matéria, e como a diferença entre campo e matéria se mostra por demais artificial, dever-se-ia abrir espaço a uma Física pura do campo, que explicasse todos os fenômenos naturais por leis estruturais sempre válidas. Mas não se conseguiu até o momento resolver a questão para que as leis do campo possam ser aplicadas a regiões nas quais a energia esteja enormemente concentrada. Cabe às novas experiências demonstrar a possibilidade ou não de uma Física pura do campo. Então, os campos da Física se abriram no sentido de pensar como, uma vez que são apenas poucos tipos de matéria que constituem toda matéria, serão as várias formas de matéria construídas com essas partículas elementares. Surge aí novas ideias para uma *teoria do “quantum”*.

### **Resumo dos autores para o capítulo (199-200):**

“Um novo conceito aparece em Física, a mais importante invenção desde o tempo de Newton: o campo. Foi necessária grande imaginação científica para se perceber que não são as cargas nem as partículas, mas o campo no espaço entre as cargas e as partículas, o que é essencial para a descrição dos fenômenos físicos. O conceito de campo se revela vitorioso e

conduz à formulação das equações de Maxwell descrevendo a estrutura do campo eletromagnético e governando tanto os fenômenos elétricos como os óticos.

“A teoria da relatividade surge dos problemas do campo. As contradições e inconsistências da velha teoria nos forçam a atribuir novas propriedades ao contínuo de espaço-tempo, ao cenário de todos os acontecimentos de nosso mundo físico.

“A teoria da relatividade se desenvolve em dois passos. O primeiro passo conduz ao que é conhecido como teoria da relatividade restrita, aplicada apenas a sistemas coordenados inerciais, isto é, a sistemas nos quais a lei da inércia, segundo formulada por Newton, é válida. A teoria da relatividade restrita é baseada em duas suposições fundamentais: as leis físicas são as mesmas em todos os sistemas coordenados que se movam uniformemente um em relação ao outro; a velocidade da luz tem sempre o mesmo valor. Dessas suposições, plenamente confirmadas pela experiência, são deduzidas as propriedades das hastes e relógios em movimento, suas alterações de comprimento e de ritmo dependendo da velocidade. As velhas leis são inválidas se a velocidade da partícula em movimento se aproxima da velocidade da luz. As novas leis para um corpo em movimento, segundo formuladas pela teoria da relatividade, são esplendidamente confirmadas pela experiência. Outra consequência da teoria da relatividade (restrita) é a conexão entre massa e energia. Massa é energia e energia é massa. As duas leis da conservação da massa e da energia são combinadas pela teoria da relatividade em apenas uma, a lei da conservação da massa-energia.

“A teoria da relatividade generalizada proporciona uma análise ainda mais profunda do contínuo de espaço-tempo. A validade da teoria não mais está restrita a sistemas coordenados inerciais. A teoria ataca o problema da gravitação e formula novas leis estruturais para o campo gravitacional. Força-nos a analisar o papel desempenhado pela Geometria na descrição do mundo físico. Considera o fato de que as massas gravitacional e inercial são iguais, essencial e não meramente accidental, como na Mecânica clássica. As consequências experimentais da teoria da relatividade generalizada diferem apenas ligeiramente das consequências da Mecânica clássica. Resistem bem à prova da experiência sempre que a comparação é possível. Mas a força da teoria está em sua consistência interna e na simplicidade de suas suposições fundamentais.

“A teoria da relatividade acentua a importância do conceito de campo em Física. Mas ainda não conseguimos formular uma Física de campo pura. No momento, devemos ainda admitir a existência de ambos: campo e matéria”.

#### **4. Quanta (201-237)**

##### **4.1. Continuidade – descontinuidade (201-203)**

As quantidades podem ser alteradas de duas formas: contínua e descontinuamente. Quando elas se alteram descontinuamente, isso ocorre por passos indivisíveis, que são chamados *quanta* elementares da quantidade a que se referem. Conforme aumenta a precisão de nossas medições, há uma tendência a que se evidencie um caráter elementar e descontínuo

de uma quantidade. Chega-se à seguinte ideia: “*deve ser admitido que algumas quantidades físicas até agora consideradas contínuas são compostas de ‘quanta’ elementares*” (202).

#### 4.2. “Quanta” elementares de matéria e eletricidade (203-207)

Por exemplo, a massa de uma molécula ou de um átomo é uma quantidade descontínua, pois é uma unidade que pode ser somada átomo a átomo ou molécula a molécula. Outro exemplo, no caso de uma corrente elétrica fluindo por um fio, o termo “fluir” sugere que seja uma quantidade contínua, mas os experimentos modernos sugerem que haja igualmente *quanta* elementares elétricos. Novamente foi a experiência quem demonstrou que o “fluido” que passa por um fio elétrico é negativo, restando saber se sua estrutura seria ou não granular, o que também foi comprovado no sentido de que há sim *quanta* elementares elétricos (como formulado por J. J. Thomson), chamados *elétrons*. A massa de um elétron mostrou-se duas mil vezes inferior à massa de um átomo de hidrogênio (que é de 0,000 000 000 000 000 0033 gramas). Hoje em dia já se sabe que não é o átomo de um elemento o seu *quantum* elementar, pois as descobertas no domínio da eletricidade demonstraram haver uma partícula menor que o átomo, sendo os elétrons componentes da matéria. Rutherford foi quem iniciou a chamada Física Nuclear ao enunciar que, sendo o elétron um componente ínfimo da massa de um átomo, o componente majoritário de sua massa seria o seu núcleo.

#### 4.3. Os “quanta” da luz (208-213)

Uma luz homogênea, quando incide sobre uma superfície de metal, extrai elétrons do metal, fenômeno ao qual chamamos *efeito fotoelétrico*. A energia da luz é parcialmente transformada em energia cinética dos elétrons expelidos. Porém, esse fenômeno tem consequências que põem à prova a teoria ondulatória da luz, evidenciando seu ponto fraco, muito embora ela tenha servido tão bem para explicar outros fenômenos óticos, tais como a refração. É como se a teoria corpuscular de Newton ganhasse nova vida, agora que sabemos da característica quântica dos elementos, devemos aplicar esse princípio à luz. A luz pode ser composta por grãos de energia, substituindo os velhos corpúsculos de luz pelos “*quanta* de luz, a que chamamos *fótons*, pequenas porções de energia caminhando pelo espaço vazio com a velocidade da luz” (209-210): uma *teoria quântica da luz* (ideada pela primeira vez por Planck). Os *quanta* de eletricidade não diferem nunca, enquanto os de luz diferem para cada comprimento de onda. Quando se suprime o conceito de onda de luz, deve ser aplicado, então, em seu lugar, o conceito de “energia dos *quanta* de luz” (211). O seguinte quadro elucidava melhor essa questão (211):

TERMINOLOGIA DA TEORIA ONDULATÓRIA	TERMINOLOGIA DA TEORIA QUÂNTICA
A luz homogênea tem um comprimento de onda definido. O comprimento de onda da extremidade vermelha do espectro é igual ao	A luz homogênea contém fótons de energia definida. A energia do fóton para a extremidade vermelha do espectro é igual à

dobro do da extremidade violeta.	metade da energia da extremidade violeta.
----------------------------------	---

Em suma, há fenômenos que só podem ser explicados pela teoria quântica da luz (efeito fotoelétrico e outros), há fenômenos que só podem ser explicados pela teoria ondulatória da luz (curvatura em torno dos obstáculos) e há efeitos que se explicam por ambas as teorias (propagação retilínea da luz). É necessário, embora problemático, que conciliemos as duas teorias.

#### **4.4. Espectro luminoso (213-218)**

Após experimentos com incidência de luz para verificar o comportamento dos fótons, concluiu-se “que são permitidos muitos níveis de energia em um átomo e que a emissão de um fóton corresponde à transição do átomo de um nível mais elevado para um nível mais baixo (...) e que todo átomo tem alguns níveis definidos de energia e que a emissão de *quanta* de luz está ligada à transição de um átomo de um nível de energia para outro” (215). Há comprimento de ondas de luz que são muitíssimo menores do que os da luz visível, como no caso do raio X. Tão pequeno, que seria praticamente impossível realizar um experimento para verificar sua difração. Mas a natureza incorre, nesse caso, em nosso favor, uma vez que a estrutura do cristal se dispõe de uma forma em que os seus átomos estão agrupados segundo um ínfimo espaço entre eles em perfeita e absoluta regularidade. Assim, através dele, é possível verificar a difração dos raios X.

#### **4.5. As ondas da matéria (219-224)**

Foi Bohr quem demonstrou primeiramente os avanços da chamada *mecânica ondulatória*, depois avançada por Broglie e Schrödinger. Criam o conceito de *onda estacionária*, que surge do entrecruzamento de outras duas ondas que, ao se assentar uma sobre a outra em direções opostas, criam essa terceira onda. Somente as extremidades das ondas, chamadas *nodos*, ficam estáticas, pois estão presas. As *ondas estacionárias* podem ter *nodos* no meio delas também (princípio utilizado pelo musicista de instrumentos de corda). O comprimento de onda depende, em cada caso, do número de nodos. O que Broglie descobriu, foi que os elétrons, sob algumas circunstâncias, também se comportam como ondas. Assim, surge mais uma complicação, pois após termos nos confortado com o caráter ondulatório da luz, nos deparamos com fenômenos nos quais ela se comporta como chuva de fótons, ou seja, que ela possui às vezes um caráter corpuscular. Agora, demonstrou-se que os elétrons, quanto aos quais havíamos-nos conformado com o fato de serem corpusculares, às vezes, movendo-se uniformemente, se comportavam como ondas. Um sistema de partículas se comporta como um pequeno instrumento acústico no qual são produzidas ondas estacionárias, e os elétrons seriam essas ondas. Resta saber se é possível medir o comprimento de onda de um fluxo homogêneo de elétrons. A experiência demonstrou ser possível, aplicando-se o mesmo método usado para a difração dos raios X, ou seja, um cristal. O resultado é que o elétron aqui se comporta como uma onda. A mesma dificuldade, portanto, encontrada no caso dos *quanta* de luz é encontrada no caso dos *quanta* de matéria.

#### **4.6. Ondas de probabilidade (225-235)**

Embora se possa admitir a natureza corpuscular, em alguns fenômenos, tanto para a luz quanto para a matéria, não é verdade que as velhas leis mecânicas se aplicam a esse novo domínio. De acordo com numerosas observações, percebeu-se que o comportamento dos fótons e dos elétrons é de todo imprevisível, podendo apenas ser descrita sua probabilidade. Tomando apenas o conjunto conglomerado de elétrons e fótons, é mais possível determinar com grande precisão seu comportamento, mas não o das partículas individualmente. Se não dermos tanta importância aos indivíduos, é possível calcular o comportamento da média representativa do agregado inteiro. “As leis da Física Quântica são de caráter estatístico” (228). Isso vale tanto para os fenômenos da luz quanto da matéria, tanto para os fótons quanto para os elétrons e elementos radioativos. Quanto às semelhanças e diferenças entre as novas teorias e as conclusões acima descritas, os autores dizem: “As leis da Física Quântica são também leis estruturais. Mas o significado dos conceitos físicos determinados por essas equações da Física Quântica é muito mais abstrato do que no caso dos campos eletromagnético e gravitacional; fornecem apenas os meios matemáticos de responder a questões de natureza estatística” (231). Muitas dificuldades surgem, como, por exemplo, a de conciliar conceito de campo com o conceito de onda de probabilidade ou com o conceito de *quanta* elementar de matéria. Embora represente um avanço e um afastamento ainda maior da Mecânica clássica, a Física Quântica ainda se baseia em dois conceitos, de matéria e de campo; é ainda uma teoria dualista, e não resolve o problema da conciliação entre esses dois conceitos apenas no conceito de campo.

#### **4.7. Física e realidade (235-237)**

“A ciência é uma criação da mente humana, com seus conceitos e ideias livremente inventados. As teorias físicas tentam formar um quadro da realidade e estabelecer sua conexão com o amplo mundo das impressões sensoriais” (235). Ao longo de sua evolução, a Física demonstrou saltos e rupturas com velhas ideias e, por vezes, preconceitos. Embora as ideias mais modernas tenham em muito se distanciado dos velhos princípios, “o propósito de toda teoria física permanece ainda o mesmo (...): encontrar o nosso caminho através do emaranhado de fatos observados, para ordenar e compreender o mundo de nossas impressões sensoriais” (236-237).

#### **Resumo dos autores para o capítulo (237):**

“Novamente a rica variedade de fatos no reino dos fenômenos atômicos nos força a inventar novos conceitos físicos. A matéria tem uma estrutura granular; é composta de partículas elementares, os **quanta** elementares de matéria. Assim, a carga elétrica tem uma estrutura granular e – mais importante ainda, do ponto de vista da teoria quântica – do mesmo modo, a energia. Os fótons são os **quanta** de energia de que a luz é composta.

“Será a luz uma onda ou uma chuva de fótons? Um feixe de elétrons, uma chuva de partículas elementares ou uma onda? Essas questões fundamentais são impostas à Física pela experiência. Ao tentar respondê-las, temos de abandonar a descrição dos acontecimentos atômicos como ocorrências no tempo e no espaço, temos de recuar ainda mais do velho conceito mecânico. A Física Quântica formula leis governando aglomerados e não indivíduos. Não são descritas propriedades, mas probabilidades, não são formuladas leis revelando o



futuro de sistemas, mas leis governando as alterações de probabilidades no tempo relativas a grandes aglomerados de indivíduos”

9. FEYNMAN, Richard. Física em 12 lições. 2. ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 2009.

## APRESENTAÇÃO

O livro Física em 12 lições é um curso de física, originário de uma série de palestras que Feynman realizou e depois foram transcritas nessa obra. É indicado tanto para estudiosos da física como para leigos pelo seu caráter descontraído e objetivo de tratar temas considerados difíceis, de uma forma bastante tranquila. Procurou-se fazer nesse texto, um apanhado geral das diversas asserções do autor, trazendo um resumo da obra completa.

## FÍSICA EM 6 LIÇÕES

### f) ÁTOMOS EM MOVIMENTO

## INTRODUÇÃO

Duas centenas do campo de conhecimento, e é possível condensar em grande parte a enorme massa de resultados – isto é, encontrar leis que sintetizem todo o nosso conhecimento.

O princípio da ciência, quase sua definição, é: *O teste de todo conhecimento é a experiência*. A experiência é o único juiz da “verdade” científica, a própria experiência ajuda a produzir essas leis. É preciso imaginação, para criar a partir dessas pistas, esse processo de imaginação é tão difícil que há uma divisão de trabalho na física: existem físicos teóricos que imaginam, deduzem e descobrem as novas leis, mas não fazem experimentos; e físicos experimentais que deduzem e descobrem as novas leis.

## A MATÉRIA É COMPOSTA DE ÁTOMOS

Todas as coisas compõem-se de átomos que são pequenas partículas que se deslocam em movimento permanente, atraindo-se mutuamente quando estão a certa distância, mas se repelindo quando comprimidas umas contra as outras.

Há dois tipos de “bolhas” ou círculos para representar os átomos de oxigênio (pretos) e hidrogênios (brancos), cada oxigênio possui dois hidrogênios ligados a ele. As partículas estão continuamente ziguezagueando e saltando ao redor umas das outras. As partículas estão “agarradas umas às outras”- e se atraem mutuamente, o grupo todo está “colado”, as partículas não se comprimem entre si, e ao se tentar comprimir duas delas, elas se repelirão.

Os átomos têm  $1$  a  $2 \times 10^{-8}$  cm de raio.  $10^{-8}$  denomina-se um angström.

As coisas não se desfazem simplesmente devido à atração molecular. O movimento ziguezagueante é o que representamos como *calor*; quando aumentamos a temperatura, aumentamos o movimento. Se aquecermos a água, por exemplo, o ziguezague aumentará e o volume entre os átomos aumentará. E, se o aquecimento prosseguir, chegará um momento em que a atração entre as moléculas não será

suficiente para mantê-las coesas e essas se afastarão e ficarão separadas umas das outras. Assim produzimos o vapor através da água, aumentando a temperatura deste líquido.

## AS PROPRIEDADES DO VAPOR OU DE QUALQUER OUTRO GÁS

As moléculas, estando separadas entre si, baterão nas paredes do tanque onde está, isto significa que o gás exerce uma força nervosa que nossos sentidos grosseiros sentem apenas como um empurrão médio. Para confinar um gás, temos de aplicar uma pressão. *A pressão vezes a área é a força.* A força é proporcional à área, mas se mantivermos o número de moléculas por centímetro cúbico, aumentaremos o número de colisões, na mesma proporção que aumenta a área.

Colocamos o dobro de moléculas no tanque para dobrar a densidade, e deixamos que tenham a mesma temperatura. Então, com uma boa aproximação, o número de colisões será dobrado e, como cada uma será “energica” quanto antes, a pressão será proporcional à densidade. A verdadeira natureza das forças entre os átomos é um ligeiro aumento, devido ao volume finito que ocupam. Com uma excelente aproximação, se a densidade for suficientemente baixa para que não haja muitos átomos, *a pressão será proporcional à densidade.*

Se aumentarmos a temperatura sem aumentar a densidade do gás, ou seja, se aumentarmos a velocidade dos átomos o que acontecerá com a pressão? Os átomos colidirão com mais frequência, de modo que a pressão aumentará. Quando comprimimos um gás lentamente, a temperatura do gás aumenta. Sob a compressão, lenta diminuirá de temperatura.

Retornemos à nossa gota d’água. Suponhamos que diminuimos a temperatura de nossa gota. Suponhamos que o ziguezague das moléculas dos átomos da água esteja, pouco a pouco, diminuindo. Sabemos que há forças de atração entre átomos, de modo que, depois de algum tempo, eles não conseguirão ziguezaguear tão bem.

As moléculas fixam-se em um novo padrão, que é o gelo. O ponto interessante é que o material tem um lugar definido para cada átomo, e é fácil ver que, se de algum modo mantivéssemos todos os átomos em certo arranjo em uma extremidade da gota, cada átomo em cada lugar, então, devido à estrutura das interconexões, que é rígida, a outra extremidade a quilômetros de distância terá uma localização definida. Se segurarmos uma agulha de gelo em uma extremidade, a outra extremidade resistirá à tentativa de separação, ao contrário da água, cuja estrutura se desfaz devido ao ziguezaguear crescente que faz com que os átomos se desloquem de formas diferentes. A diferença entre sólidos e os líquidos é que, em um sólido, os átomos estão dispostos em certo tipo de arranjo, denominado *arranjo cristalino*, e não têm uma posição aleatória a longas distâncias.

Uma das características corretas é que existe uma parte da simetria hexagonal. Se girarmos a figura 120° ao redor do eixo, ela voltará a si mesma. Outra coisa que o gelo diminuir ao se derreter. Ele possui muitos “buracos”. Quando a organização se desfaz, esses buracos podem ser ocupados por moléculas. A maioria das substâncias simples, com exceção da água e de alguns tipos de metal, *expande-se ao se derreter*, porque os átomos estão comprimidos no cristal sólido e, com o derretimento, precisam de mais espaço para ziguezaguearem, mas uma estrutura aberta desmorona, como no caso da água.

Embora o gelo possua uma forma cristalina “rígida”, sua temperatura pode mudar – o gelo possui calor. O que é calor no caso do gelo? À medida que aumentamos

a temperatura, os átomos vibram com amplitude crescente, até saírem do lugar. Isso se chama *derretimento*. À medida que diminuimos a temperatura, a vibração vai diminuindo até que, a zero absoluto, os átomos atingem a vibração mínima possível, mas não zero. Essa vibração mínima que os átomos podem ter não é suficiente para derreter uma substância, com uma exceção: o hélio.

O hélio simplesmente diminui os movimentos atômicos o máximo possível. Mesmo a zero absoluto, o hélio não congela, a não ser que a pressão seja aumentada a ponto de os átomos se comprimirem mutuamente. Se aumentarmos a pressão, poderemos fazer com que se solidifique.

## PROCESSOS ATÔMICOS

O ar consiste quase que inteiramente em nitrogênio, oxigênio, algum vapor d'água e quantidades menores de dióxido de carbono, argônio e outras coisas. De tempos em tempos, uma molécula na superfície é atingida com um pouco mais de força do que, usualmente, e é arremessada para longe. De tempos em tempos, uma dessas moléculas de vapor cairá na água e aderirá de novo a ela.

Aparentemente, nada está mudando, mas se pudéssemos ampliar milhões de vezes, notaríamos que o ar está sempre mudando: moléculas estão deixando a superfície, moléculas estão retornando.

A partição de uma molécula deve-se a um acúmulo acidental extra de energia um pouco acima do normal de que ela necessita para se desgarrar da atração de suas vizinhas. Desse modo, como as que se partem têm mais energia do que a média, as que ficam, têm *menos* movimento médio do que antes.

O líquido gradualmente *esfria* quando evapora. Quando uma molécula de vapor vem do ar para a água que está abaixo, há uma súbita grande atração ao se aproximar da superfície. Isso acelera a molécula que chega e resulta na geração de calor. Assim, quando partem, levam embora calor; ao retornarem, geram calor.

Não apenas a água vai para o ar; de tempos em tempos, uma das moléculas de oxigênio ou nitrogênio chega e “se perde” na massa de moléculas de água, penetrando na água. Assim, o ar se dissolve na água; moléculas de oxigênio e nitrogênio penetram na água e esta conterà ar.

Num outro processo nota-se um ponto anatômico um sólido dissolvendo-se na água. Se mergulharmos um cristal de sal na água, sabendo-se que o sal é um sólido, um cristal, um arranjo organizado de “átomos de sal”. O cristal não se compõe de átomos, mas do que denominados *íons*. Um íon é um átomo que possui alguns elétrons extras ou que perdeu alguns elétrons. Os íons unem-se por atração elétrica no sal sólido; porém, quando mergulhamos na água, constatamos que a atração do oxigênio negativo e do hidrogênio positivo pelos íons faz com que alguns destes se soltem.

É fato que as extremidades de hidrogênio das moléculas de água tendem a estar perto do íon de cloro, ao passo que perto do íon de sódio tendemos a encontrar a extremidade de oxigênio, porque a extremidade de oxigênio da água é negativa, a eles se atraem eletricamente. Mencionamos que o conceito de *molécula* de uma substância é apenas aproximado e existe somente para certa classe de substâncias. No caso do cloreto de sódio no sólido, não está tão evidente. Há apenas um arranjo de íons de sódio e cloro em um padrão cúbico. Não há forma natural de agrupá-los como “moléculas de sal”.

## REAÇÕES QUÍMICAS

Um processo em que ocorre um rearranjo dos parceiros atômicos denomina-se uma *reação química*. Os outros processos já escritos denominam-se *processos físicos*, mas não há uma distinção rígida entre ambos. No caso do oxigênio, *dois* átomos de oxigênio unem-se com muita força. Os átomos são muito especiais: gostam de certos parceiros específicos, certas direções específicas, e assim por diante. Cabe à física analisar porque cada um quer o que quer. De qualquer modo, dois átomos de oxigênio formam, saturados e felizes, uma molécula.

### g) **FÍSICA BÁSICA**

Este capítulo compõe-se das ideias mais fundamentais sobre a física – a natureza das coisas como vemos na atualidade.

### **A FÍSICA ANTES DE 1920**

Antes de 1920 a visão do mundo era o universo num espaço tridimensional da geometria, como descrito por Euclides. As coisas mudam com o tempo. Os elementos são as partículas, a exemplo dos átomos, com certas propriedades.

Primeiro, a propriedade da inércia: se uma partícula estiver se movendo, continuará se movendo na mesma direção a menos que as forças atuem sobre ela. O segundo elemento são as forças de interação enormemente detalhadas, que mantinham os diferentes átomos em diferentes combinações de uma forma complicada. A outra força conhecida era a interação de longo alcance – uma atração suave e tranquila – que variava na razão inversa do quadrado da distância e se chamava *gravitação*. Essa lei era conhecida e era muito simples. *Porque as coisas permanecem em movimento quando se movem ou por que existe uma lei da gravitação era, um princípio, uma lei desconhecidos.*

#### **Uma descrição da natureza**

A pressão resulta das colisões dos átomos com as paredes ou qualquer outra coisa; o deslocamento dos átomos, caso se movam todos, em média, na mesma direção, é vento; os movimentos internos aleatórios são o calor.

Existem ondas de densidade em excesso onde partículas demais se acumulam e, ao se dispersarem, empurram pilhas de partículas, e assim por diante. Essa onda de densidade em excesso é o *som*.

Naquela época, considerava-se que existissem 92 tipos de partículas, pois tinham sido descobertos 92 tipos diferentes de átomos, os quais tinham diferentes nomes associados às suas propriedades químicas.

Na gravidade, tudo atrai todo o resto. Imagine que há duas espécies de “coisas” diferentes e que essa nova força (que é a força elétrica) tem a propriedade que as semelhantes *repelem, mas* as desiguais *atraem*.

A “coisa” que conduz essa interação forte denomina-se *carga*. Suponhamos que temos dois desiguais que se atraem: um positivo e outro negativo, e que se mantêm muito proximamente unidos. Suponhamos que temos outra carga a certa distância.

A atração seria praticamente nenhuma porque, se as duas primeiras forem do mesmo tamanho, a atração de uma e a repulsão de outra se anularão. Por outro lado, se chegarmos muito perto com a carga extra, surgirá *atração*, porque a repulsão das semelhantes e a atração das desiguais tenderão a aproximar as desiguais e a distanciar as semelhantes. A repulsão será *menor* do que a atração. Esta é a razão pela qual os átomos

são constituídos de cargas elétricas positivas e negativas, sentem pouquíssima força quando separados por uma distância considerável.

Todas as coisas, inclusive nós, são constituídas de partes positivas e negativas, todas perfeitamente equilibradas. Uma vez ou outra, podemos expulsar alguns negativos ou alguns positivos, circunstanciais em que achamos a força da eletricidade *desequilibrada*, e podemos ver os efeitos dessas atrações elétricas.

Descobriu-se mais sobre a força elétrica. Dois objetos simplesmente se atraem um ao outro: positivo contra negativo. No entanto, descobriu-se que esta era uma representação inadequada. Uma representação mais adequada da situação é dizer que a existência de carga positiva, em certo sentido distorce, ou cria uma “condição” no espaço, de modo que, quando introduzimos nele a carga negativa, ela sente uma força. Ao colocarmos um elétron em um campo elétrico, dizemos que é puxado. Temos então duas regras:

- 6- Cargas produzem um campo;
- 7- Cargas em campos têm forças contidas sobre elas e se movem.

Influências magnéticas estão associadas a cargas em movimento relativo, de modo que forças magnéticas e forças elétricas podem realmente ser atribuídas ao mesmo campo, como dois aspectos diferentes exatamente da mesma forma.

Embora as forças entre dois objetos carregados devessem ser inversamente proporcionais ao *quadrado* da distância, descobre-se, ao agitar uma carga, que a influência se estende para muito mais longe do que imagináramos à primeira vista. Ou seja, o efeito diminui lentamente do que o inverso do quadrado.

O campo eletromagnético pode transportar ondas; algumas dessas ondas são *luz*, *outras usadas em transmissões de rádio*, *mas o nome geral é ondas eletromagnéticas*. A única diferença real de uma onda para outra é a *frequência da oscilação*.

## FÍSICA QUÂNTICA

Tendo exposto a ideia de campo eletromagnético, logo descobrimos que essas ondas na verdade se comportam de uma forma estranha que parece muito pouco ondulatória. Em frequências maiores, comportam-se muito mais como partículas. É a *mecânica quântica*, descoberta logo após 1920.

A mecânica quântica, em primeiro lugar, demonstra a ideia de que uma partícula tem localização e velocidade definidas; está errada. Existe uma regra na mecânica quântica que diz que não pode se saber, simultaneamente, onde algo está e com que velocidade se move.

A incerteza no momento e a incerteza na posição são complementares, e o produto das duas é constante. Esta regra é a explicação de misterioso paradoxo: se os átomos se compõem de cargas positivas e negativas, porque as cargas negativas simplesmente não ficam sobre as cargas positivas e se aproximam até cancelá-las por completo? *Por que os átomos são tão grandes?* Por que o núcleo está no centro com os elétrons ao redor? De início, pensava-se que era devido ao tamanho do núcleo, só que o núcleo é muito pequeno. O núcleo tem um diâmetro cerca de  $10^{-13}$  cm, quase todo peso do núcleo está no núcleo infinitesimal.

Outro dado é que a mecânica quântica *unifica* a ideia do campo e suas ondas e as partículas numa ideia só. Apenas *obtemos* as frequências maiores da energia das partículas por uma regra que supõe que a ideia de partícula -onde da mecânica quântica- é válida.

Surge uma nova visão da interação eletromagnética. Temos um novo tipo de partícula a acrescentar ao elétron, ao próton e ao nêutron. Essa nova partícula chama-se *fóton*. A nova visão da interação de elétrons e prótons que a teoria eletromagnética apresenta, mas com tudo correto da perspectiva da mecânica quântica, chama-se *eletrodinâmica quântica*. Essa teoria fundamental da interação de luz e matéria, ou campo elétrico e cargas, é nosso maior sucesso até agora na física. Nessa única teoria, temos as regras básicas para todos os fenômenos comuns, exceto gravitação e os processos nucleares. Por exemplo, da eletrodinâmica quântica advêm todas as leis elétricas, mecânicas e químicas conhecidas.

Em princípio, a eletrodinâmica quântica é a teoria de toda a química, e da vida, se a vida for fundamentalmente reduzida à química e, portanto, simplesmente à física, porque a química já está reduzida. A mesma eletrodinâmica quântica prevê muitas coisas novas. Em primeiro lugar, informa as propriedades de fótons de energia elevadíssima, raios gama etc., previu outra coisa notável: além do elétron, deveria haver outra partícula da mesma massa, mas de carga oposta, denominada *pósitron*, e as duas, ao se encontrarem, deveriam se aniquilar mutuamente com a emissão de luz ou raios gama.

Na eletrodinâmica quântica, supõe-se que dois números são dados e a maior parte dos outros números do mundo decorrem destes. Esses dois números são a massa de elétron e a carga do elétron. Isto não é totalmente verdadeiro, pois temos um conjunto de números na química que informa o peso dos núcleos.

## NÚCLEOS E PARTÍCULAS

Assim como a interação elétrica pode ser associada a uma partícula, um fóton. Yukawa sugeriu que as forças entre nêutrons e prótons também tem alguma espécie de campo e que, quando esse campo se agita, se comporta como uma partícula. E ele foi capaz de deduzir as propriedades dessas partículas a partir das características já conhecidas das formas nucleares. Por exemplo, previu que deveriam ter uma massa duzentas ou trezentas vezes superior à do elétron. Porém, mais tarde descobriu-se que era a partícula errada. Foi denominada méson  $\mu$  ou múon.

Pouco depois, em 1947 ou 1948, outra partícula foi encontrada, o méson  $\pi$  ou pión, que satisfaz o critério de Yukawa. Portanto, além do próton e do nêutron, para obter forças nucleares precisamos acrescentar o pión. Acontece que os cálculos envolvidos nesta teoria são tão difíceis que ninguém jamais conseguiu descobrir as consequências da teoria ou verificá-la experimentalmente, e isto vem se estendendo por quase vinte anos.

Voltando às partículas - todas as partículas, que estão em junção com os nêutrons e os prótons, denominam-se *bárions*, e existem as seguintes: “*lambda*” com massa de  $1.154 Me^v$  e três outras denominadas *sigmas*, *negativa*, *neutra* e *positiva*, com várias massas iguais. Há grupos ou múltiplos - é o par próton-nêutron, depois um singleto (*lambda*), depois o tripleto *sigma* e, finalmente, o dubleto  $\pi$ .

Além dos bárions, as outras partículas envolvidas na interação nuclear chamam-se *mésons*. Primeiro, há os pions, que se apresentam em três variedades: positivo, negativo e neutro; eles formam outro múltiplo. Descobrimos também coisas novas chamadas *mésons K*, que ocorrem como um dubleto,  $K^+ K^0$ . Cada partícula tem sua antipartícula, a não ser que uma partícula seja sua própria antipartícula.

Desse modo, temos várias coisas soltas - partículas que não interagem fortemente nos núcleos, sem nenhuma relação com uma interação nuclear e sem uma interação forte

Os léptons são os seguintes: o elétron, com uma massa muito pequena nessa escala, apenas  $0,510 \text{ Me}^v$ . Depois há o méson  $\mu$ , ou múon, com uma massa muito maior, 206 vezes mais pesado do que um elétron.

Considerando, ainda, duas outras partículas que não interagem fortemente com as nucleares: uma é a fóton, e talvez, se o campo da gravidade também tiver uma correspondência na mecânica quântica, existirá uma partícula, um gráviton, que terá massa zero.

O fato de que uma partícula possui massa zero significa, de certa forma, que não pode estar em repouso. Em fóton nunca está em repouso, está sempre se movendo a 300 mil quilômetros por segundo.

Aparece um grande número de partículas que, em conjunto, parecem ser os constituintes fundamentais da matéria. Essas partículas não são totalmente diferentes em suas interações mútuas. Parece haver apenas quatro tipos de interações entre partículas, que, em ordem decrescente de força, são a **força nuclear**, as **interações elétricas**, a **interação da desintegração beta** e a **gravidade**. O fóton está acoplado a todas as partículas carregadas, e a força da interação é medida por certo número que é  $1/137$ . A lei detalhada desse acoplamento é conhecida: trata-se de eletrodinâmica quântica. A gravidade está acoplada a toda energia, mas seu acoplamento é fraquíssimo, muito mais fraco que o da eletricidade. Depois existem os denominados decaimentos fracos – desintegração beta, que faz o nêutron se desintegrar em próton, elétron e neutrino relativamente devagar. A chamada interação forte, a interação méson-bárion, tem uma força de 1 nessa escala, e a lei é completamente desconhecida, embora se conheçam algumas regras, como a de que o número de bárions não se altera em qualquer reação.

## 8- A RELAÇÃO DA FÍSICA COM OUTRAS CIÊNCIAS

A física é o correspondente atual ao que se costumava se chamar *filosofia natural*, da qual emergiu a maioria de nossas ciências modernas.

### QUÍMICA

Historicamente, a química, em seus inícios, lidava quase por completo com a agora denominada química inorgânica, a química das substâncias não associada a seres vivos. Essa química inicial foi importantíssima para a física. A interação entre as duas ciências foi muito grande porque a teoria dos átomos foi concretizada em grande parte por experiências na química. A teoria química foi sintetizada, em grande parte, na tabela periódica de Mendeleiev, e foi o conjunto de regras sobre que substâncias se combinam com outras e como constitui a química inorgânica. Essas regras acabaram explicadas em princípios pela mecânica quântica, de modo que a química teórica é, na verdade, física.

Revela-se muito difícil prever, precisamente, o que ocorrerá em uma dada reação química; não obstante, a parte mais profunda da química teórica tem de acabar na mecânica quântica.

Existe também um ramo da física e da química desenvolvido, conjuntamente, por ambas as ciências e de extrema importância, denominado mecânica estatística. A mecânica estatística é a ciência dos fenômenos do calor, ou termodinâmica. A química inorgânica como uma ciência, reduz-se às denominadas físico-química e química quântica; físico-química para estudar as velocidades em que ocorrem as reações e o que acontece em detalhe, e química quântica, para nos ajudar a entender o que acontece em termos das leis físicas.

O outro ramo da química é a *química orgânica*, a química das substâncias associadas aos seres vivos. A química orgânica tem relação com a biologia, que fornece as substâncias, e com a indústria. Porém, os problemas principais da química orgânica estão na análise e na síntese das substâncias formadas em sistemas biológicos, em seres vivos. Isto nos leva a bioquímica e, depois a própria biologia ou biologia molecular.

## **BIOLOGIA**

A ciência da biologia é o estudo dos seres vivos. Uma interessante relação inicial entre a física e a biologia, em que a biologia ajudou a física na descoberta da *conservação da energia*, demonstrada inicialmente por Meyer em conexão com quantidade de calor recebida e emitida por um ser vivo.

Se examinarmos mais detidamente os processos biológicos dos animais, veremos muitos fenômenos físicos: a circulação do sangue, bombas, pressão etc.

A física é de grande importância na biologia, e em outras ciências, por ainda outra razão, que é a associação às *técnicas experimentais*. Não fosse o grande desenvolvimento da física experimental, essas tabelas bioquímicas não seriam conhecidas atualmente.

## **ASTRONOMIA**

A astronomia é mais antiga que a física. Na verdade, deu origem à física, ao revelar a simplicidade do movimento das estrelas e dos planetas, cuja compreensão foi o início da física. A mais notável descoberta na astronomia é que as estrelas se constituem de átomos da mesma espécie dos da Terra. Dois dos elementos químicos foram descobertos em uma estrela antes de detectados na Terra. O hélio foi descoberto no Sol, e o tecnécio foi descoberto em certas estrelas frias.

Embora não possamos reproduzir as condições na Terra, as leis físicas básicas, muitas vezes, permitem prever precisamente, ou quase, o que acontecerá. É assim que a física ajuda a astronomia. Por estranho que pareça, entendemos a distribuição da matéria no interior do Sol bem melhor do que entenderemos o interior da Terra.

Uma das descobertas mais impressionantes foi a origem da energia das estrelas, o que as faz continuar a queimar.

É a “queima“ nuclear de hidrogênio que fornece a energia do Sol; o hidrogênio converte-se em hélio. Em uma última análise, a produção de vários elementos químicos ocorre nos centros das estrelas, a partir do hidrogênio.

## **GEOLOGIA**

Geologia é a chamada ciência da terra. Consideremos, de início, a meteorologia e o tempo. Os instrumentos da meteorologia são instrumentos físicos, e o desenvolvimento da física experimental tornou possíveis esses instrumentos.

A questão básica da geologia é: o que faz a terra ser do jeito que é? São os processos de erosão dos rios, dos ventos etc., que é fácil entender, mas para cada quantidade de erosão ocorre uma quantidade igual de outra coisa. Quem estuda geologia, descobre que existem processos formadores de montanhas e vulcanismo que ninguém compreende, mas que consiste metade da geologia.

## **PSICOLOGIA**



A psicanálise não é uma ciência; na melhor das hipóteses, é um processo médico, e talvez se aproxime mais do curandeirismo. Um dos problemas técnicos mais interessantes pode ou não ser chamado de psicologia. O problema central da mente, se você quiser, ou do sistema nervoso, é este: quando um animal aprende algo, passa a fazer algo diferente de antes e sua célula cerebral deve ter mudado também, caso se constitua de átomos. Não sabemos o que significa o aprendizado de um fato ou que mudança provoca no sistema nervoso. Trata-se de um problema muito importante ainda sem solução. Todos os seres humanos são diferentes. Se pudéssemos, ao menos descobrir, como funciona um cão, teríamos ido bem longe. Os cães são mais fáceis de entender.

## COMO EVOLUÍRAM AS COISAS?

Para compreender a teoria física é preciso saber onde se localizam os átomos. Para saber a química, precisamos encontrar exatamente que átomos estão presentes, senão não conseguimos analisá-la.

Não existe questão histórica sendo estudada na física neste momento. Não temos uma questão para saber de como foi que evoluíram as leis da física. Não imaginamos no momento que as leis da física estejam, de algum modo, mudando com o tempo, e que no passado foram diferentes do que agora.

Evidencia-se que a questão histórica da física será pesquisada com o restante da história do universo e os físicos estarão falando dos mesmos problemas de astrônomos, geólogos e biólogos.

### 9- CONSERVAÇÃO DA ENERGIA

O que é energia?

Existe uma lei que governa todos os fenômenos naturais conhecidos até agora. A lei da *conservação da energia*. Segundo ela, há certa quantidade, denominada energia, que não muda nas múltiplas modificações pelas quais passa a natureza. Para fazer a verificação da energia, é preciso ter cuidado para não colocar ou retirar a energia. A energia tem um grande número de *formas diferentes*, e há uma fórmula para cada uma. Elas são: **energia gravitacional, energia cinética, energia térmica, energia elástica, energia elétrica, energia química, energia radiante, energia nuclear, energia de massa.**

É importante perceber que, na física atual, ignoramos o que é energia. Porém, há fórmulas para calcular certa grandeza numérica e, ao somarmos tudo, o resultado é “28” – sempre o mesmo número. É algo abstrato por não nos informar o mecanismo ou as razões para as diferentes fórmulas.

### 10-A TEORIA DA GRAVITAÇÃO

#### Movimentos planetários

A lei da gravitação diz que cada objeto no universo atrai todos os outros objetos com uma força que, para dois corpos quaisquer, é proporcional à massa de cada um e varia inversamente com o quadrado da distância entre eles. Essa afirmação pode ser matematicamente expressa pela equação:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

$r^2$

A história começa com os antigos observando os movimentos dos planetas entre as estrelas e, finalmente, deduzindo que giravam em torno do Sol, fato redescoberto mais tarde por Copérnico.

## LEIS DE KEPLER

Primeira lei Kepler - cada planeta gira ao redor do Sol em uma curva chamada *elipse*, com o Sol em um dos focos da elipse.

Segunda lei Kepler - os planetas não giram ao redor do Sol com velocidade uniforme, porém movem-se mais rápido quanto mais próximos do Sol e mais devagar quanto mais longe dele.

E por fim, depois de muito tempo, descobriu uma terceira lei, a qual diz que: *quando se comparam o período orbital e o tamanho da órbita de dois planetas quaisquer, os períodos são proporcionais a potência 3/2 do tamanho da órbita.*

## DESENVOLVIMENTO DA DINÂMICA

Galileu descobriu o princípio da *inércia*: Se algo estiver se movendo, sem nada o tocando e totalmente imperturbado, prosseguirá para sempre, com velocidade uniforme e em linha reta.

Newton modificou essa ideia, dizendo que o único modo de mudar o movimento de um corpo é aplicar *força*. Se o corpo se acelera, uma força foi aplicada *na direção do movimento*. Newton, assim, acrescentou a ideia de que é necessária uma força para mudar a velocidade ou a direção do movimento de um corpo.

A ideia brilhante resultante dessas considerações é que não é necessária nenhuma força *tangencial* para manter um planeta em órbita. Devido ao princípio da inércia, a força necessária para controlar o movimento de um planeta ao redor do Sol não é uma força *ao redor* do Sol, mas em direção a ele.

## LEI DA GRAVITAÇÃO DE NEWTON

Newton provou a si que o fato real de que áreas iguais são percorridas em tempos iguais é um sinal exato da proposição de que todos os desvios são exatamente radiais – que a lei das áreas é uma consequência direta da ideia de que todas as forças se dirigem exatamente em direção ao Sol.

Analisando-se a terceira lei de Kepler, é possível mostrar que, quando mais afastado o planeta, mais fracas são as forças. Com a combinação das duas leis, Newton concluiu que deve existir uma força, inversamente proporcional ao quadrado da distância, na direção de uma linha entre os dois objetivos.

Newton deduziu que essa relação tinha aplicação mais geral do que apenas ao Sol segurando os planetas; ele teve certeza de que cada planeta prendia suas luas com uma força. Já conhecia a força que nos prende sobre a Terra, de modo que propôs que era uma força *universal* – *que tudo atrai todo o resto*. O próximo problema foi se a atração da Terra sobre seus habitantes era a “mesma” que a sobre a Lua, ou seja, universalmente proporcional ao quadrado da distância.

Newton usou a segunda e a terceira leis de Kepler para deduzir sua lei da gravitação. A lei da gravitação explica muitos fenômenos antes não compreendidos.

## GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

A Terra é redonda devido à gravitação. A Terra pode ser compreendida como redonda simplesmente porque tudo atrai todo o resto, fazendo com que tudo se junte o máximo possível. Baseando-se apenas na lei da gravitação podemos deduzir que o Sol, a Lua e a Terra deveriam ser esferas. As leis de Newton estão absolutamente certas no sistema solar. A lei da gravitação é válida mesmo as distâncias maiores. A gravitação, portanto, estende-se por enormes distâncias.

## A EXPERIÊNCIA DE CAVENDISH

A gravitação estende-se por enormes distâncias. Mas se há uma força qualquer par de objetos, deveria ser possível medir a força entre nossos próprios objetos. Em vez de ter de observar os astros rodarem uns ao redor dos outros, por que não podemos tomar uma bola de chumbo e uma bolinha de gude e observar esta última ir ao encontro da primeira? A dificuldade dessa experiência quando realizada de forma tão simples é a própria fraqueza e delicadeza da força. Tem de ser realizada com extremo cuidado, o que significa cobrir o dispositivo a fim de manter o ar fora, certificar-se de que não está eletricamente carregado e assim por diante; então a força pode ser medida. Ela foi medida pela primeira vez por Cavendish. Medindo-se o grau de torção da fibra, pode-se medir a intensidade da força, examinar se é inversamente proporcional ao quadrado da distância e determiná-la. Assim pode-se determinar precisamente o coeficiente  $G$  na fórmula

$$F = \frac{Gmm'}{r^2}$$

Todas as massas e distâncias são conhecidas. Conhecendo  $G$  com base nessa experiência e conhecendo a força de atração da Terra, podemos descobrir indiretamente o valor da massa da Terra. Essa experiência tem sido denominada “pesagem da Terra”. Cavendish alegou que estava pesando a Terra, mas o que estava medindo era o coeficiente  $G$  da lei da gravidade. Essa é a única forma de determinar a massa da Terra.  $G$  se revela como

$$6,670 \times 10^{-11} \text{ newton.m}^2/\text{kg}^2$$

É difícil exagerar a importância do efeito sobre a história da ciência produzido por esse grande sucesso da teoria da gravitação. Essa é a razão do sucesso das ciências nos anos posteriores, pois deu esperança de que os outros fenômenos do mundo também fossem regidos por leis de tão bela simplicidade.

## O QUE É GRAVIDADE?

Atualmente, não há nenhuma explicação da gravitação em termos de outras forças. Ela não é um aspecto da eletricidade ou de algo semelhante, de modo que não temos nenhuma explicação. Porém, a gravitação e outras forças são muito semelhantes, e é interessante observar analogias.

O fato de que a força da gravitação é proporcional à *massa*, a quantidade que é fundamentalmente uma medida da inércia – de quão difícil é deter algo que está girando em círculo. Portanto, dois objetos, um pesado e outro leve, girando em torno de um objeto maior no mesmo círculo e à mesma velocidade devido à gravidade, permanecerão juntos porque girar em círculo requer uma força que é mais forte para uma massa maior. É interessantíssimo que essa força seja exatamente proporcional à

massa com grande exatidão, porque, do contrário, haveria certo efeito pelo qual inércia e peso difeririam. A ausência de tal efeito foi testada com grande precisão por uma experiência realizada por primeiro por Eötvös, em 1909, e mais recentemente por Dicke. Para todas as substâncias testadas, as massas e os pesos são exatamente proporcionais dentro de uma tolerância de uma parte em um bilhão, ou menos. Trata-se de uma experiência notável.

## **GRAVIDADE E RELATIVIDADE**

Contudo, a lei da gravitação de Newton não está correta. Ela foi modificada por Einstein no intuito de levar em conta a teoria da relatividade. Segundo Newton, o efeito gravitacional é instantâneo, ou seja, se deslocássemos determinada massa, sentiríamos imediatamente uma nova força devido à nova posição daquela massa; desse modo, poderíamos enviar sinais com velocidade infinita. Einstein apresentou argumentos de que *não podemos enviar sinais acima da velocidade da luz*, de modo que a lei da gravitação deve estar errada.

Ao corrigi-la, obtemos uma nova lei denominada lei da gravitação de Einstein. Uma característica bem fácil de compreender dessa nova lei é: *na teoria da relatividade Einstein, tudo que tem energia tem massa – massa no sentido de ser gravitacionalmente atraído. Mesmo a luz, dotada de energia, possui massa. Quando um feixe de luz, que contém energia, passa pelo Sol, é atraído por ele. Assim, a luz não segue reta, mas é desviada.*

Finalmente comparamos a gravitação com outras teorias. Nos últimos anos, descobrimos que toda massa é constituída de partículas minúsculas e que há várias formas de interações, tais como forças nucleares. Até agora não se descobriu nenhuma explicação da gravitação baseada nessas forças nucleares ou elétricas. Seria importante verificar se a lei de Newton, modificada na lei de Einstein, poderá ser ainda mais modificada para se tornar consistente com o princípio da incerteza. Esta última modificação ainda não foi levada a cabo.

## **11-COMPORTAMENTO QUÂNTICO**

### **MECÂNICA ATÔMICA**

“Mecânica quântica” é a descrição do comportamento da matéria em todos os seus detalhes e, em particular, dos acontecimentos em uma escala atômica. As coisas em uma escala muito pequena não se comportam como nada que você tenha alguma experiência direta. Não se comportam como ondas, não se comportam como partículas, não se comportam como nuvens, ou bolas de bilhar, ou pesos ou molas, ou como qualquer coisa que você já tenha visto.

Newton pensou que a luz fosse constituída de partículas, mas depois se descobriu que se comporta como uma onda. Porém, no início do século XX, descobriu-se que a luz se comportava de fato como uma partícula. Historicamente, pensou-se que em vários aspectos comportava-se como uma onda. Assim, não se comporta realmente como nenhum dos dois.

Existe, porém, uma saída – a de que os elétrons comportam-se justamente como luz. O comportamento quântico de objetos atômicos é o mesmo para todos, todos são “ondas de partículas”, ou seja, como quiser chamá-los. Assim, o que aprendermos sobre as propriedades dos elétrons se aplicará também a todas as “partículas”, inclusive fótons de luz.

## PRIMEIROS PRINCÍPIOS DA MECÂNICA QUÂNTICA

- f) A probabilidade de um evento em uma experiência ideal é dada pelo quadrado do valor absoluto de um número complexo  $\emptyset$ , denominado amplitude de probabilidade.

$P$  = probabilidade

$\emptyset$  = amplitude de probabilidade

$$P = |\emptyset|^2$$

- g) Quando um evento pode ocorrer de várias formas diferentes, a amplitude de probabilidade para o evento será a soma das amplitudes de probabilidades de cada forma considerada separadamente. Há interferência.

$$\emptyset = \emptyset_1 + \emptyset_2$$

$$P = |\emptyset_1 + \emptyset_2|^2$$

- h) Se for realizada uma experiência capaz de determinar se uma ou outra alternativa é realmente tomada, a probabilidade do evento será a soma das probabilidades de cada alternativa. A interferência se perderá.

$$P = P_1 + P_2$$

## O PRINCÍPIO DA INCERTEZA

Foi assim que Heisenberg formulou originalmente o princípio da incerteza: se você fizer a medida de qualquer objeto e conseguir determinar a componente  $x$  de seu momento com uma incerteza  $\Delta p$ , não conseguirá, ao mesmo tempo, saber sua posição  $x$  mais precisamente do que  $\Delta x = h/\Delta p$ . O produto das incertezas da posição e do momento em qualquer instante deve superar a constante de Planck. Este é um caso especial do princípio da incerteza que enunciamos de forma mais geral. O enunciado mais geral foi que não se consegue projetar um equipamento para determinar qual de duas alternativas é escolhida sem, ao mesmo tempo, destruir o padrão de interferência.

O princípio da incerteza “protege” a mecânica quântica. Heisenberg reconheceu que, se fosse possível medir o momento e a posição simultaneamente com maior precisão, a mecânica quântica desmoronaria. Assim, propôs que deve ser impossível. A mecânica quântica preserva sua perigosa, mas correta existência.

## FÍSICA EM LIÇÕES NÃO TÃO FÁCEIS

### f. VETORES

## SIMETRIA EM FÍSICA

A palavra *simetria* é usada na física com sentido espacial. Quando temos um quadro simétrico, um lado é de algum modo idêntico ao outro lado. Segundo Hermann Weyl – uma coisa é simétrica se for possível submetê-la a uma operação e ela parecer exatamente igual após a operação. Em física, todas as nossas ideias exigem certa dose de senso comum em sua aplicação; não são ideias puramente matemáticas ou abstratas.

## VETORES

As demais leis da física, assim como as leis de Newton, também possuem as duas propriedades que chamamos invariância sob a translação de eixos e rotação de eixos. Pela importância que essas propriedades apresentam, foi desenvolvida uma técnica matemática para um melhor proveito delas na formulação e utilização de leis físicas. Esse método foi chamado de *análise vetorial*.

Para compreender o emprego da técnica vetorial, deve-se notar alguns princípios de grandeza: comum, grandeza sem direção, ou um *escalar* (por exemplo, a temperatura).

Outras grandezas que são importantes na física possuem direção e sentido. O momento e a força também possuem direção, assim como o deslocamento: quando alguém anda de um lugar para o outro no espaço, podemos saber quão longe ele foi, mas se quisermos saber aonde ele foi, precisamos especificar uma direção e um sentido.

Consideremos que todas as grandezas têm direção e sentido, com um deslocamento no espaço, são chamadas de vetores.

Qualquer quantidade física associada a três números que se transforma como as componentes de um deslocamento no espaço é um vetor. Uma equação como

$$F = r$$

Seria, assim, verdadeira em qualquer sistema de coordenadas se fosse verdadeira em um. Esta equação, é claro, representa as três equações

$$Fx = x, \quad Fy = y, \quad Fz = z,$$

ou, alternativamente,

$$Fx' = x' \quad Fy' = y' \quad Fz' = z'.$$

Como **exemplos de vetores**, podemos mencionar **velocidade, momento, força e aceleração**. Para muitos propósitos, convém mostrar a grandeza vetorial por uma seta que indica a direção do sentido em que ela está agindo. Podemos representar a força por uma seta porque ela tem as mesmas propriedades de transformação matemática de um “deslocamento no espaço”. Assim, nós a representamos em um diagrama como se fosse um deslocamento, usando uma escala de modo que uma unidade de força, ou um Newton, corresponda a certo comprimento adequado. Uma vez feito isso, todas as forças podem ser representadas como comprimentos, por que uma equação como

$$F = kr$$

onde  $k$  é alguma constante, é uma equação perfeitamente legítima. Desse modo, podemos sempre representar forças por setas, o que é muito conveniente, porque, uma vez desenhada a seta, não precisamos mais dos eixos. Podemos rapidamente calcular como as três componentes mudam com a rotação dos eixos, porque este é apenas um problema geométrico.

## ÁLGEBRA VETORIAL

Descrevemos as leis, ou regras para combinar vetores de várias maneiras. A primeira delas é a *adição de dois vetores*: suponhamos que **a** seja um vetor que, em algum sistema de coordenadas específico, possui três componentes ( $ax' ay' az$ ), e que **b** seja outro vetor que possui três componentes ( $bx' by' bz$ ). Agora inventemos três números novos ( $ax + bx' + ay + by' + az + bz$ ).

Um vetor nem sempre é formado por três números. Para que exista um vetor, além de existirem três números, eles precisam estar associados a um sistema de coordenadas de tal modo que, se girarmos o sistema de coordenadas, os três números “rodam” um sobre o outro, “misturam-se” um com o outro. Quando **a** e **b** são “somados” neste sentido, formarão um vetor que podemos chamar de **c**.

$$c = a + b.$$

A propriedade interessante

$$\mathbf{c} = \mathbf{b} + \mathbf{a},$$

E ainda:

$$\mathbf{a} + (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = (\mathbf{a} + \mathbf{b}) + \mathbf{c}.$$

Podemos somar vetores em qualquer ordem. Os vetores podem ser somados, sem referência a quaisquer eixos coordenados.

Se multiplicarmos um vetor por um número  $\alpha$ , definimos um vetor cujas componentes são  $\alpha ax, \alpha ay$  e  $\alpha az$ .

Podemos definir a subtração de vetores da mesma forma que a adição, se em vez de somar, subtraímos as componentes. Por exemplo:

$$\mathbf{d} = \mathbf{a} - \mathbf{b} = \mathbf{a} + (-\mathbf{b})$$

Observando que a diferença  $\mathbf{a} - \mathbf{b}$  pode ser encontrada facilmente a partir de  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$ , usando a relação equivalente  $\mathbf{a} = \mathbf{b} + \mathbf{d}$ . Assim, é ainda mais fácil de encontrar a diferença do que a soma, simplesmente traçamos o vetor de  $\mathbf{b}$  até  $\mathbf{a}$  para obter  $\mathbf{a} - \mathbf{b}$ .

Considerando a velocidade como um vetor. Quando observamos que os componentes  $dx/dt$  e  $dy/dt$  se transformam de acordo com a mesma lei de  $x$  e  $y$ , de modo que a derivada em relação ao tempo é um vetor, concluímos que a velocidade é um vetor. Então, podemos escrever a velocidade da seguinte maneira

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

Pode-se compreender a velocidade e porque ela é um vetor mais facilmente da seguinte maneira: de quanto uma partícula se desloca num tempo curto  $\Delta t$ ? A resposta é:  $\Delta \mathbf{r}$ , de modo que, se a partícula está “aqui” em um instante e “ali” em outro instante, a diferença vetorial entre as posições  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ , que está na direção do movimento, dividida pelo intervalo de tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$ , é o vetor velocidade média.

Em outras palavras, por velocidade vetorial queremos dizer o limite, quando  $\Delta t$  tende a 0, da diferença entre os vetores posição no instante de tempo  $t + \Delta t$  e no instante  $t$ , dividido por  $\Delta t$ :

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right) = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

De modo que, a velocidade é um vetor porque é a diferença entre dois vetores. É também a definição correta da velocidade, porque suas componentes são  $dx/dt$ ,  $dy/dt$  e  $dz/dt$ . Se derivarmos qualquer vetor em relação ao tempo, produzimos um novo vetor. Assim, temos várias maneiras de produzir novos vetores: multiplicar por uma constante, derivar em relação ao tempo, somar ou subtrair dois vetores.

## LEIS DE NEWTON NA NOTAÇÃO VETORIAL

Para escrever as leis de Newton em forma vetorial, temos que dar um passo adiante e definir o vetor aceleração. Ele é a derivada em relação ao tempo do vetor velocidade, e é fácil demonstrar que as suas componentes são as segundas derivadas de  $x$ ,  $y$  e  $z$  em relação a  $t$ :

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \left( \frac{d}{dt} \right) \left( \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}$$

(1.11)

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}, a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2}, a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2}$$

(1.12)

Com esta definição, então, as leis de Newton podem ser escritas como:

$$ma = F$$

(1.13)

ou

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F$$

(1.14)

O problema que temos para provar a invariância das leis de Newton sob a rotação das coordenadas é que – provar que **a** é um vetor, já fizemos. Provar que **F** é um vetor, supomos que seja. Portanto, se a força for um vetor, então, sabemos que a aceleração é um vetor, a equação (1.13) terá o mesmo aspecto em qualquer sistema de coordenadas. Isto simplifica o nosso raciocínio de modo que não precisamos escrever três leis sempre que escrevemos as equações de Newton ou outras leis da física.

Consideremos a aceleração. Entendemos que a aceleração é a diferença entre as velocidades divididas pelo pequeno intervalo de tempo, de modo que precisamos da diferença entre as duas velocidades. Para obtermos a diferença entre as velocidades precisamos traçar um novo diagrama para subtrair os vetores. Observamos na **figura 1-8**,  $v_1$   $v_2$  são traçados paralelamente e iguais aos seus equivalentes na **figura 1-7**, a partir disto discutimos a aceleração. A aceleração é simplesmente  $\Delta v / \Delta t$ .

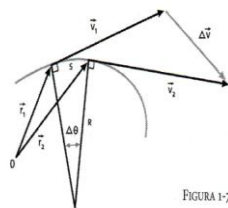


FIGURA 1-7 Uma trajetória curva.

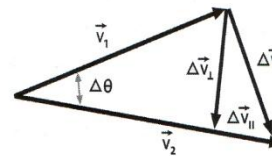


FIGURA 1-8 Diagrama para calcular a aceleração.

Podemos compor a diferença de velocidades a partir de duas partes, imaginando a aceleração como tendo duas componentes:  $\Delta v_{||}$  na direção tangente à trajetória, e  $\Delta v_{\perp}$  formando ângulos retos com a trajetória. A aceleração tangente à trajetória é exatamente a mudança no comprimento de vetor, ou seja, a mudança no módulo da velocidade (ou na rapidez)  $v$ :

$$a_{||} = \frac{dv_{||}}{dt}$$

(1.15)

É fácil de calcular a outro componente de aceleração, que forma o ângulo reto com a curva. No tempo curto  $\Delta t$ , seja a mudança de ângulo entre  $v_1$  e  $v_2$  o ângulo pequeno  $\Delta \theta$ . Se a magnitude da velocidade é chamada de  $v$ , logo

$$\Delta v_{\perp} = v \Delta \theta$$

e a aceleração **a** será

$$a_{\perp} = v \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$



$\Delta\theta / \Delta t$  pode ser encontrado da seguinte forma: se, em certo momento, a curva for aproximada como um círculo com certo raio R, então, no tempo  $\Delta t$ , a distância  $s$  é  $v\Delta t$ , onde  $v$  é a velocidade.

$$\Delta\theta = v \frac{\Delta t}{R}, \text{ ou } \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{v}{R}$$

Encontramos, portanto

$$a_{\perp} = \frac{v^2}{R}$$

(1.16)

## PRODUTO ESCALAR DE VETORES

O comprimento de um deslocamento no espaço seria o mesmo em qualquer sistema de coordenadas, assim se um deslocamento específico  $\mathbf{r}$  é representado por  $x$ ,  $y$  e  $z$  em um sistema de coordenadas e por  $x'$ ,  $y'$  e  $z'$  em outro sistema de coordenadas, com certeza a distância  $r = |\mathbf{r}|$  seria, em ambos, a mesma.

Temos

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

e

$$r' = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}$$

Desta maneira, verificamos que as duas maneiras são iguais. Não precisam extrair a raiz quadrada; torna-se mais prático, de modo que falemos sobre o quadrado da distância:

$$x^2 + y^2 + z^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2$$

(1.17)

Para descobrirmos se são iguais, basta fazer a substituição conforme a equação (1.15). Isso indica que podemos produzir uma nova grandeza, uma função de  $x$ ,  $y$  e  $z$  denominada *função escalar*, uma grandeza que não tem direção, porém é a mesma em todos os sistemas. Um escalar pode ser gerado a partir de um vetor. A regra geral para isto é: *somar os quadrados dos componentes*. Um escalar é denominado  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}$ , que em todos os sistemas de coordenadas é o mesmo, e é definido como a soma dos quadrados das três componentes do vetor:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{a} = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2$$

Independentemente dos eixos, a resposta será a mesma para qualquer conjunto de eixos. Assim, temos um novo tipo de grandeza, um *invariante* ou *escalar* novo produzido por um vetor “elevado ao quadrado”.

Ao definirmos a seguinte grandeza para dois vetores quaisquer  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$ , concluímos que esta grandeza calculada nos sistemas com e sem linhas, também permanece a mesma.

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{a} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

(1.19)

Observamos que isto é verdadeiro em relação a

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{a}, \mathbf{b} \cdot \mathbf{b} \text{ e } \mathbf{c} \cdot \mathbf{c}$$

Portanto, a soma dos quadrados  $(a_x b_x)^2 + (a_y b_y)^2 + (a_z b_z)^2$  será invariante:

$$(a_x b_x)^2 + (a_y b_y)^2 + (a_z b_z)^2 = (a'_x b'_x)^2 + (a'_y b'_y)^2 + (a'_z b'_z)^2$$

(1.20)

Se expandirmos os dois lados desta equação, haverá produtos cruzados exatamente do tipo que aparece na equação (1.19), assim como as somas dos quadrados das componentes de **a** e **b**. A invariância de termos da forma da equação (1.18) então deixa os termos do produto cruzados (1.19) invariantes também.

Chama-se *produto escalar* de dois vetores a quantidade de  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$  e possui muitas propriedades interessantes e úteis. Prova-se facilmente, por exemplo, que

$$\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{c} \quad (1.21)$$

Existe uma forma geométrica simples de calcular  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$  sem ter de calcular as componentes de **a** e **b**:  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$  é o produto do comprimento de **a** pelo comprimento de **b**, multiplicado pelo cosseno do ângulo entre eles. Se escolhermos um sistema de coordenadas onde o eixo x se situa a longo de **a**, a única componente de **a** que existirá será  $a_x$ , que é o comprimento inteiro de **a**. a equação (1.19) reduz-se a  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_x b_x$  para este caso, e este é o comprimento de **a** vezes o componente de **b** na direção de **a**, ou seja,  $b \cos \theta$ :

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = ab \cos \theta$$

Então, nesse sistema de coordenadas especial, provamos que  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$  é o comprimento de **a** vezes o comprimento de **b** vezes  $\cos \theta$  e que – se isto é verdadeiro em um sistema de coordenadas, é verdadeiro em todos, pois  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$  é independentemente do sistema de coordenadas.

Utilizamos o produto escalar o tempo todo na física. Por exemplo, para medirmos a energia cinética, de acordo com a análise vetorial utilizamos a seguinte fórmula

$$E.C. = \frac{1}{2} m(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = \frac{1}{2} m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$$

A energia não possui direção. O momento possui direção e sentido; ele é um vetor, e é a massa vezes o vetor velocidade.

Podemos citar mais um exemplo do produto escalar que é o trabalho realizado por uma força quando algo é empurrado de um lugar para o outro. Ainda não definimos trabalho, mas ele é equivalente à mudança de energia, os pesos levantados, quando uma força **F** age por uma distância **s**:

$$\text{Trabalho} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}$$

Às vezes é muito conveniente falar sobre a componente de um vetor em uma certa direção (a direção vertical, pois esta é a direção da gravidade). Na direção em que queremos estudar, denominamos um *vetor unitário*. Por vetor unitário entendemos que é *aquele cujo produto escalar por si mesmo é igual à unidade*. Chamemos este vetor unitário de **i**; então  $\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = 1$ . Se quisermos a componente de algum vetor na direção de **i**, vemos que o produto escalar  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{i}$  será a  $\cos \theta$ , ou seja, a componente de **a** na direção de **i**. Esta maneira permite obter todas as componentes. Suponhamos que um dado sistema de coordenadas, x, y e z inventamos três vetores: **i**, um vetor unitário na direção x; **j**, um vetor unitário na direção y; e **k**, um vetor unitário na direção z. Observe primeiro que  $\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = 1$ . Quando dois vetores formam um ângulo reto, seu produto escalar é zero. Portanto,

$$\begin{aligned} \mathbf{i} \cdot \mathbf{i} &= 1 \\ \mathbf{i} \cdot \mathbf{j} &= 0 \quad \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = 1 \\ \mathbf{i} \cdot \mathbf{k} &= 0 \quad \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = 0 \quad \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = 1 \end{aligned} \quad (1.24)$$

Com estas definições, qualquer vetor pode ser escrito como:

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}$$

Desta maneira, podemos partir das componentes de um vetor e chegar ao vetor.

### g. SIMETRIA NAS LEIS FÍSICAS

#### VETORES POLARES E AXIAIS

Quando vimos a análise vetorial, vimos as regras, “direitas”, que temos de usar para que o momento angular, torque, campo magnético, e assim por diante, resultem corretos. A força numa carga que se move num campo magnético, por exemplo, é  $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Em uma dada situação em que conhecemos  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{B}$ , esta equação não é o suficiente para definir a direção à direita? Se voltarmos e olharmos de onde vieram os vetores, veremos que a “regra da mão direita” foi meramente uma convenção, um artifício. As grandezas originais, como os momentos angulares e as velocidades angulares, e coisas desta espécie, não eram realmente vetores. De alguma maneira, elas estão todas associadas em certo plano, exatamente porque existem três dimensões no espaço que associamos à grandeza com uma direção perpendicular àquele plano. Das duas direções possíveis, escolhemos a direção que segue “a regra da mão direita”.

Podemos considerar, que se as leis da física são simétricas e fossem trocadas a palavra “direita” por “esquerda” em todos os livros em que “regras da mão direita” são dadas e usássemos em vez delas todas as “regras da mão esquerda” sempre, isto não faria nenhuma diferença sobre as leis físicas.

Podemos citar um exemplo, existem dois tipos de vetores. Os vetores “honestos”, por exemplo, um deslocamento  $\Delta\mathbf{r}$  no espaço. Se em nosso aparelho existe uma peça aqui e outra coisa ali, então em um aparelho invertido haverá a peça invertida e a outra coisa invertida, e se traçarmos um vetor será a imagem especular invertida do outro. A seta vetorial troca de ponta, assim como todo o espaço vira às avessas. Tal vetor se chama *vetor polar*.

Mas a outra espécie de vetor, que tem a ver com a rotação, é de natureza diferente. Suponhamos que em três dimensões algo está girando como mostra a **Figura 2-3**. Então, se o olharmos num espelho, estará girando com o mostrado: como a imagem no espelho da rotação original. Neste momento concordamos em representar a rotação no espelho pela mesma regra: ela é um “vetor” que, refletido, não muda da mesma forma como faz o vetor polar, mas se inverte em relação aos vetores polares e à geometria do espaço. Tal vetor se chama *vetor axial*.

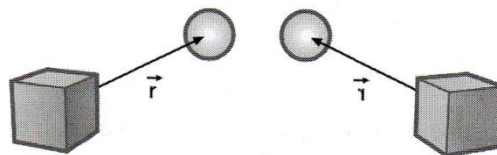


FIGURA 2-2 Um deslocamento no espaço e sua imagem no espelho.

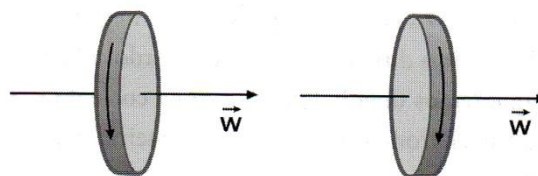


FIGURA 2-3 Uma roda que gira e sua imagem no espelho. Observe que a direção do “vetor” velocidade angular não se inverte.

Se a lei da simetria da reflexão for correta em física, deve ser verdade que as equações devem ser concebidas de tal maneira que, se trocarmos o sinal de cada vetor axial e de cada produto de vetores, que seria o que corresponde à reflexão, nada acontecerá. Quando escrevemos, por exemplo, uma fórmula que diz que o momento angular é  $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ , esta equação está correta, pois se mudarmos para um sistema de coordenadas esquerdo, mudamos o sinal  $\mathbf{L}$ , mas  $\mathbf{p}$  e  $\mathbf{r}$  não mudam. O sinal do produto vetorial é trocado, já que precisamos mudar de uma regra direita para uma regra esquerda. Em outro exemplo, sabemos que a força em uma carga que se move num campo magnético é  $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , mudarmos de um sistema de mão direita para um de mão esquerda, já que  $\mathbf{F}$  e  $\mathbf{v}$  são sabidamente vetores polares, a mudança de sinal requerida pelo produto vetorial precisa ser cancelada por uma mudança de sinal em  $\mathbf{B}$ , o que significa que  $\mathbf{B}$  deve ser um vetor axial. Isto significa que, se fizermos tal reflexão,  $\mathbf{B}$  terá de ir para...  $-\mathbf{B}$ . Dessa maneira, se mudamos nossas coordenadas da direita para a esquerda, precisamos também mudar os pólos dos ímãs de norte para sul.

Imaginemos que temos dois ímãs, como na figura 2-4. Um é um ímã com a bobina enrolada para um lado e com a corrente em uma certa direção. O outro ímã parece com o primeiro ímã refletido em um espelho: a bobina se enrolará para o outro lado, tido que o que acontece dentro da bobina é exatamente invertido, e a corrente circula como mostrado. Por um lado, das leis para a produção de campos magnéticos, que ainda não conhecemos oficialmente, descobre-se que o campo magnético é como mostrado na figura. Em um caso, o pólo é um pólo magnético sul, ao passo que no outro ímã a corrente está indo para o outro lado e o campo magnético se inverte: é um pólo magnético norte. Então, percebemos que, quando mudamos da direita para a esquerda, precisamos realmente mudar do norte para o sul.

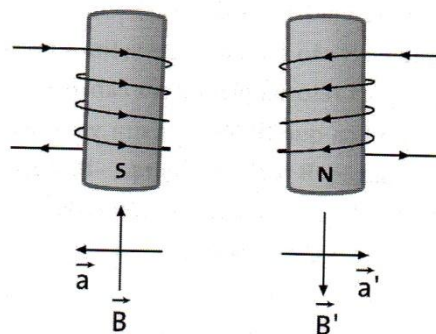


FIGURA 2-4 Um ímã e sua imagem no espelho.

A mudança que ocorre de norte para sul, não passa de uma mera convenção.

Vamos aos *fenômenos*. Consideremos, agora, que temos um elétron se movendo através de um campo, entrando na página. Assim, se usarmos a fórmula para a força,  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  (lembre que a carga é negativa), descobriremos que o elétron se desviará na direção indicada, de acordo com a lei física. Portanto, o fenômeno é que temos uma bobina com uma corrente indo em um sentido especificado e um elétron se curva de certa maneira: esta é a física, não importa como rotulamos tudo.

Se fizermos o mesmo experimento com o espelho, enviaremos um elétron em uma direção correspondente, assim a força estará invertida, se a calcularmos com base na mesma regra. Isto ocorre porque os *movimentos* correspondentes do elétron são então imagens invertidas um do outro.

## QUAL MÃO É A DIREITA?

Existem sempre duas regras direitas ou um número par delas ao estudarmos qualquer fenômeno. E o resultado final é que os fenômenos sempre parecem simétricos. Resumindo, não conseguiremos diferenciar direita de esquerda se também não conseguirmos diferenciar norte de sul. Contudo, parece que conseguimos distinguir o pólo norte de um ímã.

Se conseguíssemos estabelecer a distinção do pólo norte e do pólo sul de um ímã, se houvesse uma maneira qualquer de fazer essa distinção, então conseguiríamos distinguir qual dos dois casos realmente aconteceria e isto seria o fim da lei da simetria de reflexão.

## A PARIDADE NÃO É CONSERVADA

As leis da gravitação, as leis da eletricidade e magnetismo, das forças nucleares, todas satisfazem o princípio da simetria de reflexão de modo que essas leis, ou qualquer coisa derivada delas, não podem ser usadas. Entretanto, associado a muitas partículas encontradas na natureza, existe um fenômeno chamado *desintegração beta*, ou *desintegração fraca*.

Uma partícula descoberta em torno de 1954 é um dos exemplos da desintegração fraca, que apresentou um enigma estranho. Havia certa partícula carregada que se desintegrava em três *mésons*  $\pi$ . Essa partícula foi chamada, por enquanto, de méson  $\tau$ .

Uma outra partícula que desintegra em dois mésons, um deve ser neutro, com base na conservação da carga. Essa partícula foi denominada méson  $\theta$ . Por outro lado temos uma partícula chamada de  $\tau$ , que se desintegra em dois mésons  $\pi$ . Logo se descobriu que  $\tau$  e  $\theta$  tem massas quase iguais, dentro da margem experimental de erro. Depois, que o intervalo de tempo que eles levavam para se desintegrar em três  $\pi$  <sup>1</sup>s e dois  $\pi$  <sup>1</sup>s era quase exatamente o mesmo, eles duram o mesmo intervalo de tempo.

Dessa maneira, foi possível provar, com base no princípio da simetria de reflexão na mecânica quântica, que era impossível **esses dois pi sucederem da mesma partícula** – a mesma partícula não poderia se desintegrar das duas maneiras. A lei da conservação correspondente ao princípio da simetria de reflexão; é algo que não possui equivalente clássico, de modo que essa espécie de conservação quântica foi chamada de *conservação da paridade*.

Em consequência da conservação da paridade – ou, mais precisamente, com base na simetria das equações quânticas dos decaimentos fracos sob reflexão –, a mesma partícula não poderia se desintegrar nas duas, de modo que deve haver alguma coincidência de massas, durações. Quanto mais estudada, mais notável a coincidência, e a reflexão, uma profunda lei da natureza pode ser comentada.

## ANTIMATÉRIA

Quando uma das simetrias se perde, a primeira coisa a se fazer é voltar à lista das simetrias conhecidas ou supostas e verificar se alguma das outras se perde. Existe, ainda, a relação entre matéria e antimatéria que não mencionamos. Dirac previu que, além dos elétrons, deve haver outra partícula, chamada pósitron, que está necessariamente relacionada ao elétron.

Essas duas partículas submetem-se a certas regras de correspondência: as energias são iguais, as massas são iguais, as cargas são invertidas. Entretanto, o mais importante, as duas partículas quando entram em contato podem destruir uma à outra e

liberar toda a sua massa em forma de energia, digamos, raios  $\gamma$ . O pósitron é denominado uma antipartícula do elétron, e essas são as características de uma partícula e sua antipartícula.

Dirac nos deixa claro que todas as demais partículas do mundo deveriam também ter suas antipartículas correspondentes. Muitas pessoas podem não entender quando dizemos que existe um nêutron e também um antinêutron, pois para elas um nêutron tem a carga neutra de modo que não pode haver uma carga oposta. Então, consideramos que a regra do “anti” não é apenas ter uma carga oposta, ele tem determinado conjunto de propriedades que, na totalidade, se opõem. Assim, um antinêutron se distingue do nêutron da seguinte maneira: se juntarmos dois nêutrons e um antinêutron, eles se destruirão mutuamente, com uma grande explosão de energia sendo liberada, com diferentes mésons  $\pi$ , raios  $\gamma$  e outras coisas. Desta forma se temos antinêutrons, antiprótons e antielétrons, podemos produzir antiátomos, mesmo que ainda não tenham sido produzidos, porém é uma possibilidade.

## SIMETRIAS QUEBRADAS

Dentro do domínio enorme da física todas as leis parecem ser simétricas, contudo, elas não são. Na verdade, nosso problema está em explicar de onde vem a simetria. Por que a natureza é quase simétrica? Ninguém tem ideia do motivo. Um exemplo que podemos tomar como sugestão é algo do tipo: existe um portão no Japão, em Neiko, considerado pelos japoneses o mais bonito de todo país. Foi bem elaborado, com montes de frontões, bonitos entalhes, inúmeras colunas, cabeças de dragão e príncipes esculpidos nas pilastras. Entretanto, quando alguém examina de perto, vê que no padrão elaborado e complexo ao longo de uma das pilastras, um dos pequenos elementos do padrão foi entalhado de cabeça para baixo. Com exceção deste detalhe tudo é completamente simétrico. O argumento usado para justificar o porquê de ter sido entalhado de cabeça para baixo seria para que os deuses não tenham inveja da perfeição do homem.

### *h. A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA*

## O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE

As equações do movimento enunciadas por Newton, durante mais de duzentos anos, acreditou-se, que estariam corretas. No entanto, Einstein, em 1905, descobriu um erro e a correção para ela.

A segunda lei de Newton, que expressamos pela equação

$$f = \frac{d(mv)}{dt}$$

Foi enunciada sob o pressuposto tácito de que  $m$  é uma constante, mas sabemos agora que isto não é verdade, e que a massa de um corpo aumenta com a velocidade. Na fórmula corrigida de Einstein,  $m$  tem o valor

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

(3.1)

Onde a “massa de repouso”,  $m_0$ , representa a massa de um corpo que não está se movendo e  $c$  é a velocidade da luz, que é cerca de  $3 \times 10^8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Isto é tudo que existe sobre a teoria da relatividade, ela apenas muda as leis de Newton introduzindo



um fator de correção da massa. A própria fórmula deixa claro que o aumento dessa massa é muito pequeno em circunstâncias normais.

O princípio da relatividade tem sido utilizado por diferentes pessoas. No século XIX, o interesse nele aumentou em consequência das investigações dos fenômenos da eletricidade, magnetismo e luz. Uma longa série de estudos desses fenômenos, realizados por muitas pessoas, culminou nas equações de Maxwell para o campo eletromagnético, que descrevem a eletricidade, o magnetismo e a luz em um só sistema uniforme. Porém, as equações de Maxwell não pareciam obedecer ao princípio da relatividade. Se transformarmos as equações de Maxwell, pela substituição das equações 3.2, sua forma permanece a mesma.

$$\begin{aligned}x' &= x - ut \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t\end{aligned}$$

(3.2)

A derivação desta equação fornece

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - u$$

o que significa que de acordo com a transformação de Galileu, a velocidade aparente da luz, não deveria ser  $c$ , e sim  $c-u$ .

## AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ

H. A. Lorentz observou que ao fazer as seguintes substituições nas equações de Maxwell:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}\end{aligned}$$

(3.3)

As equações de Maxwell permanecem com a mesma forma quando esta transformação é aplicada a elas. As equações (3.3) são conhecidas como *transformação de Lorentz*. Einstein, seguindo a sugestão de Poincaré, propôs então que *todas as leis físicas deveriam ser tais que permanecessem inalteradas sob uma transformação de Lorentz*. Em outras palavras, deveríamos mudar não as leis da eletrodinâmica, mas as leis da mecânica.

O único requisito é que a massa  $m$  nas equações de Newton seja substituída pela forma mostrada na equação (3.1). Com essa mudança, as leis de Newton e as leis da eletrodinâmica se harmonizam.

## O EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

O experimento de Michelson-Morley foi realizado com um aparelho que compreende essencialmente uma fonte de luz A, um vidro laminado parcialmente coberto de prata B e dois espelhos C e E, tudo montado sobre uma base rígida. Os espelhos são colocados a distâncias iguais a L em relação a B. O vidro laminado B divide um feixe de luz recebido, e os dois feixes resultantes continuam em direções mutuamente perpendiculares até os espelhos, onde são refletidos de volta a B. Ao chegarem de volta a B, os dois feixes são recombinados como dois feixes superpostos, D e F. Se o tempo decorrido para a luz ir de B a E e voltar for o mesmo que de B a C e de volta, os feixes emergentes D e F estarão em fase e reforçarão um ao outro, mas se os dois tempos diferirem ligeiramente, os feixes estarão ligeiramente fora de fase, resultando numa interferência. Se o aparelho estiver em “repouso” no éter, os tempos deveriam ser exatamente iguais, mas se estiver movendo-se para a direita com uma velocidade u, deveria haver uma diferença nos tempos. Podemos expressar essa distância como  $ct_1$ , de modo que temos:

$$ct_1 = L + ut_1 \text{ ou } t_1 = \frac{L}{c - u}$$

O tempo de retorno é o  $t_2$  que pode ser calculado de forma semelhante. Durante esse tempo, o vidro laminado B avança uma distância  $ut_2$  de modo que a distância de retorno da luz é  $L - ut_2$ . Então temos

$$ct_2 = L - ut_2 \text{ ou } t_2 = \frac{L}{c + u}$$

Então o tempo total é

$$t_1 + t_2 = \frac{2Lc}{(c^2 - u^2)}$$

Por conveniência, em comparações posteriores de tempos, escrevemos isto como

$$t_1 + t_2 = \frac{2L/c}{(1 - u^2/c^2)} \tag{3.4}$$

Nosso segundo cálculo será o do tempo  $t_3$ , o espelho C move-se para a direita de uma distância  $ut_3$  até a posição C'; ao mesmo tempo, a luz percorre uma distância  $ct_3$  ao longo da hipotenusa de um triângulo, que é BC'. Para esse triângulo retângulo, temos

$$(ct_3)^2 = L^2 + (ut_3)^2$$

Ou

$$L^2 = c^2t_3^2 - u^2t_3^2$$

e obtemos

$$t_3 = \frac{L}{\sqrt{c^2 - u^2}}$$



Para a viagem de volta de C' a distância é a mesma, como pode ser visto pela simetria da figura: portanto, o tempo de retorno também é igual, e o tempo total é  $2t_3$ . Com uma pequena reorganização da fórmula, podemos escrever:

$$2t_3 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{2L/c}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad (3.5)$$

Ao realizarem o experimento, Michelson e Morley orientaram o aparelho de modo que a linha BE estivesse quase paralela ao movimento da Terra em sua órbita (em certos períodos do dia e da noite). Essa velocidade orbital é de aproximadamente 29 km/s, e qualquer “vento do éter” deveria ter pelo menos essa velocidade em certos períodos do dia ou da noite e em determinados períodos durante o ano. O aparelho era amplamente sensível para observar tal efeito, mas nenhuma diferença de tempo foi detectada. A velocidade da Terra em relação ao éter não pode ser detectada. O resultado do experimento foi nulo, conseqüentemente intrigante e perturbador.

A ideia a fim de encontrar uma saída para o impasse veio de Lorentz. Ele sugeriu que os corpos materiais se contraem quando se movem e que essa redução é apenas na direção do movimento, e também que, se o comprimento é  $L_0$  quando o corpo está em repouso, então, ao se mover à velocidade  $u$  paralelamente ao seu comprimento, o novo comprimento, que chamamos de  $L_{||}$  (L paralelo), é dado por

$$L_{||} = L_0 \sqrt{1 - u^2/c^2} \quad (3.6)$$

Quando esta modificação é aplicada ao interferômetro de Michelson-Morley, a distância de B e C não se altera, mas a distância de B e E se encurta em  $L$ . Portanto, a equação (3.5) não se altera, mas o  $L$  da equação (3.4) precisa ser alterado de acordo com a equação (3.6). Quando isto é feito, obtemos

$$t_1 + t_2 = \frac{(2L/c)\sqrt{1 - u^2/c^2}}{(1 - u^2/c^2)} = \frac{2L/c}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad (3.7)$$

Comparando este resultado com a equação (3.5), vemos que  $t_1 + t_2 = 2t_3$ . Portanto, se o aparelho encolhe da maneira descrita, conseguimos entender porque o experimento de Michelson-Morley não fornece nenhum efeito. A hipótese da contração embora explicasse com sucesso o resultado negativo do experimento, estava sujeita à objeção de que foi inventada com o propósito expresso de eliminar a dificuldade, sendo por demais artificial. Entretanto, em muitos outros experimentos para descobrir o vento de éter, dificuldades semelhantes surgiram, até que pareceu que a natureza estava “conspirando” contra o homem, introduzindo algum fenômeno novo no intuito de anular todos os fenômenos que permitissem uma medição de  $u$ .

Poincaré propôs, então, que existe uma lei da natureza, que não é possível descobrir um vento de éter por meio de nenhum experimento – ou seja, não existe como determinar uma velocidade absoluta.

## A TRANSFORMAÇÃO DO TEMPO

Quando a ideia da contração está em harmonia com os outros experimentos, descobre-se que tudo está correto, contanto que os tempos também sejam modificados, da forma expressa na quarta equação do conjunto (3.3).

## A CONTRAÇÃO DE LORENTZ

No experimento de Michelson-Morley, o braço transversal BC não pode mudar de comprimento pelo princípio da relatividade. Para que o experimento dê resultado nulo, o braço longitudinal BE precisa parecer mais curto, pela raiz quadrada  $\sqrt{1 - u^2/c^2}$ .

Imaginemos que Moe, movendo-se com um sistema S' na direção x, esteja medindo a coordenada x' de certo ponto com uma régua graduada. Ele aplica a régua x' vezes, de modo que pensa que a distância é de x' metros. Do ponto de vista de Joe no sistema S, porém, Moe está usando uma régua mais curta, de modo que a distância real medida é de  $x'\sqrt{1 - u^2/c^2}$  metros. Então, o sistema S' tiver se afastado uma distância ut do sistema S, o observador S diria que o mesmo ponto, medido em suas coordenadas, está a uma distância  $x = x'\sqrt{1 - u^2/c^2} + ut$  ou

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$$

Que é a primeira equação da transformação de Lorentz.

## SIMULTANEIDADE

De forma equivalente, devido à diferença nas escalas de tempo, a expressão do denominador é introduzida na quarta equação da transformação de Lorentz. O termo mais interessante nessa equação é  $u(x_1 - x_2)/c^2$  no numerador, por isto é totalmente novo e inesperado. Se um evento ocorre no ponto  $x_1$  no momento  $t_0$  e o outro evento em  $x_2$  e  $t_0$  (o mesmo momento), constatamos que os dois momentos correspondentes  $t'_1$  e  $t'_2$  diferem por uma quantidade

$$t'_2 - t'_1 = \frac{u(x_1 - x_2)/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$$

Esta circunstância é chamada “fracasso da simultaneidade a distância”.

## QUADRIVETORES

Na transformação de Lorentz é interessante observar que entre os x e t tem uma forma análoga à transformação dos x e y que estudamos para a rotação de coordenadas. Assim representamos:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta + y \operatorname{sen} \theta \\ y' &= y \cos \theta - x \operatorname{sen} \theta \end{aligned} \tag{3.8}$$

Em que o novo x' mistura os x e y antigos, e o novo y' também mistura os x e y antigos. De forma semelhante, na transformação de Lorentz, descobrimos um novo x', que é uma mistura de x e t, e um novo t', que é uma mistura de t e x. Assim, a transformação de Lorentz é análoga à rotação, só que é uma “rotação” no *espaço e*

*tempo*, o que parece ser um conceito estranho. Uma verificação da analogia com a rotação pode ser feita calculando-se a quantidade:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 \quad (3.9)$$

Nesta equação, os três primeiros termos de cada lado representam, em geometria tridimensional, o quadrado da distância entre um ponto e a origem, que permanece inalterado, independentemente da rotação dos eixos coordenados. Deste modo, a analogia com a rotação é completa, e é de tal natureza que vetores, ou seja, quantidades envolvendo “componentes” que se transformam da mesma forma que as coordenadas e o tempo – também são úteis na tocante à relatividade.

## DINÂMICA RELATIVÍSTICA

Na mecânica newtoniana, o corpo vai ganhando velocidade até ultrapassar a velocidade da luz. Mas isto é impossível na mecânica relativística. Sempre que uma força produz muito pouca mudança na velocidade de um corpo, dizemos que o corpo possui um alto grau de inércia, e é exatamente isto que nossa fórmula da massa relativística diz: a inércia é muito grande quando  $v$  está próximo de  $c$ .

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3.10)$$

Vejamos algumas outras consequências da mudança relativística da massa.

$$m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = m_0 (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

Esta é uma fórmula aproximada para expressar o aumento da massa, para o caso em que a velocidade é baixa em uma série de potências usando o teorema binominal, obteremos:

$$m_0 (1 - v^2/c^2)^{-1/2} = m_0 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots \right)$$

A fórmula mostra claramente que a série converge rapidamente quando  $v$  é baixa, e os termos após os dois ou três primeiros são desprezíveis. Portanto, podemos escrever:

$$m \approx m_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2 \left( \frac{1}{c^2} \right) \quad (3.11)$$

em que o segundo termo à direita expressa o aumento da massa devido à velocidade molecular. Quando a temperatura aumenta, a  $v^2$  aumenta proporcionalmente, de modo que podemos dizer que o aumento da massa é proporcional ao aumento da temperatura. Mas como  $\frac{1}{2} m_0 v^2$  é a energia cinética no sentido newtoniano antiquado, podemos também dizer que ao aumento da massa de todo esse corpo de gás é igual ao aumento da energia cinética dividido por  $c^2$ , ou  $\Delta m = \Delta(E.C.) / c^2$ .

## EQUIVALÊNCIA ENTRE MASSA E ENERGIA

Se dissermos que a massa é igual ao teor de energia total dividido por  $c^2$ . Se a equação (3.11) é multiplicada por  $c^2$ , o resultado é

$$mc^2 = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2 + \dots \quad (3.12)$$

Começamos com o corpo em repouso, quando sua energia é  $m_0c^2$ . Depois, aplicamos a força ao corpo, que dá início ao seu movimento e lhe confere energia cinética. Portanto, como a energia aumentou, a massa aumentou: isto está implícito na hipótese original. Na medida em que a força continua, tanto energia como massa continuam aumentando. Já vimos que a taxa de variação da energia com o tempo equivale à força vezes a velocidade, ou:

$$\frac{dE}{dt} = F \cdot v \quad (3.13)$$

Quando essas relações são combinadas à definição de E, a equação (3.13) torna-se:

$$\frac{d(mc^2)}{dt} = v \cdot \frac{d(mv)}{dt} \quad (3.14)$$

Queremos resolver esta equação para m. para isto, primeiro usamos o artifício matemático de multiplicar os dois lados por 2m, o que muda a equação para

$$c^2(2m) \frac{dm}{dt} = 2mv \cdot \frac{d(mv)}{dt} \quad (3.15)$$

Precisamos nos livrar das derivadas, o que se consegue integrando ambos os lados. A quantidade  $(2m) dm/dt$  pode ser reconhecida como a deriva em relação ao tempo de  $m^2$ , e  $(2mv) \cdot d(mv)/dt$  é a derivada em relação ao tempo de  $(mv)^2$ . Assim, a equação (3.15) é o mesmo que

$$c^2 \frac{d(m^2)}{dt} = \frac{d(m^2v^2)}{dt} \quad (3.16)$$

Se as derivadas de duas grandezas são iguais, as grandezas diferem no máximo por uma constante, por exemplo, C. Isto nos permite escrever:

$$m^2 c^2 = m^2 v^2 + C \quad (3.17)$$

Precisamos definir a constante C mais explicitamente. Como a equação (3.17) deve ser verdadeira para todas as velocidades, podemos escolher um caso especial para o qual  $v=0$  e dizer que, neste caso, a massa é  $m_0$ . A substituição por esses valores na equação (3.17) fornece

$$m_0c^2 = 0 + C$$

podemos agora usar este valor de C na equação (3.17), que se torna:

$$m^2 c^2 = m^2 v^2 + m_0^2 c^2 \quad (3.18)$$

a divisão por  $c^2$  e a reorganização dos termos fornecem:

$$m^2 (1 - v^2/c^2) = m_0^2$$

de que obtemos:

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

(3.19)

Esta é a fórmula (3.1) e é exatamente o que é necessário para a concordância entre massa e energia na equação (3.12).

### *i. ENERGIA E MOMENTO REALÍVISTICOS*

#### **A TRANSFORMAÇÃO DE VELOCIDADE**

A principal diferença entre a relatividade de Einstein e a relatividade de Newton é que as leis de transformação que conectam as coordenadas e tempos entre sistemas em movimento relativo são diferentes. A lei de transformação correta, a de Lorentz é

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Essas equações correspondem ao caso relativamente simples em que o movimento relativo dos dois observadores se dá ao longo de seus eixos x comum.

É interessante solucionar essas equações no sentido inverso, ou seja, aqui está um conjunto de equações lineares, quatro equações com quatro incógnitas, e elas podem ser resolvidas no sentido inverso, para x, y, z, t, em termos de x', y', z', t'. O resultado é muito interessante porque nos informa como um sistema de coordenadas “em repouso” parece do ponto de vista de um que está “se movendo”.

$$\begin{aligned}x &= \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \\y &= y' \\z &= z' \\t &= \frac{t' + ux'/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}\end{aligned}\tag{4.2}$$

Do ponto de vista de um sistema de coordenadas “se movendo” o deslocamento x é igual à velocidade vezes o tempo:

$$x' = v_{x'} t'\tag{4.3}$$

Agora temos apenas que calcular quais são a posição e o tempo, do ponto de vista de um sistema de coordenadas “em repouso”, para um objeto que tenha relação (4.2) entre x' e t'. Assim, simplesmente substituímos (4.3) em (4.2) e obtemos:

$$x = \frac{v_{x'} t' + ut'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}\tag{4.4}$$

Mas aqui encontramos x expresso em termos t'. Para obter a velocidade como vista pelo homem de fora, precisamos dividir sua distância pelo seu *tempo*, não pelo *tempo outro homem*. Assim, também precisamos calcular o tempo como visto de fora que é:

$$t = \frac{t' + u(v_{x'} t')/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \quad (4.5)$$

Agora podemos encontrar a razão entre x e t, que é

$$v_x = \frac{x}{t} = \frac{u + v_{x'}}{1 + uv_{x'}/c^2} \quad (4.6)$$

As raízes quadradas tendo-se cancelado. Esta é a lei que buscamos: a velocidade resultante, a “soma” de duas velocidades, não é apenas a soma algébrica de duas velocidades, mas é corrigida por  $1+uv/c^2$ .

Imagine que você está se movendo dentro de uma espaçonave com a metade da velocidade da luz, e que a própria espaçonave esteja viajando com a metade da velocidade da luz. Desse modo,  $u$  é  $\frac{1}{2}c$  e  $v$  é  $\frac{1}{2}c$ , mas, no denominador,  $uv/c^2$  é  $1/4$ , de modo que

$$t = \frac{\frac{1}{2}c + \frac{1}{2}c}{1 + \frac{1}{4}} = \frac{4c}{5}$$

Assim, em relatividade, “Metade” mais “metade” não resulta em “um”, resulta apenas em “4/5”. Na medida em que as velocidades são baixas, comparadas com a velocidade da luz, podemos esquecer o fator  $(1+uv/c^2)$ . Mas as coisas são diferentes em altas velocidades.

Digamos que dentro da espaçonave o homem está observando a própria luz. Em outras palavras,  $v=c$ , e mesmo assim a espaçonave está se movendo. Como as coisas ocorrerão para o homem? A resposta será

$$v = \frac{u + c}{1 + uc/c^2} = c \frac{u + c}{u + c} = c$$

Se algo estiver se movendo à velocidade da luz dentro da nave, parecerá estar se movendo à velocidade da luz do ponto de vista do homem no solo também. Isso demonstra de fato a teoria da relatividade de Einstein.

Existem casos em que o movimento não está na direção da translação uniforme. Por exemplo, pode existir um objeto dentro da nave que está se movendo “para cima” com velocidade  $v_y$ , em relação à nave, e a nave está se movendo horizontalmente. Simplesmente repetimos o processo, só que usando y em vez de x, com o resultado

$$y = y' = v_{y'} t'$$

De modo que se  $v_{x'} = 0$

$$v_y = \frac{y}{t} = v_{y'} \sqrt{1 - u^2/c^2} \quad (4.7)$$

Desta maneira, uma velocidade lateral não é mais  $v_{y'}$ , mas  $v_{y'} \sqrt{1 - u^2/c^2}$ . Chegamos a este resultado por substituições e combinações nas equações da transformação.

## MASSA RELATIVÍSTICA

Podemos mostrar que, em consequência da relatividade e de mais alguns pressupostos razoáveis, a massa deve variar de forma semelhante. Para não precisarmos estudar as leis da transformação da força, exceto a suposição que faremos da validade

da conservação do momento e da energia. Vamos supor que o momento é uma constante vezes a velocidade, como fez Newton, mas que é uma certa *função* de velocidade. Escrevemos da seguinte forma o vetor do momento como um certo coeficiente vezes o vetor velocidade:

$$p = m_v v \quad (4.8)$$

Colocamos um  $v$  subscrito no coeficiente, a fim de lembrar que é uma função da velocidade, e chamaremos de massa esse coeficiente  $m_v$ . Tentaremos demonstrar que a fórmula para  $m_v$  deve ser  $m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$ , argumentando com base no princípio da relatividade que as leis da física devem ser as mesmas em todos os sistemas de coordenadas que não estejam acelerados.

Consideremos, uma partícula em movimento oblíquo que tem certa velocidade  $v$  cujos componentes descobriremos que são  $u$  e  $w\sqrt{1-u^2/c^2}$ , e sua massa é  $m_v$ . A mudança no momento vertical dessa partícula é, portanto,  $\Delta p' = 2m_v w\sqrt{1-u^2/c^2}$ , de acordo com nossa lei pressuposta (4.8), o componente de momento é sempre a massa correspondente à magnitude da velocidade vezes a componente de velocidade na direção de interesse. Desta maneira, para que tal movimento seja zero, os momentos verticais precisam se cancelar, e a razão entre a massa com velocidade  $v$  e a massa com velocidade  $w$  deve, portanto ser

$$\frac{m_v}{m_w} = \sqrt{1-u^2/c^2} \quad (4.9)$$

Temos o caso limite em que  $w$  é infinitesimal. Se  $w$  é realmente infinito, está claro que  $v$  são praticamente iguais. Neste caso,  $m_w \rightarrow m_0$  e  $m_v \rightarrow m_u$ . O resultado será

$$m^u = \frac{m_0}{\sqrt{1-u^2/c^2}} \quad (4.10)$$

Se a equação (4.9) realmente é verdadeira para valores arbitrários de  $w$ , supondo que a equação (4.10) seja a fórmula correta para a massa, observe que a velocidade  $v$  necessária na equação (4.9) pode ser calculada com base no triângulo retângulo:

$$v^2 = u^2 + w^2(1-u^2/c^2)$$

Agora, aceitamos que o momento é conservado e que a massa depende da velocidade de acordo com (4.10).

Imaginemos que um objeto composto possui uma massa desconhecida  $M$ . O objeto 1 move-se com um componente ascendente de velocidade  $u$  e um componente horizontal que é praticamente igual a  $w$ , e o mesmo ocorre com um segundo objeto. Após a colisão temos a massa  $M$  movendo-se para cima com velocidade  $u$ , considerada muito pequena comparada com a velocidade da luz, e também pequena comparada com  $w$ . o momento deve ser conservado; assim vamos estimar o momento na direção ascendente antes e após a colisão. Antes da colisão, temos  $p \sim 2m_w u$ , e, após a colisão, o momento é  $p' = M u$ , mas  $M u$  é essencialmente o mesmo que  $M_0 u$ , porque  $u$  é pequeno demais. Esses momentos precisam ser iguais devido à conservação do momento, e, portanto

$$M_0 = 2m_w \quad (4.11)$$

*A massa do objeto que se forma quando dois objetos colidem deve ser o dobro da massa dos objetos que se reúnem.*

## ENERGIA RELATIVÍSTICA

Com resultado da dependência da massa em relação à velocidade e das leis de Newton, as variações na energia cinética de um objeto, resultantes do trabalho total realizado pelas forças sobre ele, sempre resultam em

$$\Delta T = (m_u - m_0) c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} - m_0 c^2 \quad (4.12)$$

Embora pudéssemos de início esperar que a massa  $M$  seja  $2m_0$ , descobrimos que ela não é  $2m_0$ , mas  $2m_w$ . Como  $2m_w$  é o que é introduzido, mas  $2m_0$  são as massas de repouso das coisas lá dentro, a massa em excesso do objeto composto é igual à energia cinética inserida. Isto significa que a energia possui inércia.

Quando a massa em movimento à velocidade  $v$  é a massa  $m_0$  em repouso dividida por  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , surpreendentemente, é raramente usada. Já as seguintes relações são facilmente provadas e se revelam bem úteis:

$$E^2 = P^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (4.13)$$

$$Pc = \frac{Ev}{c} \quad (4.14)$$

### *j.* ESPAÇO-TEMPO

## A GEOMETRIA DO ESPAÇO-TEMPO

Para que entendamos as relações entre espaço e tempo implícitas na transformação de Lorentz, precisamos aprofundar nosso estudo nesta questão.

A transformação de Lorentz entre as posições e tempos  $(x, y, z, t)$  medidos por um observador “em repouso”, e as coordenadas e tempo correspondentes  $(x', y', z', t')$  medidos dentro de uma espaçonave “em movimento”, deslocando-se com velocidade  $u$ , são

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Comparemos estas equações com a equação (1.5), que também relaciona medidas em dois sistemas, um dos quais, neste caso, foi girado em relação ao outro:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \theta + y \operatorname{sen} \theta \\ y' &= y \cos \theta - x \operatorname{sen} \theta \\ z' &= z \end{aligned} \quad (5.2)$$

Nos dois casos, observamos que as quantidades “com linhas” são “misturas” das “sem linhas”: o  $x'$  novo é uma mistura de  $x$  e  $y$ , e o  $y'$  novo é também uma mistura de  $x$  e  $y$ .



Se fosse impossível nos vermos, e víssemos sempre um dado objeto na mesma posição, então tudo seria irrelevante: veríamos sempre a largura “verdadeira” e a profundidade “verdadeira”, e elas pareceriam ter qualidades bem diferentes, porque uma aparece como um ângulo óptico subtendido e a outra envolve certa focalização dos olhos ou mesmo intuição. Elas pareceriam coisas bem diferentes e nunca seriam confundidas. É porque conseguimos andar em volta que percebemos que a profundidade e a largura são, de algum modo, apenas dois aspectos diferentes da mesma coisa.

*Não poderíamos olhar para as transformações de Lorentz da mesma maneira?* Aqui também temos uma mistura: de posições e do tempo. Uma diferença entre uma medida espacial e uma medida temporal produz uma nova medida espacial. Em outras palavras, nas medidas espaciais de uma pessoa está misturado um pouquinho do tempo, como visto pelo outro.

## INTERVALOS NO ESPAÇO-TEMPO

Para demonstrar o espaço-tempo temos algo que permanece igual à combinação  $c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2$  e é a mesma antes e após a transformação:

$$c^2t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2 \quad (5.3)$$

Esta grandeza é, portanto, algo que, assim como a distância, é “real” em certo sentido; ela é chamada de intervalo entre dois pontos no espaço-tempo, um dos quais está nesse caso, na origem. Damos um nome diferente, pois está numa geometria diferente, mas o interessante é apenas que alguns sinais estão invertidos e existe um c nela.

Nas equações (5.1) e (5.3) a natureza está nos dizendo que tempo e espaço são equivalentes; o tempo transforma-se em espaço; eles deveriam ser medidos com as mesmas unidades. Assim, descobrimos com base em (5.3) que distância de um “segundo” é  $3 \times 10^8$  metros, ou seja, é a distância que a luz percorreria em um segundo. Em outras palavras, se fossemos medir todas as distâncias e tempos nas mesmas unidades, segundos, nossa unidade de distância seria  $3 \times 10^8$  metros, e as equações seriam mais simples. Outra maneira de tornar as unidades iguais é medir o tempo em metros. Um metro de tempo é o tempo que a luz leva para percorrer um metro, sendo, portanto  $1/3 \times 10^8$  s, ou 3,3 bilionésimos de segundo. Gostaríamos, em outras palavras, de colocar todas as nossas equações em um sistema de unidades em que  $c=1$ . Se o tempo e espaço são medidos nas mesmas unidades, como sugerido, as equações ficam bem mais simples. Elas são:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t - ux}{\sqrt{1 - u^2}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$t'^2 - x'^2 - y'^2 - z'^2 = t^2 - x^2 - y^2 - z^2 \quad (5.5)$$

De acordo com a fórmula (5.5), se considerarmos um ponto que, em um dado sistema de coordenadas, possuía tempo zero e somente espaço, então o quadrado do intervalo seria negativo e teríamos um intervalo imaginário, a raiz quadrada de um

número negativo. Os intervalos podem ser reais ou imaginários na teoria. O quadrado de um intervalo pode ser positivo ou negativo, ao contrário da distância, que possui um quadrado positivo. Quando um intervalo é imaginário, dizemos que os dois pontos possuem um *intervalo do tipo espaço* entre eles, porque o intervalo se assemelha mais ao espaço do que ao tempo. Por outro lado, se depois objetos estão no mesmo lugar em um dado sistema de coordenadas, mas diferem somente no tempo, o quadrado do tempo é positivo e as distâncias são zero, e o quadrado do intervalo é positivo. Trata-se de um *intervalo tipo tempo*.

## PASSADO, PRESENTE E FUTURO

A região do espaço-tempo em torno de um dado ponto no espaço-tempo pode ser separada em três regiões, como mostra a figura 5-. Em uma região, temos intervalos tipo espaço, e em duas regiões, tipo tempo. Um objeto físico ou um sinal pode ir de um ponto na região 2 até o evento O, movendo-se com velocidade inferior à da luz. Os eventos nessa região podem afetar o ponto O, podem ter uma influência sobre ele a partir do passado. Um objeto em P no eixo t está precisamente no “passado” com relação a O; é o mesmo ponto espacial que O, apenas mais cedo. O que aconteceu ali então afeta O agora. Outro objeto em Q pode ir até O, movendo-se com certa velocidade inferior a c, de modo que, se este objeto estivesse numa espaçonave e se movendo, ela seria, novamente, o passado do mesmo ponto espacial. Em outro sistema de coordenadas, o eixo do tempo poderia passar por O e Q. todos os pontos da região 2 estão no “passado” de O. A região 2 é às vezes chamada o *passado afetante*; é o lugar geométrico de todos os eventos capazes de afetar o ponto O de alguma maneira.

A região 3, é uma região que podemos afetar a partir de O: podemos “atingir” coisas atirando “balas” a velocidade inferior a c; este é o mundo cujo futuro pode ser afetado por nós, e podemos chamá-lo de *futuro afetante*. A respeito de todo o resto do espaço-tempo, a região 1, é que não podemos afetá-lo agora a partir de O, tampouco ele pode nos afetar agora em O, porque nada pode ultrapassar a velocidade da luz. Claro o que acontece em R pode nos afetar mais tarde, ou seja, se o Sol está explodindo “neste momento”, decorrerão oito minutos até que saibamos, e ele não pode nos afetar antes disto.

## MAIS SOBRE QUADRIVETORES

Mostraremos agora que realmente existe pelo menos uma dessas coisas: *as três componentes do momento, a energia como a componente temporal, transformam-se juntas* para constituir o que denominamos um “quadri-vetor”. Para demonstrar isso, utilizaremos o mesmo artifício com as unidades de energia, massa e momento que usamos na equação (5.4). As nossas equações para energia e momento são

$$\begin{aligned} E &= m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2}} \\ \mathbf{p} &= m\mathbf{v} = \frac{m_0\mathbf{v}}{\sqrt{1-v^2}} \end{aligned} \tag{5.6}$$

Também nestas unidades temos

$$E^2 - p^2 = m_0^2 \tag{5.7}$$

Se medirmos a energia em elétrons-Volts, a massa de um elétron-Volt significa a massa cuja energia de repouso é um elétron-volt, ou seja,  $m_0c^2$  equivale a um elétron-Volt. A energia de repouso de um elétron é  $0,511 \times 10^6$  eV.

A velocidade vista da espaçonave,  $v'$  é a velocidade composta, a “diferença” entre  $v$  e  $u$ . Pela lei q u e obtivemos antes,

$$v' = \frac{v - u}{1 - uv} \quad (5.8)$$

Agora calcularemos a energia nova  $E'$ , a energia vista pelo sujeito na espaçonave. Ele usaria a mesma massa de repouso, mas usaria  $v'$  para a velocidade. O que temos de fazer é elevar  $v'$  ao quadrado, subtraí-lo de um, extrair a raiz quadrada e calcular a recíproca:

$$\begin{aligned} v'^2 &= \frac{v^2 - 2uv + u^2}{1 - 2uv + u^2v^2} \\ 1 - v'^2 &= \frac{1 - 2uv + u^2v^2 - v^2 + 2uv - u^2}{1 - 2uv + u^2v^2} \\ &= \frac{1 - v^2 - u^2 + u^2v^2}{1 - 2uv + u^2v^2} \\ &= \frac{1 - 2uv + u^2v^2}{(1 - v^2)(1 - u^2)} \\ &= \frac{1 - uv}{(1 - uv)^2} \end{aligned}$$

Portanto

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v'^2}} = \frac{1 - uv}{\sqrt{1 - v^2}\sqrt{1 - u^2}} \quad (5.9)$$

A energia  $E'$  é, então, simplesmente  $m_0$  vezes a expressão acima. Mas queremos expressar a energia em termos da energia e do momento sem linhas, e observamos que:

$$E' = \frac{m_0 - m_0uv}{\sqrt{1 - v^2}\sqrt{1 - u^2}} = \frac{(m_0/\sqrt{1 - v^2}) - (m_0/\sqrt{1 - v^2})u}{\sqrt{1 - u^2}}$$

Ou

$$E' = \frac{E - up_x}{\sqrt{1 - u^2}} \quad (5.10)$$

Que reconhecemos como tendo exatamente a mesma forma de:

$$t' = \frac{t - ux}{\sqrt{1 - u^2}}$$

Em seguida precisamos encontrar o momento novo  $p'_x$ . ele é exatamente a energia  $E$  vezes  $v'$ , e também é simplesmente expresso em termos de  $E$  e  $p$ :

$$p'_x = E'v' = \frac{m_0(1 - uv)}{\sqrt{1 - v^2}\sqrt{1 - u^2}} \frac{v - u}{1 - uv} = \frac{m_0v - m_0u}{\sqrt{1 - v^2}\sqrt{1 - u^2}}$$

Deste modo

$$p'_x = \frac{p_x - uE}{\sqrt{1 - u^2}} \quad (5.11)$$

Que reconhecemos como tendo precisamente a mesma forma de

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2}}$$

Assim, as transformações para energia e o momento novos em termos da energia e do momento velhos são exatamente as mesmas transformações para  $t'$  em termos de  $t$

e  $x$ , e  $x'$  em termos de  $x$  e  $t$ : tudo que temos a fazer é, cada vez que vemos  $t$  em (5.4), substituir por  $E$ , e cada vez que vemos  $x$ , substituir  $P_x$ , e então as equações (5.4) se tornarão iguais às equações (5.10) e (5.11). Isto implicaria, se tudo funcionar corretamente, uma regra adicional de que  $P'_y = P_y$  e  $P'_z = P_z$ . A transformação completa, então é:

$$\begin{aligned} p'_x &= \frac{p_x - uE}{\sqrt{1 - u^2}} \\ p'_y &= p_y \\ p'_z &= p_z \\ E' &= \frac{E - up_x}{\sqrt{1 - u^2}} \end{aligned} \tag{5.12}$$

Nessas transformações, portanto, descobrimos quatro grandezas que se transformam como  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $t$ , que denominamos o *quadrivetor momento*.

### k. ESPAÇO CURVO

## NOSSO ESPAÇO É CURVO

Einstein disse que o espaço é curvo e que a matéria é a origem da curvatura. A regra que Einstein forneceu para a curvatura é esta: se existe uma região do espaço com matéria dentro e tomamos uma esfera suficientemente pequena para que a densidade  $\rho$  da matéria dentro dela seja efetivamente constante, o *raio excessivo* para a esfera é proporcional à massa dentro da esfera. Usando a definição de raio excessivo, temos

$$\text{Raio excessivo} = \sqrt{\frac{A}{4\pi}} - r_{med} = \frac{G}{3c^2} M \tag{6.3}$$

Aqui,  $G$  é a constante gravitacional (da teoria newtoniana),  $c$  é a velocidade da luz e  $M = 4\pi\rho r^3/3$  é a massa da matéria dentro da esfera. Esta é a lei de Einstein para a curvatura média do espaço.

## A GEOMETRIA NO ESPAÇO-TEMPO

Vimos na teoria da relatividade restrita que medidas de espaço e medidas de tempo estão inter-relacionadas. E seria um absurdo algo acontecer ao espaço sem que o tempo estivesse envolvido. A medida do tempo depende da velocidade com que você se desloca.

Então, chegamos à conclusão de que podemos usar a ideia para definir “uma linha reta” no espaço-tempo. O equivalente a uma linha reta no espaço é, para o espaço-tempo, um *movimento* em velocidade uniforme e com direção constante.

A curva de menor distância no espaço corresponde, no espaço-tempo, não ao percurso de menor tempo, mas àquele de *máximo* tempo, devido às coisas estranhas que acontecem com os sinais dos termos em relatividade. O movimento em “linha reta” – o equivalente à “velocidade uniforme ao longo de uma linha reta” – é, então, aquele que conduz um relógio de um lugar, em certo tempo, para outro lugar em outro tempo, de modo que o tempo marcado seja o mais longo possível. Esta será nossa definição do equivalente a uma linha reta no espaço-tempo.

## A GRAVIDADE E O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA

O princípio da equivalência de Einstein apresenta a ideia de que, quando algo está em queda livre, tudo lá dentro parece sem preso. Isto depende do fato de que todos os objetos caem com exatamente a mesma aceleração, qualquer que seja a sua massa ou constituição. Por exemplo, se temos uma espaçonave que está “flanando” – de modo que em queda livre – e existe um homem lá dentro, as leis que governam a queda do homem e da nave são as mesmas. Desta maneira, se ele se colocar no meio da nave, permanecerá ali. Ele não cai em *relação à nave*. É isto que queremos demonstrar quando dizemos que ele está “sem peso”.

Segundo Einstein, dentro de uma espaçonave, de acordo com o princípio da equivalência, não há como saber se você está parado na Terra ou acelerando no espaço livre, pois você só faz medidas do que acontece com as coisas lá dentro. Isto é verdade apenas para um ponto dentro da nave. O campo gravitacional da Terra não é precisamente uniforme, de modo que uma bola em queda livre possui uma aceleração ligeiramente diferente em diferentes lugares: a direção e a magnitude mudam. Porém se imaginarmos um campo gravitacional estritamente uniforme, ele será totalmente imitado, em todos os aspectos, por um sistema com aceleração constante. Esta é a base do princípio da equivalência.

## A TAXA DE BATIMENTO DOS RELÓGIOS NUM CAMPO GRAVITACIONAL

Suponhamos que colocamos um relógio na “ponta” de um foguete – ou seja, na extremidade dianteira -, e colocamos outro relógio idêntico na traseira. Chamemos os dois relógios A e B. se compararmos esses dois relógios quando a nave estiver acelerando, o relógio da ponta parecerá bater mais rápido em relação ao da traseira.

Agora imaginemos o foguete em repouso na gravidade da Terra. *A mesma coisa acontece*. Se você estiver no chão com um relógio e observar um outro relógio sobre uma estante no alto, este parecerá bater mais rápido do que aquele no chão. Mas isto está errado. Os tempos deveriam ser os mesmos. Sem aceleração, não há motivo para os relógios parecerem fora de sincronia.

Einstein propôs que relógios, em diferentes lugares em um campo gravitacional, devem parecer funcionar em ritmos diferentes. Mas se um sempre parece estar funcionando em uma taxa de batimento diferente em relação ao outro, então, no que diz respeito ao primeiro, o outro está funcionando a uma taxa diferente.

A ideia de tempo pode variar de um lugar para outro, é uma ideia difícil, mas é a ideia que Einstein usou, e está correta.

Usando o princípio da equivalência, podemos descobrir quanto a taxa de batimento de um relógio muda com a altura em um campo gravitacional. Simplesmente calculamos a discrepância aparente entre os dois relógios no foguete em aceleração. Se  $v$  é a velocidade *relativa* de uma origem e um receptor, a frequência *recebida*  $\omega$  está relacionada à frequência emitida  $\omega_0$  por

$$\omega = \omega_0 \frac{1 + v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (6.4)$$

O emissor e o receptor estão se movendo com velocidades iguais em qualquer dado instante. Porém no tempo decorrido para o sinal luminoso ir do relógio A ao relógio B, a nave acelerou. Quando os sinais chegam a B, a nave aumentou a velocidade

em  $gH/c$ ; o receptor tem sempre esta velocidade em *relação ao emissor* no instante em que o sinal o deixou. Assim para os dois relógios na espaçonave, temos a relação:

$$(\text{taxa no receptor}) = (\text{taxa de emissão}) \left(1 + \frac{gH}{c^2}\right)$$

onde  $H$  é a altura do emissor sobre o receptor.

Com base no princípio da equivalência, o mesmo resultado deve se aplicar a dois relógios separados pela altura  $H$ , em um campo gravitacional com a aceleração de queda livre  $g$ . Uma ideia que decorre de outra lei da física: da conservação da energia.

Nossas ideias sobre relatividade, física e quântica e conservação da energia se encaixarão mutuamente apenas se as previsões de Einstein sobre relógios em um campo gravitacional estiverem certas. Por exemplo, para uma diferença de altitude de 20 metros na superfície da Terra, a diferença de frequência é de apenas duas partes em  $10^{15}$ . Entretanto, esta mudança foi recentemente encontrada por meio de experiências usando o efeito de Mössbauer. Einstein estava totalmente certo.

## A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

O tempo avança em diferentes ritmos em diferentes lugares; isto significa que o espaço-tempo é *curvo*.

Traçando um gráfico de altura  $H$  versus  $t$  como na **figura 6-18(a)**. Para formar a base de nosso retângulo, tomamos um objeto que está em *repouso* na altura  $H$ , e seguimos sua linha de universo por 10 segundos. Obtemos a linha  $BD$  na parte (b) da figura, que é paralelo ao eixo  $t$ . Tomemos outro objeto que está 100 metros acima do primeiro em  $t=0$ . Ele começa no ponto  $A$  na figura 6-18 (c). seguimos essa linha de universo por 100 segundos com forme medida por um relógio em  $A$ . o objeto vai de  $A$  a  $C$ , como mostrado na parte (d) da figura. Observe como o tempo Avança em taxas diferentes nas duas alturas (estamos supondo que existe um campo gravitacional), os dois pontos  $C$  e  $D$  não são simultâneos. Se tentarmos completar o quadrado traçando uma linha até o ponto  $C'$ , que está 100 metros acima de  $D$  no mesmo tempo, como na figura -18(e), as peças não se encaixam. É isto que temos em mente quando dizemos que o espaço-tempo é curvo.

## O MOVIMENTO NO ESPAÇO-CURVO

A lei do movimento no capo gravitacional é enunciada da seguinte maneira: *um objeto sempre se desloca de um lugar para outro de modo que um relógio que ele carrega marca um tempo maior do que marcaria em qualquer outra trajetória possível, com as mesmas condições iniciais e finais. O tempo medido por um relógio em movimento é, muitas vezes, chamado seu "tempo próprio". Na queda livre, a trajetória maximiza o tempo próprio de um objeto.*

Vejamos como isto funciona. A taxa excessiva do relógio em movimento é:

$$\frac{\omega_0 gH}{c^2} \tag{6.13}$$

e a variação na taxa de nosso relógio é:

$$-\omega_0 \frac{v^2}{2c^2} \tag{6.14}$$

Combinamos os dois tempos em (6.13) e (6.14), obtemos:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{c^2} \left( gH - \frac{v^2}{2} \right) \quad (6.15)$$

Tal desvio de frequência de nosso relógio em movimento implica que, se medirmos um tempo  $dt$  em um relógio fixo, o relógio em movimento registrará o tempo

$$dt \left[ 1 + \left( \frac{gH}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} \right) \right] \quad (6.16)$$

O excesso de tempo total sobre a trajetória é a integral do termo extra em relação ao tempo

$$\frac{1}{c^2} \int \left( gh - \frac{v^2}{2} \right) dt \quad (6.17)$$

O termo  $gH$  é simplesmente o potencial gravitacional  $\Phi$ . Suponhamos que multiplicamos a coisa toda por um fator constante  $-mc^2$ , em que  $m$  é a massa do objeto. A constante não mudará a condição do máximo, mas o sinal menos simplesmente transformará o máximo num mínimo. A equação (6.16) então diz que o objeto se moverá de forma que

$$\int \left( \frac{mv^2}{2} - m\Phi \right) dt = \text{um mínimo} \quad (6.18)$$

Agora, o integrando é apenas a energia a diferença entre as energias cinética e potencial.

## A TEORIA DA GRAVITAÇÃO DE EINSTEIN

A lei da gravitação pode ser formulada em termos das ideias da geometria do espaço-tempo desta forma notável: as partículas sempre tomam o tempo próprio mais longo, no espaço-tempo, uma quantidade análoga à “distância mais curta”. Esta é a lei do movimento em um campo gravitacional. A lei não depende de quaisquer coordenadas ou qualquer outro modo de definir a situação, se colocada nestes termos.

Sintetizemos o que fizemos. Demos a você duas leis para a gravidade:

- f) Como a geometria do espaço-tempo muda quando a matéria está presente – isto é, a curvatura expressa em termos do raio excessivo é proporcional à massa dentro da esfera, equação (6.3).
- g) Como os objetos se movem se existem apenas forças gravitacionais, os objetos se movem de modo que seu tempo próprio entre duas condições de extremo (inicial e final) é um máximo.

Originalmente, descrevemos o movimento num campo gravitacional em termos da lei da gravitação do inverso do quadrado da distância de Newton e de suas leis do movimento.

Agora as leis (1) e (2) as substituem. Elas também correspondem ao que vimos na eletrodinâmica.

Nas leis (1) e (2) você tem um enunciado preciso da teoria da gravitação de Einstein, embora normalmente você a encontre enunciada em uma forma matemática mais complicada.



Porém, devemos fazer mais um acréscimo. Assim como as escalas de tempo mudam de um lugar para outro em um campo gravitacional, as escalas de comprimento também mudam. É impossível algo acontecer com o tempo sem que se reflita, de algum modo, no espaço.

A lei (1) deve ser verdadeira em qualquer sistema que se move é uma das grandes leis da gravitação – denominada *equação de campo de Einstein*. A outra grande lei (2) é que as coisas devem se mover de modo que o tempo próprio seja um máximo – e chama-se *equação de movimento de Einstein*.

**10. FRIAÇA, Amâncio (Org.). *Astronomia: uma visão geral do universo*. São Paulo: EDUSP, 2002.**

Este livro foi elaborado a partir de textos inicialmente preparados para o curso de extensão universitária (Astronomia: uma visão geral) oferecido pelo Departamento de Astronomia do Instituto Astronômico e Geofísico da USP e direcionado especificamente a professores do ensino secundário (ensino médio), objetivando oferecer-lhes uma visão geral e correta dos conceitos fundamentais dessa área da ciência. Evitou-se, nesse livro, tanto quanto possível, a abordagem matemática.

## **1. O Nosso Universo**

O primeiro capítulo leva o leitor a um rápido passeio pelo Universo. Começa pelo sistema Solar e vai até os aglomerados de galáxias e o Universo. O astro mais próximo é a Lua, com uma distância média de 384.000 Km, já o Sol está a 146 milhões de Km — a distância média entre a Terra e o Sol é chamada de Unidade Astronômica (UA). Das estrelas mais próximas, a uns 4 anos luz, está a Alfa Centauri e, nos afastando do Sol 4,3 anos luz, encontramos a nossa galáxia, denominada Via Láctea, com forma predominantemente achatada e formando um disco de 100.000 anos luz.

A nossa galáxia não está só. Há um grupo local, com trinta ou mais galáxias (algumas elípticas). O mais dramático nos núcleos ativos das galáxias são os

quasares, cerca de 1000 vezes mais brilhantes que a galáxia em que se situam. As evidências apontam para a existência de um buraco negro no seu centro. Assim, após o Big Bang, os aglomerados de galáxias foram distribuídos pelo Universo, deixando vazios semelhantes aos buracos de esponja e, como as observações das microondas da radiação proveniente do Big Bang mostram, o Universo como todo tem a geometria euclidiana, ou seja, o Universo é plano, como a nossa experiência diária. Isto significa que ele tem exatamente a densidade de energia necessária para continuar se expandindo indefinidamente, ou melhor, para parar de se expandir somente após um tempo infinito. A matéria barônica é capaz de fornecer 35% desta energia. Acredita-se que os 65% restantes sejam provenientes de alguma forma escura, já sugerida por Einstein, chamada de constante cosmológica.



## **2. As Ferramentas do Astrônomo**

Não conhecemos o Universo e as ferramentas do astrônomo resumem-se à natureza da luz, aos telescópios, às imagens e fotometria, à espectroscopia. Mergulhando em emulsões de espectros estelares e analisando linhas de emissão superpostas, o espectro contínuo esforça-se para desvendar os mistérios do Universo.

## **3. A Astronomia Clássica**

A astronomia clássica fez as primeiras medidas do céu há mais de 3000 a.C, passando pela Antiguidade pré-helênica, pelo Egito e suas pirâmides e pela Grécia antiga, onde desfilam os estudos de Thales, Pitágoras, Aristarco de Samos, Eratóstenes, Hiparco, Ptolomeu e Heraclides. A Antiguidade extingui a visão heliocêntrica do Universo de Copérnico (1543), que, em seu tratado *De Revolutionibus*, propõe um modelo simples do sistema Solar, com o Sol no centro do sistema (até então inconcebível).

Kepler, em 1609, enuncia as leis que descrevem o movimento dos planetas ao redor do Sol. Galileu, com a ajuda de sua luneta astronômica/descobre o relevo lunar, os quatro principais satélites de Júpiter, as manchas do Sol, identifica a estrela dupla Mizar e, entre outros, enuncia o princípio da inércia. A astronomia caminha a largos passos: Rômer, Newton, Bradley, Herschel, Bessel e Foucault (que em 1852, através de um pêndulo, prova o movimento de rotação a Terra). Os estudos continuam e o movimento aparente dos corpos celestes é constatado. A própria Terra tem movimentos incomuns, rotação, translação, precessão e rotação galáctica. As fases da lua e os meses e as coordenadas da esfera celeste ajudam a compreender as estações do ano com os solstícios (22 de Junho e 22 de Dezembro) e os equinócios (21 de março e 23 de Setembro). Também podemos entender o Círculo Ártico a  $66,5^{\circ}\text{N}$ , o Trópico de Câncer a  $23,5^{\circ}\text{N}$ , o Equador a  $0^{\circ}$ , o Trópico de Capricórnio e o Círculo Antártico a  $66,5^{\circ}\text{S}$ . O homem, numa tentativa de capturar o tempo, cria os calendários a partir da definição de intervalos característicos.

Os eclipses, fenômenos que envolvem as posições relativas do Sol, da Lua e da Terra, podem ser: solar total, solar parcial, solar anular, eclipse umbral total, lunar umbral parcial, penumbra total ou penumbra parcial.

## **4. A Mecânica Celeste**

A mecânica celeste é a ciência que estuda o movimento dos corpos celestes a partir da lei da gravitação, fundada por Newton. A cinemática celeste pré-newtoniana estabelece algumas leis:

1ª lei (das órbitas elípticas): os planetas movem-se em elipses focadas no Sol; 2ª lei (das áreas): os planetas movem-se com velocidade areolar heliocêntrica constante (momento angular);

3ª lei (harmônica): a relação entre os cubos dos eixos maiores das elipses e os quadrados dos períodos dos movimentos planetários é igual para todos os planetas.

Tem-se, ainda, a lei da gravitação universal (1687), onde a matéria atrai matéria na razão direta das massas e inversa do quadrado das distâncias:

$$|f| = \frac{G \cdot M_1 \cdot M_2}{r^2}$$

A mecânica celeste, depois de Einstein, começou com a teoria da relatividade geral e a mecânica do sistema Solar — composta pelo Sol, planetas, luas, asteróides, cometas, meteoróides, que passaram a ser medidos com precisão, corrigindo-se desvios de cálculos anteriores. A mecânica celeste não está limitada ao nosso sistema Solar e ajuda o estudo do movimento relativo de duas estrelas. Podemos saber qual a relação entre as duas massas através da equação  $M_2 = \frac{L}{U}$  e, quando o número de estrelas é grande, técnicas específicas de mecânica estatística clássica entram em ação ( $M_2 r^2$ ).

Hoje, já sabemos que todos os movimentos celestes são caóticos em algum grau. Portanto, uma das características do caos é a imprevisibilidade de um evento, nesta teoria.

## 5. O Sol

O Sol é uma estrela da sequência principal, do tipo espectral G2, e a distância dele para a Terra é de uma UA = 149.597.870 ± 2Km Massa do Sol:  $1M_{\odot} = 1,9891 \pm 70,0012 \times 10^30$  ton

O diâmetro angular do disco do Sol, na luz branca, é de 32,0' ± 0,1", quando medido da Terra, a 1UA do Sol.

Luminosidade é sinônimo de potência  $L_{\odot} = 3,845 \pm 0,006 \times 10^{26}$  KW. Constante Solar:  $1,367 \pm 0,002$  W/m<sup>2</sup> que, a rigor, não é uma constante. Temperatura: 5777 ± 2,5K na superfície do Sol, na luz branca. Rotação: 24,7 dias (período sideral).

A estrutura interna do Sol vem sendo investigada, principalmente através da teoria da evolução e estrutura estelar.

Com as reações nucleares na região central, abrangendo 3/10R?, ocorrem as reações de fusão.

A camada radioativa é o fenômeno que faz a temperatura decrescer de dentro para fora. A difusão de fótons para fora é maior do que para dentro, dando lugar a um fluxo radioativo líquido para fora, enquanto a matéria mesma permanece estática.

Envelope conectivo, o problema dos neutrinos Solares, é o nome dado à contradição teórica e às medidas efetuadas que constatarem que o fluxo é de apenas

1/3 do esperado (ainda em questão, não resolvido).

Um novo ramo da astrofísica, Hélio Sismologia, estuda as oscilações da superfície Solar.

A atmosfera do Sol é composta de fotosfera (esfera de luz), granulações solares, obscurecimento do limbo, linhas de Fraunhofer e cromosfera-coroa. Logo acima da cromosfera, existe uma camada com apenas dezenas de milhares de quilômetros de espessura, onde a temperatura rapidamente sobe de 25.000K para 2 milhões K. A esta região dá-se o nome de transição cromosfera-coroa. Seu diagnóstico é feito através de ondas de rádio e de linhas emitidas no ultravioleta. A coroa Solar é a parte mais externa da atmosfera Solar, composta de coroa K, E e F.

Os principais constituintes do vento Solar são os elétrons e prótons, as partículas alfa, e sua característica marcante é a sua inhomogeneidade espacial e variabilidade temporal.

Entre as manchas e as erupções Solares está o campo magnético. A teoria que pode explicar o comportamento cíclico do campo magnético do Sol é a teoria do dínamo.

## **6. O Sistema Solar**

O sistema Solar é constituído de Sol, planetas, satélites, asteróides, meteoróides, cometas e poeira zodiacal. Um planeta possui propriedades físicas relevantes — massa (M), raio equatorial (R), densidade média ( $\rho$ ), abertura visual (A), período sideral de rotação (Ps) e fator do momento de inércia (K). A estrutura interna de um planeta passa pela compreensão da densidade média, do momento de inércia, do equilíbrio hidrostático, da superfície, da atividade geológica, da erosão e das crateras.

O estudo da atmosfera de um planeta conduz à compreensão de: retenção e perda (gases); composição química; atmosfera primitiva e secundária (é uma distinção entre a atmosfera adquirida diretamente da nebulosa Solar primitiva e as alterações químicas ao longo do tempo); estrutura da atmosfera; efeito estufa; circulação da atmosfera; e magnetosferas planetárias, que aprisionam cargas elétricas e partículas de alta energia, cujo funcionamento pode ser explicado pela teoria do dínamo.

A importância dos asteróides está no estudo da formação do sistema Solar. Os cometas — se for correta a hipótese de que os cometas se formaram juntamente com os demais corpos do sistema Solar — constituem as relíquias mais preciosas, que mantêm intactas as informações sobre as condições físicas e químicas da formação do sistema Solar e que podem elucidar também algumas questões sobre a origem da vida.

Os meteoritos são restos de cometas ou fragmentos de asteróides, classificados em rochosos, ferrosos e rochosos-ferrosos. Cabe observar que os rochosos, por sua vez, se subdividem em acondritos e condritos.

Os meteoros são efêmeros traços luminosos, produzidos pelo atrito de fragmentos cósmicos que penetram a atmosfera terrestre.

A poeira zodiacal é uma nuvem (que mede de 1 a 10 micra) de grãos acumulados no plano da eclíptica e que se manifesta através da reflexão da luz Solar, dando origem à luz zodiacal.

A formação do sistema Solar passa pela teoria cosmogônica celeste e sua formação. A proposta que vem se firmando cada vez mais é a da nebulosa Solar primitiva (NSP), primeiramente proposta por Laplace, em 1796, onde os planetas seriam subprodutos da formação do Sol e todo o sistema Solar teria se formado da matéria interestelar.

### **13. Cosmologia**

A evolução do conceito de universo iniciou-se, na Antiguidade, por mitos, passando por Copérnico, no século XVI, por Galileu, por Kant e pelos modelos dentro dos parâmetros físicos relativísticos: o universo de Einstein, o universo de De Sitter, o universo de Friedmann, os universos de Friedman-Lemaître; o conceito de Big Bang e a proposta para explicar as características físicas das galáxias, cujas origens devem estar nos processos físicos que ocorreram no primeiro segundo após o Big Bang; o modelo inflacionário.

A teoria do Big Bang está baseada nos grandes esforços teóricos e experimentais, feitos pelos físicos, com o objetivo de obter uma expressão unificada para as quatro forças que existem na natureza: a força gravitacional, a força eletromagnética, a força nuclear forte e a força nuclear fraca.

O estudo da estrutura em larga escala e da evolução do universo é uma matéria interdisciplinar que junta esforços à física das partículas elementares, às teorias de campos unificados de forças, à astrofísica feita com grandes telescópios, às modernas técnicas de imageamento e à modelagem numérica feita nos melhores computadores existentes.

11. GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA. Física. São Paulo: EDUSP, 2001/2005. v. 1, 2 e 3.

## **Física 1: Mecânica.**

Trata-se de um livro para professores de física, substancialmente escrito a partir de experiências nas condições regulares da rede Pública do Estado de São Paulo. A meta do livro é tornar significativo o aprendizado científico a todos os alunos, tanto para sua cultura quanto para a possível carreira universitária. O presente estudo deu-se a partir de assuntos e conceitos conhecidos, como o toca-discos, uma coisa mecânica, e a ignição do automóvel, uma coisa elétrica. A mecânica teve sua ordem alterada e a cinemática tornou-se último assunto a ser estudado, por ser a Dinâmica mais próxima dos alunos.

### **Mecânica: Abertura e Plano de Curso**

Trata-se de um levantamento e classificação de coisas que os alunos relacionam ao tema Mecânica. É apresentada uma tabela geral de coisas mecânicas, de translação, rotação, equilíbrio, ampliação de forças e outras variedades mecânicas. Associados a cada elemento, estão os conceitos formais, como o do jogo de bilhar: conservação da quantidade de movimento linear no sistema.

## **PARTE 1**

### **Movimento: Conservação e Variação**

A primeira ponte entre o conhecimento informal do aluno e o conceito físico é levantada ao observar-se, junto com o aluno, uma estrutura que se repete em cada um dos itens: o choque entre dois objetos dá indícios de que ocorre uma troca ou intercâmbio de algo associado ao movimento, uma grandeza; o choque das bolinhas de gude; o choque das bolas de bilhar; o ponta pé na bola de futebol, caracterizando a quantidade do movimento linear ( $Q$ ) interpretada como a variação por unidade de

tempo, da quantidade de movimento de um objeto do sistema. Porém outros eventos dão indícios de que o início de um movimento está sempre acoplado ao de outro. Nadar ou remar é empurrar a água para trás. Ainda resta analisar os foguetes que empurram o gás para trás ou os canhões que, atirando balas para frente, são empurrados para trás. Podemos concluir esta análise preliminar dizendo que, nas situações em que o início do movimento de um objeto depende da interação com o outro já em movimento, há intercâmbio de algo entre eles. Nos casos em que um movimento surge acoplado a outro, quando ambos os objetos estavam inicialmente parados, este algo aparece simultaneamente nos dois objetos, que passam a se movimentar em sentidos opostos, como se o aparecimento de um movimento buscasse compensar o outro. O presente algo é a QUANTIDADE DE MOVIMENTO que procura se conservar e que não varia. O caráter vetorial e a expressão matemática da quantidade de movimento e de sua conservação são analisados a partir da reflexão da bola de gude e do carro, em diferentes situações. Se associarmos aos corpos uma quantidade de movimento, podemos afirmar com certeza que, para uma certa velocidade, a quantidade de movimento é maior para massas maiores. Em um jogo de bolinhas de gude, ao atirmos com uma bola de aço, após a colisão com a bola de vidro, ambas avançarão no mesmo sentido, embora com velocidades diferentes. A colisão de um ônibus com um muro, no qual com certeza o muro seria destruído e o ônibus continuaria em seu movimento de avanço alguns instantes após a colisão, também se vê a influência da massa, mas não é só isto: surge, acoplado ao movimento, o conceito de direção e sentido e o mesmo ocorre com todos os fenômenos anteriores.

Com isso, acabamos de caracterizar a grandeza vetorial e podemos expressar matematicamente a quantidade de movimento por  $Q = m.v$ . Caso tenhamos  $n$  massas no sistema isolado, soma-se umas às outras.  $M_1.v_1 + m_2.v_2 + \dots + m_n . v_n = Q$  sistema = constante A unidade de medida dessa grandeza no sistema internacional é Kg.m/s. Agora, passemos a estudar os casos apresentados um a um, como seguem: 1.1 e 1.2. São exemplos de uma nave com foguete e recuo de uma carabina (arma) que permitem a análise qualitativa da manobra de um foguete e do recuo da arma. Brincando com carrinhos (como Match Box) e bolinhas de gude, analisa-se a quantidade de movimentos lineares na atividade, podendo-se observar o caráter vetorial e a expressão matemática da quantidade de movimento e de sua conservação.

1.3. O choque entre dois patinadores permite o cálculo da velocidade final entre eles.

1.4. Este mesmo exemplo resolve, graficamente, o problema que envolve uma explosão, através do princípio da conservação da quantidade de movimento.

1.5. Mostra o caminhar de uma pessoa sobre o planeta Terra, apresentando o cálculo da velocidade de recuo da Terra.

1.6 e 1.7. A cobrança de pênalti e o avião a jato: são exemplos que permitem, no primeiro, calcular a força que o pé de um jogador faz em uma bola e quantidade

de movimento adquirida pela bola com o chute e, no segundo, a força aplicada no avião pela ejeção do gás, assim como a variação da velocidade adquirida. 1.8 e 1.9. Um ponta-pé em uma caixa elástica (caixa de sapato) primeiro vazia, depois com um

tijolo, e um cavalo atrelado a uma carroça, que a puxa com uma força  $F$ , são exemplos que utilizam as leis de Newton para uma análise qualitativa dos fenômenos representados.

1.10. Um salto duplo, dado por um mergulhador olímpico, permite uma análise qualitativa, justificando a necessidade de encolher braços e pernas para aumentar a sua velocidade de rotação, movimento este que vem da interação de seus pés com a prancha.

1.3. Investigando-se Invariantes nas Rotações com o mesmo princípio das listas de fenômenos conhecidos, só que de rotação circular, investiga-se os seus conceitos físicos quantitativos e qualitativos.

1.11. O prato de um toca-discos caracteriza o vetor velocidade angular no movimento do prato (circular), em função de uma frequência de rotação no tempo.

1.12. Um ciclista sobre uma bicicleta permite constatar o vetor angular ( $L$ ) no movimento da roda.

1.13. Este exemplo é muito interessante: uma máquina de lavar roupa com três funções (lavar, enxaguar e centrifugar). Analisando o fenômeno, ele parece violar a conservação do movimento angular ( $W$ ), porque toda máquina deveria girar com velocidade angular de sentido contrário. Isto não ocorre porque as partes da máquina estão acopladas umas às outras e a máquina está presa ao chão por pés em forma de ventosa, que a fixa.

1.37. Variação da quantidade de movimento angular: o torque. Para acelerar ou frear o movimento de translação de um corpo, variando assim a sua quantidade de movimento linear, é necessária aplicação de uma força sobre ele. Algo equivalente pode ser dito sobre as rotações, só que não é bem a força que produz a variação na quantidade de movimento angular, mas sim a força do torque exercida perpendicularmente ao eixo de giro do corpo.

**1.14. Ao abrir uma porta, ela gira entorno de seu eixo, apresentando a velocidade angular ( $W$ ) decorrente do efeito de um torque ( $T$ ).**

**1.15. Um ciclista sobre uma bicicleta, em alta velocidade, quando solta as mãos do guidão, não cai imediatamente. Tem-se, aqui, a oportunidade de se discutir a estabilidade de uma bicicleta em movimento. O ciclista não cai porque as rodas da bicicleta têm um alto valor para o momento angular ( $L$ ) que se conserva e é perpendicular ao plano da roda da bicicleta. Além disso, o torque também conserva a direção e sentido, fazendo necessária uma força torque externa para derrubar o ciclista.**

1.4. A energia e sua lei de conservação. Esta lei física envolve transformações e transferência de energia de várias naturezas para os sistemas mecânicos de movimento. Esta energia de movimento é chamada energia cinética. A energia acumulada no combustível dos carros, a energia elétrica nos aparelhos elétricos, o vapor d'água das usinas de carvão e nuclear, a energia potencial, gravitacional, utilizada nas hidroelétricas, todas são transformadas em energia cinética, objeto de estudo deste capítulo.

1.16. A barragem de uma hidroelétrica com um gerador e a linha de transmissão ligada a alguns aparelhos domésticos (ventilador, lâmpada acesa) permitem identificar as transformações de energia: 1) energia potencial gravitacional do sistema, água-terra; 2) energia elétrica, transformada a partir da energia cinética de rotação na turbina; 3) na fiação elétrica ocorre uma transformação de energia elétrica em térmica e radiante; 4) o ventilador transforma energia elétrica em cinética de rotação; 5) a lâmpada transforma a energia elétrica em luminosa e térmica. 1.16, 1.17 e 1.18. Analisam situações onde ocorrem transformações de energia.

1.17. Descreve um escritório que desenvolve muitas atividades no seu dia-a-dia.

1.18. Um carrossel com um peso ligado ao seu eixo por um fio ideal e um trenó com um peso ligado a ele por uma roldana e um fio ideal. Em ambos os exemplos, demonstra-se a transformação da energia gravitacional, exercida pela força peso, em energia cinética de movimento, respectivamente, rotação e translação.

1.19. Um carro sem combustível, sendo empurrado por um motorista primeiro por trás, depois pela lateral junto à porta, em um ângulo de  $60^\circ$ , permite a comparação da transferência de energia, que é maior por trás do que pela lateral:  $T = F \cdot \cos \theta \cdot D$ .

1.20. Trata-se de um pistão de automóvel com certo diâmetro, que efetua um determinado curso sobre uma pressão efetiva, permitindo o cálculo do trabalho e da potência desse pistão.

1.21, 1.22 e 1.23. Utilizam o princípio da conservação da energia para avaliar a força aplicada por um bate-estaca, a velocidade de saída da flecha de um arco e a velocidade de uma bala.

1.24. Apresenta o problema de dois cilindros de mesmo raio e mesma massa que, ao serem abandonados da mesma posição e no mesmo instante, de um plano inclinado, não atingem a base do plano simultaneamente. A conclusão é simples: o fato deles girarem em torno de seus próprios eixos, e por não serem idênticos, sugere que as suas massas estejam distribuídas de formas diferentes, provocando momentos de inércia diferentes. Já a quantização é mais importante.

## **PARTE 2**

### **Condições de Equilíbrio**



Nas várias situações estudadas anteriormente, forças e torques foram identificadas como responsáveis pela variação da quantidade de movimento, respectivamente, de translação e de rotação. Podemos concluir que, para um corpo permanecer em repouso, isto é, para que não translate e não gire, além de a força resultante ser nula, o torque resultante também tem que ser nulo. Cabe observar duas situações: o corpo, ao conservar a velocidade de translação e rotação, está em equilíbrio dinâmico (avião, carrossel), enquanto que, ao permanecer em repouso, encontra-se em equilíbrio estático (ponte, armário).

**2.1.** Apresenta-se, aqui, o caso de uma luminária com certa massa, presa por suspensão a uma haste engatada a uma parede, que possui uma corrente também engatada à parede e que forma um ângulo de  $45^\circ$  com a haste. Este exemplo permite-nos analisar e quantificar a força que a corrente e a haste suportam, já que há equilíbrio.

**2.2.** O exemplo de uma ponte com um caminhão, uma prateleira presa por duas mãos francesas, carregadas de livros e a balança de um pescador, construída com mola (igualmente ao exemplo 2.1), permitem o estudo do equilíbrio em um sistema.

**2.3.** Campo gravitacional é uma região de influência sobre um outro corpo, que depende de sua massa e de seu raio.

**2.4.** Massa Inercial (dada pela 2ª lei de Newton,  $m=F/a$ ). A massa gravitacional e massa inercial, que são equivalentes, observam-se sobre a balança de dois pratos do peixeiro.

**2.5.** A medida do campo gravitacional é dada pela relação  $g= Fg/m$ .

**2.6.** A expressão universal do campo gravitacional é  $g= G.M/r^2$ ;  $G=$  cte. Um problema que peça a massa gravitacional e o peso de um astronauta, num local onde o campo gravitacional seja nulo, só pode nos levar à conclusão de que a força peso de qualquer objeto, em tal condição, é nula.

## **PARTE 3**

### **Ferramentas e Mecanismos**

Nesta parte, estudaremos, com os exemplos, ferramentas e instrumentos cuja função seja ampliar a força que aplicamos e, desta maneira, facilitar a realização de determinadas tarefas. A chave de boca, o pé de cabra, o saca-rolhas, as torneiras, o alicate, o grifo, todos fornecem ao homem uma vantagem mecânica (VM) em relação à força aplicada e ao trabalho realizado (pelo torque). T-F no ponto A.r.

Os exercícios 3.1 e 3.2 permitem a quantização da força que uma chave de boca e um pé de cabra transmitem à porca e ao prego, quando engastadas em um ponto como  $T= F.b$ .

## PARTE 4

### Descrição Matemática dos Momentos

4.1. Enfim, a cinemática: a análise, daqui para diante, será sobre a descrição

do movimento e não de suas causas, importando a sua descrição matemática e elevando-se o grau de abstração. Considerando-se o mapa de uma cidade, pode-se estudar a posição, o deslocamento e calcular a velocidade média de uma pessoa deslocando-se de um ponto a outro.

Os exemplos 4.2,4.3,4.4 e 4.5 utilizam as equações horárias da velocidade e da posição em diversas situações.

4.2. O choque frontal entre dois patinadores de massas diferentes.

4.3. A ultrapassagem de um caminhão por um carro.

4.4. Um trem que se desloca entre duas estações por uma rodovia plana e retilínea. Para quantificá-lo, como é exigido pela Cinemática, basta inserir alguns dados como tempo, aceleração, velocidade inicial, espaço.

4.5. Aqui, temos um estudo do movimento de queda livre, propondo-se um astronauta lançando na lua, um objeto verticalmente inicial, e determinando-se o tempo de subida do objeto até a alcançar a altura máxima. Cuidado professor, daqui podem sair questões interessantes, como: Qual o módulo da aceleração gravitacional na superfície da Lua? Para a resposta, basta considerar  $V=0$  e a aceleração da Lua negativa,  $V=VO-gl.t$ .

## APÊNDICE

### 1 Força de Atrito

Ao movimentarmos um bloco que está apoiado sobre uma superfície, sentimos certa resistência. Geralmente, essa resistência diminui assim que o movimento se inicia, a) Calculando a força de atrito:  $f_e = \mu_e.N$ ;  $f_d = \mu_d.N$ , onde temos:

Peso (P), Normal (N), Força de atrito estático ( $f_e$ ), coeficiente de proporcionalidade ou coeficiente de atrito estático ( $\mu_e$ ) e força de atrito dinâmico ( $f_d$ ).

## APÊNDICE 2

### A Influência da Resistência do Ar em Alguns Movimentos

Tal influência pode ser observada em saltos como os de pára-quedas, cuja função é diminuir a velocidade do pára-quedista. Já em gotas de chuva, não ocorre o mesmo: a força de resistência do ar é proporcional à sua velocidade.

### **APÊNDICE 3**

#### **Momentos de Inércia de Alguns Objetos Homogêneos**

Devemos notar que o momento de inércia ( $I$ ) tem um valor diferente para cada eixo de rotação. Para o paralelepípedo, vale  $I_x = 1/12.m.(a^2+b^2)$ ;  $I_x' = 1/3 m. (1/4 a^2+b^2)$ ;  $I_y = 1/12.m.(b^2+c^2)$ . O mesmo não vale para o cilindro, para a esfera, disco ou a haste delgada.

### **APÊNDICE 4**

#### **Empuxo**

A intensidade do empuxo é igual ao peso do volume do fluido deslocado. Isto permite compreender por que os icebergs e os navios flutuam.

### **APÊNDICE 5**

#### **O Módulo da Aceleração Centrípeta**

A aceleração centrípeta tem intensidade  $a_c = V^2/r$ , sendo dirigida para o centro da

## **Física 2: Física Térmica e Óptica.**

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA (GREF). Física 2: Física Térmica e Óptica.

7ª ed. São Paulo: Edusp, 1996.

#### **Apresentação geral da proposta**

O trabalho é apresentado na forma de texto para professores de Física.

As metas: tornar significativo o aprendizado científico, dar condições de acesso a uma compreensão conceitual e formal, procurando partir, sempre que possível,

de elementos vivenciais e mesmo cotidianos.

A Física é frequentemente confundida com o aparato matemático formal. Para evitar esta distorção pedagógica, cada assunto da Física é desenvolvido por uma temática e linguagem comuns ao professor e a seu aluno.

O autor, com a construção deste saber em comum, abre cada tópico levantando coisas que aluno e professor associem, respectivamente, com física térmica ou óptica. Essa construção prossegue com uma classificação das coisas presentes no levantamento, onde começa a mostrar para o aluno a estrutura conceitual do curso.

Dentro de cada assunto, podem ocorrer mudanças de ordenação e conteúdos. A natureza da luz, por exemplo, o primeiro tema de Óptica e Física Moderna, motores e refrigeradores, partes importante da Física Térmica. Tanto atividades práticas e problemas propostos baseiam-se em situações e elementos do cotidiano.

### **FÍSICA TÉRMICA - Abertura e plano de curso**

A proposta é começar com a pergunta lançada pelo professor: Quais são as coisas e fenômenos relacionados ao aquecimento e resfriamento?

A partir dessa pergunta, podemos fazer um levantamento dessas coisas e fenômenos que os alunos relacionam ao aquecimento e resfriamento. Exemplo; geladeiras, fogão, ventilador, fervura/ ebulição, freezer, chuveiro elétrico, calor, isopor, temperatura, carvão, lâmpada, água.

A partir deste levantamento, e retomando a ideia de que as substâncias e suas propriedades são compreendidas em função dos processos de que participam e de sua relevância para o funcionamento das máquinas, é possível fazermos uma classificação desses elementos, ou seja:

- a) substâncias e materiais;
- b) processos, fenômenos e conceitos;
- c) máquinas, aparelhos e sistemas naturais.

Com esta classificação, propomos o desenvolvimento do conteúdo (plano de curso) com dois tópicos básicos, a saber.

### **PARTE 1**

Substâncias, propriedades e processos térmicos

Aqui, são discutidos os processos térmicos que envolvem a produção de calor, suas trocas e os efeitos causados por essas trocas.

No estudo dos processos de produção de calor, é discutida a utilização de substâncias, enquanto combustíveis, e a identificação dos sistemas que se comportam como fontes de calor. Nas trocas de calor, são analisadas as utilizações de materiais - condutores, isolantes e irradiadores de calor - e as correntes de convecção e seus efeitos, como: variação de temperatura, dilatação dos sólidos, líquidos e gases e a mudança de estado da matéria. O estudo de processo térmico é qualitativo, sistematizando observações e identificando propriedades dos diversos materiais.

Em seguida, apresenta-se um modelo de estrutura da matéria que permite explicar, sob o ponto de vista microscópico, as propriedades e processos estudados anteriormente e as expressões matemáticas que relacionam as grandezas discutidas.

## **PARTE 2 Máquinas térmicas e processos naturais**

Nesta parte, o autor começa investigando algumas máquinas térmicas, como motores de automóveis, turbina a vapor, refrigeradores, e identifica os processos físicos essenciais para seu funcionamento. A partir dessa investigação, passa a formalizar os princípios fundamentais da termodinâmica. O rendimento das máquinas térmicas é utilizado para a introdução do conceito do ciclo ideal: o ciclo de Carnot.

Também é mencionado o uso generalizado de máquinas térmicas, que tem chamado a atenção para o fato de elevar gradativamente a temperatura do meio ambiente, que já apresenta indícios da interferência nos ciclos naturais. Em processos térmicos naturais, a discussão começa com a energia proveniente do Sol, que atinge a Terra, e a energia irradiada pela Terra, provocando trocas de calor e sendo interpretadas qualitativamente, através da Física Térmica já discutida.

Alguns ciclos naturais: ciclo do ar, ciclo da água, orvalho, nevoeiro, geada, neve, granizo, inversão térmica, vulcão e gêiser.

## **APÊNDICE**

Aqui, temos uma sequência de textos, pertinente ao conteúdo, que poderá vir a auxiliar o professor em seu trabalho, dentro da sala de aula.

**1. Construção e graduação de termômetros** - apresenta de que maneira baseia-se a construção de um termômetro, tomando como exemplo a escala Celsius.

**2. Motor a combustão** • apresenta o funcionamento de motores a combustão interna, que diferem quanto ao ciclo de funcionamento (4 tempos ou 2 tempos) e quanto ao combustível que utilizam (diesel, gasolina ou álcool).

**3. Geladeira/ refrigerador doméstico** • trata do funcionamento da geladeira em ciclos e a função de cada componente dela.

**4. Refrigerador a fogo** - explica o funcionamento de um refrigerador a fogo e faz uma comparação com o refrigerador elétrico.

## **ÓPTICA**

A apresentação do conteúdo da Óptica, bem como a estrutura do curso, é efetuada através de um levantamento e da classificação das coisas que estão associ-

adas à luz, à visão e às cores, conforme exemplificado abaixo:

- a) Produtores ou fontes - transformam outras formas de energia em energia luminosa;
- b) Refletores - devolvem a luz;
- c) Refratores - deixam passar a luz;
- d) Absorvedores - transformam a energia luminosa em outras formas de energia.

A partir dessa classificação, é proposto o plano de curso com dois tópicos básicos, a saber.

### **PARTE 1 Processos luminosos: interação luz-matéria**

A interação luz-matéria, que resulta na produção, reflexão, refração, absorção, difração, interferência e polarização da luz, será objeto de estudo. A investigação dos processos luminosos será iniciada a partir da iluminação dos objetos a serem fotografados, da transmissão da luz de uma cena até um filme, do registro de uma cena num filme fotográfico e da nitidez numa fotografia. Este estudo, que envolve o caminho da luz na máquina fotográfica, será efetuado de forma qualitativa, sistematizando observações macroscópicas. Em seguida, será apresentado um modelo de matéria e de luz baseado na Física Quântica, que permite interpretar os processos estudados anteriormente de um ponto de vista macroscópico, destacando-se o aspecto dual da luz (onda - partícula).

Finalizando, o espectro da luz visível será situado dentro do espectro das demais radiações.

### **PARTE 2**

#### **Sistemas ópticos que possibilitam a visão das coisas**

Nesta etapa, é feita uma investigação de vários sistemas ópticos, partindo-se do olho humano e, posteriormente, analisando-se alguns instrumentos, tais como: microscópio, projetor de slides, retroprojetor, luneta, binóculo.

O estudo da formação da imagem no olho e a correção dos defeitos da visão permite interpretar os instrumentos ópticos como construções que possibilitam o aprimoramento na visualização dos objetos.

As imagens obtidas com a correção dos defeitos da visão, com a ampliação e a aproximação de objetos, permitem introduzir a Óptica Geométrica, ou seja, o estudo da construção de imagens a partir dos raios de luz.

#### **APÊNDICE 1 - O uso de filtros na fotografia**

Em fotografia, os filtros de cores ajudam a manter o contraste natural da cena ou dos objetos. Esse texto indica o filtro e o efeito que ele produz na fotografia com filmes em preto e branco.

### **APÊNDICE 2 - Fonte a laser**

A fonte a laser é, basicamente, constituída por uma fonte de energia (bombeadora, em geral uma lâmpada de descarga) que excita átomos ou moléculas (meio) no interior de uma cavidade ressoadora. Esse texto representa esquematicamente os processos que ocorrem em cada parte.

### **APÊNDICE 3 - O olho humano**

Descreve detalhadamente o funcionamento e a constituição do olho humano.

### **APÊNDICE 4 - Dedução da equação dos fabricantes de lentes**

Aplicação da lei de Snell-Descartes nas superfícies curvas de uma lente delgada. Podemos, através de operações trigonométricas, obter a equação das lentes.

### **APÊNDICE 5 - O átomo de hidrogénio: modelo de**

#### **Bohr**

Um breve histórico de como o físico dinamarquês Niels Bohr incorporou concepções quânticas ao modelo de Rutherford.

Síntese elaborada por Lariene Marques de Paula

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA (GREF). Física 3 - Eletromagnetismo. São Paulo: Edusp, 1996.

### **Apresentação**

Este livro apresenta uma nova proposta para o ensino da Física, que visa tornar significativo seu aprendizado, mesmo para aqueles cujo futuro profissional não dependa diretamente desta ciência.

A Física, instrumento para a compreensão do mundo em que vivemos, tem se

aprendizado comprometido, pois os alunos são expostos ao aparato matemático-formal antes de terem compreendido os conceitos. A proposta é começar cada assunto da Física através de uma linguagem comum ao professor e seu aluno, que está contido no universo de ambos. O professor deve começar fazendo um levantamento de coisas que o aluno associe à mecânica, à física-térmica, à óptica ou ao eletromagnetismo. Como o aluno participa desta classificação, o professor pode ter ideia do conhecimento e interesse de cada turma.

Esta primeira etapa é, portanto, um reconhecimento necessário que sustentará o processo de ensino-aprendizagem.

### **Eletromagnetismo - abertura e plano de curso**

A proposta do GREF para o conteúdo de eletromagnetismo e da estrutura do curso inicia-se com o convite para que o aluno responda a pergunta: "Que aparelhos e componentes elétricos e eletrônicos vocês utilizam e conhecem?". Em seguida, inicia-se o levantamento para a construção de várias tabelas com os aparelhos e componentes elétricos e eletrônicos que fazem parte do cotidiano dos alunos.

Começa-se então a organização das tabelas. Os aparelhos cuja função principal é transformar energia elétrica em térmica fazem parte do grupo dos resistivos. Outros aparelhos elétricos produzem movimento, ou seja, transformam a maior parte da energia elétrica em mecânica. Esses são os do grupo dos motores elétricos.

Para entrarem em funcionamento, os aparelhos elétricos precisam estar ligados a um circuito que contenha pilha, gerador, bateria etc. Estes formarão o grupo das fontes de energia elétrica.

Um quarto grupo é formado pelos aparelhos que possibilitam a comunicação entre pessoas e o armazenamento de informações, configurando o grupo dos elementos de sistema de comunicação.

Outro grupo é formado pelos díodos e transistores, chamado de grupo dos materiais semicondutores.

Por fim, temos o grupo dos componentes elétricos e eletrônicos', por exemplo: bobina, válvula, fio de cobre, relógio de luz etc.



O conteúdo do eletromagnetismo será desenvolvido na medida em que forem abordados os seis grupos; esse processo deve ser conduzido de modo que permita o surgimento de questões que motivem o aprendizado.

### **Parte 1: Fusíveis, lâmpadas, chuveiros e fios de ligação - aparelhos resistivos**

A estratégia, agora, é dar continuidade à investigação dos aparelhos elétricos, buscando conhecer as condições de funcionamento. Isso é conseguido através de informações fornecidas pelos fabricantes e/ou impressas nos próprios aparelhos. Desta forma, são identificadas diferentes grandezas físicas, com seus símbolos e unidades, através de objetos concretos e vivenciais no cotidiano dos alunos, propiciando questões tais como: "Qual a diferença entre um chuveiro que funciona em 220 V e outro que funciona em 110 V?". Mesmo que algumas indagações não sejam respondidas num primeiro momento, são importantes porque permitem a ampliação do universo de estudo.

### **Parte 2: Motores elétricos e instrumentos de medida com ponteiro**

Ao estabelecer os critérios para a classificação dos elementos, levantados na abertura deste livro, formamos um grupo de aparelhos elétricos que produzem movimento. Fazem parte desse grupo os liquidificadores, enceradeiras, batedeiras etc., sendo denominados motores elétricos.

Entretanto, outros aparelhos, tais como as campainhas e os medidores com ponteiros, que podem ser encontrados nos aparelhos de som e aparelhos cirúrgicos, também produzem movimento, vibração e rotação.

Através do estudo destes aparelhos, discutiremos um outro efeito da corrente elétrica: o efeito magnético através do qual a energia elétrica é convertida em energia mecânica. Isto levantará o estudo da Lei de Ampere e da Lei de Gauss.

### **Parte 3**

Nesta parte, estudaremos os aparelhos classificados como fontes de energia elétrica no levantamento inicial. Discutiremos os processos pelos quais outras formas de energia podem ser transformadas em energia elétrica. Os aparelhos capazes de efetuar tal transformação são geradores de campo elétrico. Quando ligamos um aparelho eletrodoméstico na tomada, o fazemos quase sem pensar. Entretanto, o ato de ligar um aparelho à tomada significa torná-lo parte de um circuito muito maior, que pode ter centenas de quilômetros de extensão, pois a energia elétrica utilizada em nossas casas provém de usinas geradoras quase sempre distantes dos centros consumidores.

### **Parte 4: Rádio, TV, gravador e toca-discos - elementos de sistema de comunicação e informação**

Iniciaremos esta parte entendendo como funciona o microfone e o alto-falante, que são extremos do sistema de comunicação sonora. Estudaremos o mecanismo que envolve a transmissão de uma informação sonora do microfone até o alto-falante, completando o estudo desse sistema de comunicação. Finalizando, estudaremos a

formação da imagem nas câmeras de TV e vídeo, os processos de armazenamento e recuperação de informação, a fita magnética e o disco.

O mecanismo que envolve a transmissão de informações que cobrem grandes (ou pequenas) distâncias parece algo extraordinário ou mágico. Porém, a Física pode nos ajudar a compreender um pouco mais esse mecanismo.

### **Parte 5: Diodo e transistor - materiais semicondutores**

Cada vez mais, boa parte dos componentes dos aparelhos, equipamentos e instrumentos elétricos estão sendo reconcebidos e substituídos devido ao estudo de novos materiais. A utilização desses novos materiais propicia a construção de aparelhos e/ou instrumentos como, por exemplo, a calculadora, o relógio digital, computadores, TV portátil, vídeos, entre outros.

A comparação entre o aparelho de rádio e a TV antigos com outros mais modernos aponta algumas diferenças como: o antigo é maior e muito mais pesado do que um semelhante mais moderno. Sem o uso dos novos materiais, isso seria impossível. Além disso, a fonte de energia para os aparelhos antigos era, necessariamente, a tomada. Hoje, podemos também usar a pilha. O uso dos semicondutores nos circuitos elétricos, além de torná-los muito menores, propiciou grande avanço na construção de novos aparelhos.

### **Parte 6: Componentes elétricos e eletrônicos**

Durante o desenvolvimento das cinco partes precedentes, pudemos discutir, através da interpretação de um conjunto de leis, o funcionamento dos aparelhos elétricos, as situações e os fenômenos que tais aparelhos propiciam. Assim, a ideia de que carga elétrica cria campo elétrico é o conteúdo físico da Lei de Gauss. A corrente elétrica que cria um campo magnético corresponde à Lei de Ampere. A inexistência de monopólos magnéticos corresponde à Lei de Gauss Magnética. E a criação do campo elétrico pela variação do campo magnético corresponde à Lei de Faraday.

O contato direto dos alunos com esses aparelhos permite que o conteúdo do Eletromagnetismo seja desenvolvido num contexto que possibilite o surgimento de questões vindas da observação, do manuseio e da expectativa de saber como funcionam.

Neste momento, levantaremos a fenomenologia de outros aparelhos e de componentes eletro-eletrônicos, tais como: Galvanômetros, Disjuntores, Motores de Indução, Relógio de Luz, Transformadores, Microfones, Capacitores, Válvulas Termoiônicas e o Sistema de Ignição do Automóvel.

Como diz Paulinho da Viola, é preciso lembrar que "a vida não é só isso que se vê, é um pouco mais que os olhos não conseguem perceber".

**12. HEWITT, Paul G. Física conceitual. 9. ed. São Paulo: Bookman, 2002.**

O livro “Física Conceitual” é um livro de Física Básica destinado a estudantes de todos os cursos de nível superior (incluindo ciências exatas e biológicas). O livro cobre, de maneira completa, todos os tópicos abordados em um curso de Física Básica, dentre os quais:

- Mecânica
- Propriedades da Matéria
- Calor
- Som
- Eletricidade e eletromagnetismo
- Luz
- Física atômica e nuclear
- Relatividade

Devido à ampla cobertura de tópicos abordados pelo livro podem ser necessários diversos semestres letivos para que estes sejam estudados. Assim, dependendo do curso (p.ex. Ciências Biológicas), apenas alguns tópicos poderão ser abordados pelo professor.

O grande diferencial deste livro é a forma de abordagem do autor para os conceitos de Física. O autor enfatiza os conceitos e não as equações matemáticas, como é feito pela maioria dos livros de Física Básica. A ideia do autor é apresentar uma Física “divertida” de maneira que os alunos possam ser “fisgados” pelo interesse em Ciências, em especial Física. Assim, após o aluno ter aprendido os conceitos básicos, este poderia se aperfeiçoar em um curso mais avançado com ênfase em problemas matemáticos. Desta maneira, o livro apresenta poucas equações matemáticas e problemas simplificados em relação a livros tradicionais de Física (que usam matemática mais aprofundada). Não são utilizadas, por exemplo, equações com derivadas ou integrais conforme os livros tradicionais de Física de ensino superior. Trata-se então, de uma nova abordagem de ensino de Física que pode provavelmente ter grande aceitação para alguns professores enquanto pode ser refutada enfaticamente por outros.

Devido a apresentação simplificada do livro em termos matemáticos, este pode ser utilizado inclusive como livro de referência para o ensino médio, no qual partes do livro podem ser utilizadas para o aprendizado desses alunos.

Descrição do livro por capítulos:

### **1. Sobre a Ciência:**

Este é o capítulo introdutório do livro, de maneira que os alunos tenham o primeiro contato com a ciência, linguagem da ciência, método científico, a atitude científica e outros tópicos introdutórios.

Após um breve histórico da ciência ao longo dos anos, o autor descreve como foram feitas medidas de “Tamanho da Terra”, “Tamanho da Lua”, “Distância Lua-Terra” e “Distância Sol-Terra” de maneira histórica e descritiva. Em seguida, são abordados os temas: matemática - a linguagem da ciência; o método científico; a atitude científica; ciência, arte e religião; ciência e tecnologia; física - a ciência fundamental. Finalmente, é mostrado um sumário de termos; leitura sugerida; questões de revisão; sugestão de um projeto e exercícios teóricos.

## **PARTE UM – MECÂNICA**

### **2. Primeira lei de Newton do movimento**

Diferentemente dos livros “tradicionais” de Física Básica, o autor inicia o curso de Física pela primeira lei de Newton e não pelo capítulo de Cinemática. Segundo o autor, na maioria nos cursos de Física, se gasta diversos meses com o capítulo de cinemática, sendo que este não é o assunto mais excitante e importante que o curso pode oferecer. Esta prática pode gerar desmotivação inicial dos alunos.

O autor inicia o capítulo com explicação de Aristóteles sobre o movimento, seguido pela descrição de Nicolau Copérnico para o movimento da Terra, e com exemplos de planos inclinados descritos por Galileu Galilei. Finalmente, o autor estabelece a primeira lei de Newton, citando os cientistas anteriores. São estabelecidos os conceitos de Força resultante, condição de equilíbrio, força de apoio, equilíbrio de corpos em movimento e movimento da Terra. Finalmente, são mostrados sumário de termos, questões de revisão e quarenta exercícios práticos e teóricos.

### **3. Movimento retilíneo**

Neste capítulo são descritos os conceitos básicos de cinemática tradicionais. São abordados os conceitos de movimento relativo, rapidez, velocidade, aceleração e queda livre, todos eles com diversos exemplos práticos. Finalmente, são mostrados sumário de termos, sumário de fórmulas, questões de revisão, sugestão de um projeto e cinquenta exercícios práticos e teóricos.

### **4. Segunda lei de Newton do movimento**

Em continuação ao capítulo 2 (primeira lei de Newton), o autor inicia o capítulo com conceitos de que a força produz aceleração, de atrito, de massa e peso. Em seguida, a segunda lei de Newton é enunciada e analisada. Os processos de queda livre (movimento com aceleração  $g$ ) e de queda não livre (movimento com aceleração menor que  $g$ ) são analisados e exemplificados. O sumário de termos, questões de revisão; sugestão de projetos e sessenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **5. Terceira lei de Newton do movimento**

O autor aborda inicialmente os temas Força e Interações de maneira a exemplificar o conceito de força e reação. Em seguida, a terceira lei de Newton é enunciada, sendo definidos: o sistema a ser escolhido e a ação e reação sobre massas diferentes. Os conceitos dos enunciados das três leis de Newton são resumidos e correlacionados. Finalmente, o conceito de vetores é abordado e exemplificado por forças e velocidade como vetores. O sumário de termos, questões de revisão, sugestão de projeto e quarenta e seis exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **6. Momentum**

No início do capítulo intitulado momentum, são abordados os seguintes temas: definição de momentum, impulso, o impulso modifica o momentum. Em seguida os conceitos de conservação de momentum, colisões lineares e colisões bidimensionais são explanados. O sumário de termos, questões de revisão, sugestão de projeto e sessenta e dois exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **7. Energia**

O importante tema Energia é abordado neste capítulo. Inicialmente, o autor aborda os temas Trabalho e Potência. Em seguida, os conceitos de energia mecânica (envolvendo as energias cinética e potencial, teorema trabalho-energia), conservação da energia, máquinas, rendimento, comparação entre energia cinética e momentum, fontes de energia são abordados. O sumário de termos, questões de revisão, sugestão de projeto e sessenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **8. Movimento de rotação**

Neste capítulo são descritos os temas de movimento circular, inércia rotacional, torque, centro de massa e centro de gravidade (abordando os conceitos: localizando o centro de gravidade e estabilidade). Os conceitos de Força centrípeta e centrífuga são analisados e comparados. Finalmente, os temas de força centrífuga em um sistema de referência em rotação, gravidade simulada, momentum angular, conservação de momentum angular são abordados. O sumário de termos, leitura sugerida, questões de revisão, sugestão de projetos e sessenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **9. Gravidade**

O conceito de gravidade, citado pela primeira vez no capítulo 4, é explorado em profundidade neste capítulo. A lei da gravitação universal é inicialmente enunciada, explicitando a equação que rege a mesma. Exemplos sobre os temas de peso de uma pessoa em um elevador, as marés na Terra e na Lua. A teoria de campos gravitacionais entre a Terra e a Lua e dentro do mesmo planeta são abordados. A teoria de gravitação de Einstein e sua comparação com a de Newton é discutida e exemplificada. Temas como buracos negros e o *big bang* também são analisados. O sumário de termos, leituras sugeridas, questões de revisão, sugestão de projetos e sessenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **10. Movimento de projéteis e de satélites**

No último capítulo da parte UM (mecânica) deste livro, o autor usa conceitos abordados nos outros capítulos na aplicação do movimento de projéteis e satélites. São discutidos inicialmente o movimento de projéteis (lançados horizontalmente e obliquamente), de satélites e suas órbitas. Posteriormente, são analisadas as leis de Kepler do movimento planetário, as leis de conservação de energia para o movimento

de satélites e a rapidez de escape de um objeto da Terra. O sumário de termos, leitura sugerida, questões de revisão e sessenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **PARTE DOIS – PROPRIEDADES DA MATÉRIA**

### **11. A natureza atômica da matéria**

O objetivo deste capítulo é descrever como é feita a matéria. Para tanto, o autor inicia descrevendo a hipótese histórica da matéria composta de átomos e os experimentos para comprovar tal hipótese. Em seguida, o autor descreve os elementos formadores dos átomos: elétrons, prótons, nêutrons, bem como as subpartículas nucleares, os quarks. Posteriormente, o autor passa a descrever as moléculas, a antimatéria e a matéria escura. O sumário de termos, leituras sugeridas, questões de revisão, sugestão de projeto e quarenta e oito exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **12. Sólidos**

As características físicas dos sólidos são descritas neste capítulo. O autor inicia o capítulo descrevendo o experimento clássico com o micrógrafo de Muller. Em seguida breve descrição de como é uma estrutura cristalina. Características de um sólido, como densidade, elasticidade e tensão e compressão são citadas. Finalmente, o autor discute que, devido a características dos sólidos, são necessários a formação de arcos, e dentro desta mesma temática, o que acontece quando se muda de escala no estudo de sólidos. O sumário de termos, leituras sugeridas, questões de revisão, sugestão de projeto e cinquenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **13. Líquidos**

As características físicas dos líquidos são descritas neste capítulo. O autor explica os conceitos básicos de: pressão, pressão em líquido, vasos comunicantes, empuxo, princípio de Arquimedes, flutuação, princípio de Pascal, tensão superficial, capilaridade com diversos exemplos práticos de maneira detalhada. O sumário de termos, leitura sugerida, questões de revisão, sugestão de projetos e sessenta e dois exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **14. Gases e Plasmas**

As características físicas dos sólidos são descritas neste capítulo. Da mesma maneira que nos dois outros capítulos anteriores, conceitos básicos dos gases são discutidos, incluindo: características da atmosfera terrestre, pressão atmosférica, lei de Boyle, empuxo do ar, princípio de Bernoulli com aplicações. Adicionalmente, o conceito de plasma também é abordado neste capítulo. O sumário de termos, sugestão de projetos e sessenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

# **PARTE TRÊS – CALOR**

## **15. Temperatura, calor e dilatação**

O primeiro capítulo da parte três do livro explica conceitos básicos para o estudo da termodinâmica. Dentre os quais: temperatura, calor, calor específico e dilatação térmica. O sumário de termos, questões de revisão e sessenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **16. Transferência de calor**

O processo de transferência de calor entre os objetos é discutido em detalhes neste capítulo. O autor descreve os fenômenos de condução, convecção e radiação. São apresentados também, a lei de Newton do resfriamento, o efeito estufa e conceitos de potência. O sumário de termos, questões de revisão, sugestão de projetos e cinquenta e seis exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **17. Mudanças de fase**

Os processos de mudanças de fase (ou estados) da matéria (quatro fases comuns no nosso meio ambiente) são descritos neste capítulo. O autor aborda os processos evaporação, condensação, ebulição, fusão e congelamento. Há, também, uma discussão sobre energia e mudanças de fases. O sumário de termos, questões de



revisão, sugestão de projetos e cinquenta e oito exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **18. Termodinâmica**

Os conceitos básicos da termodinâmica clássica são descritos neste capítulo. São descritos os conceitos de zero absoluto, energia interna, primeira lei da termodinâmica, processos adiabáticos, segunda lei da termodinâmica e entropia. O sumário de termos, questões de revisão e quarenta e oito exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **PARTE QUATRO – SOM**

### **19. Vibração e ondas**

Os conceitos fundamentais da física das vibrações e ondas são descritos neste capítulo. Os temas discutidos pelo autor são: oscilação de um pêndulo, descrição oscilatória – conceitos básicos de ondulatória, movimento da ondulatória, rapidez da onda, ondas transversais, ondas longitudinais, interferência, efeito Doppler e ondas de choque. O sumário de termos, questões de revisão, sugestão de projetos e cinquenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **20. Som**

Neste capítulo o autor descreve em detalhes os conceitos do fenômeno do som. São abordados os temas: a origem do som, a natureza do som no ar, meios que transmitem o som, velocidade do som no ar, reflexão do som, refração do som, energia das ondas sonoras, vibrações forçadas, frequência natural, ressonância, interferência e batimentos. O sumário de termos, questões de revisão, sugestão de projetos e cinquenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **21. Sons musicais**

O autor aborda neste capítulo os conceitos de sons musicais, tema não abordado usualmente em livros básicos de física que, porém pode motivar os alunos a

estudarem física, diretriz fundamental do livro. São descritos os seguintes temas: altura, intensidade sonora, timbre, instrumentos musicais, análise de Fourier e finalmente, o funcionamento de um CD (compact disc). O sumário de termos, questões de revisão, sugestão de projetos e quarenta e cinco exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **PARTE CINCO – ELETRICIDADE E ELETROMAGNETISMO**

### **22. Eletrostática**

Os conceitos básicos da eletrostática são descritos neste capítulo. São descritos os conceitos de forças elétricas, cargas elétricas, conservação da carga, lei de Coulomb, condutores e isolantes, eletrização, polarização da carga, campo elétrico, potencial elétrico, energia elétrica armazenada e gerador Van de Graaff. O sumário de termos, questões de revisão, sugestões de projetos e quarenta e cinco exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **23. Corrente elétrica**

Neste capítulo o autor aborda conceitos básicos da eletricidade, incluindo: fluxo de carga, corrente elétrica, fontes de voltagem, resistência elétrica, lei de ohm, corrente contínua e alternada, rapidez e fonte de elétrons num circuito, potência elétrica e circuitos elétricos. O sumário de termos, questões de revisão, sugestões de projetos e sessenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **24. Magnetismo**

Neste capítulo são descritos os conceitos básicos do magnetismo. São abordados os temas: forças magnéticas, polos magnéticos, campos magnéticos, domínios magnéticos, correntes elétricas e campos magnéticos, eletroímãs, forças magnéticas

sobre partículas carregadas, forças magnéticas sobre fios percorridos por correntes, campo magnético terrestre e biomagnetismo. O sumário de termos, questões de revisão, sugestões de projetos e quarenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **25. Indução eletromagnética**

O processo de indução eletromagnética é abordado em detalhes neste capítulo. O autor discute os assuntos: indução eletromagnética, lei de Faraday, geradores e corrente alternada, produção de energia, auto-indução e transmissão de energia. O sumário de termos, questões de revisão e quarenta e cinco exercícios práticos e teóricos são propostos.

# **PARTE SEIS – LUZ**

## **26. Propriedades da luz**

Inicialmente são abordados os conceitos fundamentais de ondas eletromagnéticas. Posteriormente são discutidos fenômenos da luz visível, incluindo materiais transparentes e opacos. Finalmente os mecanismos básicos de visão do olho humano são discutidos. O sumário de termos, leitura sugerida, questões de revisão, sugestão de projetos e cinquenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **27. Propriedades da luz**

Os processos que permitem a visão a cores pelos humanos são abordados em detalhes neste capítulo. Os temas abordados inicialmente são: reflexão e transmissão seletiva, mistura de cores e pigmentos coloridos. Outros temas que envolvem propriedades das cores na natureza são analisados, incluindo por que o céu é azul, por que o pôr do sol é vermelho, por que as nuvens são brancas e por que a água é azul-esverdeada. O sumário de termos, leitura sugerida, questões de revisão, sugestão de projetos e quarenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **28. Reflexão e refração**

Neste capítulo o autor se concentra em teoria e aplicações de ótica básica. São abordados os seguintes temas: reflexão da luz, princípio do mínimo tempo, lei da reflexão, lei da refração, origem da refração, reflexão interna total, características das lentes e defeitos em lentes. O sumário de termos, leitura sugerida, questões de revisão, sugestão de projetos e cinquenta e oito exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **29. Ondas luminosas**

Neste capítulo o autor aborda a natureza ondulatória da luz (e da radiação eletromagnética). São abordados os seguintes temas: princípio de Huygens, difração, interferência e polarização da luz. É abordada também, a aplicação destes fenômenos na técnica de holografia. O sumário de termos, leitura sugerida, questões de revisão, sugestão de projetos e quarenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **30. Emissão de luz**

Neste capítulo o autor aborda a onda da radiação eletromagnética como uma partícula. São abordados os seguintes temas: excitação, incandescência, fluorescência e fosforescência. É abordada também, a aplicação destes fenômenos no instrumento laser. O sumário de termos, questões de revisão, sugestão de projeto e quarenta e sete exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **31. Os quanta de luz**

Neste capítulo o autor aborda fenômenos básicos da mecânica quântica (também chamada de Física Moderna em vários livros textos). São abordados os seguintes temas: o nascimento da mecânica quântica, a quantização e a constante de Planck, o efeito fotoelétrico, dualidade onda-partícula, o experimento da fenda dupla, partículas como ondas: difração de elétrons, o princípio da incerteza e complementaridade. O sumário de termos, leitura sugerida, questões de revisão e quarenta e três exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **PARTE SETE – FÍSICA ATÔMICA E NUCLEAR**

### **32. O átomo e o quantum**

Neste capítulo o autor faz uma descrição histórica dos desenvolvimentos da física atômica desde a chamada física clássica até a atual física quântica. São abordados os seguintes temas: a descoberta do núcleo atômico, os espectros atômicos, o modelo atômico de Bohr, os tamanhos relativos dos átomos, a explicação para os níveis de energia quantizada: ondas de elétrons, a mecânica quântica e o princípio da correspondência. O sumário de termos, leituras sugeridas, questões de revisão e trinta e dois exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **33. O núcleo atômico e a radioatividade**

Neste capítulo o autor estuda o núcleo atômico e o fenômeno conhecido como radioatividade. São abordados os seguintes temas: Raios X e Radioatividade, radiações alfa, beta e gama, o núcleo, isótopos, por que os átomos são radioativos, o princípio da meia-vida, transmutação natural dos elementos, transmutação artificial dos elementos, isótopos radioativos, datação pelo carbono, datação pelo urânio e efeitos da radiação sobre seres humanos. O sumário de termos, questões de revisão e quarenta e cinco exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **34. Fissão e fusão nucleares**

Os fenômenos fundamentais de fissão e fusão nucleares são abordados pelo autor neste capítulo. São discutidos os seguintes temas: fissão nuclear, reatores de fissão nuclear, o plutônio, o reator regenerador, energia de fissão, equivalência massa-energia, fusão nuclear e fusão controlada. O sumário de termos, questões de revisão e quarenta e três exercícios práticos e teóricos são propostos.

## **PARTE OITO – RELATIVIDADE**

### **35. A teoria especial da relatividade**

As ideias fundamentais da teoria especial da relatividade são discutidas neste capítulo. O autor aborda desde experimentos preliminares para o desenvolvimento desta teoria do final do século XIX, até as descobertas de Einstein. São abordados os seguintes temas: o movimento é relativo, o experimento de Michelson-Morley, os

postulados da teoria especial de relatividade, simultaneidade, o espaço-tempo, dilatação temporal, a viagem do gêmeo, adição de velocidades, viagens espaciais, contração do comprimento, momentum relativístico, massa, energia e  $E=mc^2$  e o princípio da correspondência. O sumário de termos, leitura sugerida, questões de revisão e cinquenta exercícios práticos e teóricos são propostos.

### **36. Teoria geral da relatividade**

A teoria geral da relatividade que considera os sistemas de referência que são acelerados é abordada neste capítulo. São incluídos os seguintes temas: o princípio da equivalência; desvio da luz pela gravidade; gravidade e tempo: o desvio para o vermelho gravitacional; gravidade e espaço: o movimento de Mercúrio; gravidade, espaço e uma nova geometria; ondas gravitacionais e gravitação Newtoniana e gravitação Einsteiniana. O sumário de termos, leituras sugeridas, questões de revisão e trinta exercícios práticos e teóricos são propostos.

Quatro apêndices são incluídos no livro:

- A- Sistema de unidades.**
- B- Mais sobre o movimento.**
- C- Gráficos.**
- D- Mais sobre vetores.**

**13. OKUNO, E. Radiação: efeitos, riscos e benefícios. São Paulo: Harbra, 1998.**

Síntese elaborada por: Flávia Motta Lima – Curitiba/PR

O interesse sobre radiações vem aumentando, nos últimos anos, a partir de acidentes que ocorreram e que levaram muitas pessoas à morte ou que, atualmente, sofrem das consequências da radiação.

Um acidente radioativo, muito marcante no Brasil, foi o que ocorreu em Goiânia, no Estado de Goiás, - um aparelho de Radioterapia, levado a um ferro-velho, teve o cilindro

metálico contido em seu interior violado, e neste havia um pó de cloreto de céσιο empastilhado conhecido como Césio 137.

Em um período de 15 dias, foram diversos os sintomas das pessoas que tiveram contato com o pó ou apenas com o aparelho, desde vômitos, diarreia, queimaduras na mão e no braço, levando-se à amputação de membros e até mesmo à morte.

O contato com o pó não se limitou à comunidade em que os catadores de lixo moravam; este contato ocorreu também com as pessoas do ferro-velho para onde o aparelho foi vendido e no caminho para onde o pó foi levado para ser analisado.

No Brasil, este foi o acidente radioativo mais conhecido, mas no mundo outros acidentes são destaques: Em Juarez, no México, um aparelho de radioterapia com uma fonte de cobalto-60 foi aberto e suas peças foram transformadas em barras de aço e pés de mesa, este acidente não levou ninguém à morte, pois não houve contato com o pó. Em 1957, em Windscale, na Inglaterra, em uma usina nuclear, observou-se que a concentração de radionucleotídeos (nuclídeo radioativo que emite radiação espontaneamente) estava numa concentração no ar 10 vezes acima do valor normal. E em 1986, o famoso acidente radioativo na Usina de Chernobyl onde foram liberados na atmosfera radionucleotídeos contaminado quase toda a Europa.

### **História das Radiações**

Em 1895, o Professor Wilhem Conrad Roentgen, na Alemanha, por meio de suas experiências, descobriu o Raio-X. Ele estudava descargas elétricas através de um tubo de raios catódicos que são feixes de elétrons. Ao aplicar uma diferença de potencial de algumas dezenas de quilovolts entre os eletrodos do tubo, observou uma fraca luminescência e que estes raios atravessavam tudo, inclusive sua mão. Assim, Roentgen concluiu que o tubo emitia raios muito mais potentes ainda desconhecidos e que podiam até atravessar corpos humanos e sensibilizar filmes fotográficos.

Em 1896, Antonie Henri Becquerel, Professor de Física da Escola Politécnica de Paris, observou que substâncias fosforescentes absorviam luz para depois a reemitirem. Em uma de suas experiências, ele colocou certa quantidade de sulfato de urânio e potássio, um sal de urânio, sobre uma placa fotográfica, embrulhada em papel preto, expondo todo o conjunto à luz solar

durante vários dias, quando o filme foi revelado, a posição do mineral ficou claramente marcada com manchas escuras, estes efeitos só ocorreram porque o sal de urânio emanava raios espontaneamente.

Em 1891, um conhecido casal, Madame Curie e Pierre Curie, em seus estudos, descobriram o elemento químico Tório que emitia raios espontaneamente semelhantes ao urânio, e mais tarde descobriram o Polônio que era 400 vezes mais ativo que o urânio.

Em 1898, Ernest Rutherford concluiu, em seus estudos, que a emissão proveniente de substâncias radioativas era complexa, sendo constituída por pelo menos dois tipos de radiação: um deles, facilmente absorvido - chamado de **radiação alfa** e outro, muito mais penetrante chamado de **radiação beta**, ambos os raios eram desviados por campos magnéticos, só que em direções opostas. Um ano mais tarde, Paul Villard identificou um terceiro tipo de radiação, a **gama** que, ao contrário dos dois primeiros, não sofria deflexão em campos magnéticos.

Entre 1917 e 1924, cerca de 800 moças trabalhavam pintando mostradores e ponteiros de relógios, em uma Indústria em New Jersey, uma solução contendo rádio era utilizada para este fim, ao afinar o pincel nos lábios, dia-a-dia ingeriam esta solução até que em 1950, havia o registro de 41 mortes entre essas moças com destruição de ossos, câncer nos ossos e anemia aplástica.

No século 19, foram muitos os casos de tratamento de diferentes doenças com o uso de radiação, alguns com sucesso e outros levando a morte principalmente por câncer.

## **A Física da Radiação**

Na sequência, serão apresentados alguns termos muito utilizados quando se fala de radiação:

*Radiação é uma forma de energia, emitida por uma fonte e que se propaga de um ponto a outro sob forma de partículas com ou sem carga elétrica, ou ainda sob forma de ondas eletromagnéticas.*



A radiação pode ser dividida em dois tipos:

- h) **Radiação ionizante:** quando a radiação possui energia o suficiente para arrancar um dos elétrons orbitais de átomos neutros, transformando-os em um par de íons.
- i) **Radiação corpuscular:** quando a radiação é constituída de um feixe energético de partículas como os elétrons, pósitrons, prótons, nêutrons.

Um fenômeno que ocorre na radiação é a *desintegração ou decaimento nuclear*, que é quando partículas alfa, por exemplo, são emitidas de núcleos atômicos em busca de uma maior estabilidade energética o resultado desse fenômeno é a transformação em um novo elemento, o primeiro elemento é chamado de elemento pai e o segundo elemento é chamado de elemento filho.

*Meia- vida física:* é o intervalo de tempo no qual metade dos núcleos atômicos de uma amostra radioativa se desintegra, por exemplo, no caso do acidente com o Césio 137, a meia vida do elemento é de 30 anos, ou seja, desde o dia do acidente até 30 anos depois o elemento depositado no solo, terá meia vida via desintegração.

*Meia vida biológica:* é o tempo necessário para que metade dos átomos ingeridos ou inalados seja eliminada biologicamente, independente de eles serem radioativos ou não.

*Partículas alfa:* possuem pouco poder de penetração, apenas conseguindo atingir a superfície da pele humana e são facilmente blindadas com uma folha de papel, entretanto a ingestão ou inalação de radionucleotídeos emissores de partícula alfa pode trazer sérias consequências ao ser humano, uma vez que elas possuem alta densidade de ionização.

*Partículas betas:* são os elétrons e pósitrons, mais penetrantes que a partícula alfa, produzem densidade de ionização menor e possuem um alcance maior que a partícula alfa; para blindar as partículas beta pode-se usar uma placa de alumínio de poucos milímetros de espessura.

*Nêutrons:* São partículas sem carga e não produzem ionização diretamente, mas não muito penetrantes e podem ser blindados com materiais ricos em hidrogênio tais como parafina e água.

*Ondas eletromagnéticas:* são constituídas de campos elétricos e magnéticos oscilantes que propagam no vácuo com velocidade constante, igual a 300 mil km/s que corresponde à velocidade da luz, são exemplos de ondas eletromagnéticas: ondas de rádio, TV, microondas, radiação infravermelho.

*Pessoas contaminadas:* é quando uma pessoa ingere, inala ou sofre contaminação com radionucleotídeos.

*Pessoas irradiadas:* é quando uma pessoa pode estar sujeita à radiação emitida por átomos radioativos de uma pessoa ou local contaminado.

### **Grandezas e Unidades de Física das Radiações**

*Exposição:* é a grandeza que caracteriza o feixe de raios X e gama e mede a quantidade de carga elétrica produzida por ionização, no ar, por essa radiação, por unidade de massa do ar.

*Dose absorvida:* é a energia média cedida pela radiação ionizante à matéria por unidade de massa dessa matéria, usada para medir a radiação absorvida no corpo.

*Dose equivalente:* é utilizada para fins de proteção radiológica, é calculada multiplicando-se a dose absorvida por um fator numérico chamado de fator de qualidade, esse fator considera quanto maior o número de ionizações produzidas por unidade de comprimento maior é o dano.

*Atividade:* é o número de desintegrações nucleares de uma amostra radioativa em uma unidade de tempo.

### **Radiação na Natureza**

Toda vida no planeta está exposta à radiação - nosso corpo, por exemplo, e a cada minuto, cerca de um quarto de um milhão de átomos está se desintegrando e emitindo radiação.

Existem dois tipos de exposição à radiação: a *exposição externa* e a *exposição interna*, vamos ver agora como é que se diferenciam estas exposições.

A *exposição externa* compõe a maior parte da irradiação que recebemos; grande parte dela é composta pela radiação cósmica provinda do espaço interestelar e do topo da atmosfera e a outra parte da irradiação é por radionucleotídeos naturais que emitem radiação gama - estes estão presentes naturalmente na crosta terrestre, por exemplo, as areias monazíticas das praias de Guarapari – ES e minas de urânio em Poços de Caldas.

Já na *exposição interna*, os radionucleotídeos são inalados ou ingeridos principalmente por meio da alimentação no caso de alimentos como o feijão, verduras frescas, leite e castanha do Pará que é uma planta que tem a tendência de concentrar o elemento rádio.

Outro tipo de radiação a que estamos submetidos é a *radiação artificial*, proveniente de artefatos como o Raio X, poeira radioativa resultante de testes ou acidentes nucleares.

Uma forma de se evitar os efeitos nocivos da radiação é a *proteção radiológica*.

Foi somente em 1896 que Elihu Thomson esclareceu sobre os danos que causavam a radiação em sua experiência. O cientista expôs seu dedo mínimo, à radiação de feixes de raio X, diariamente por meia hora. Ao final de uma semana, ele começou a sentir dores e notou uma inflamação em seu dedo exposto, concluindo, assim, que a exposição prolongada ao Raio X levaria a sérios problemas.

Com isso surgiu a necessidade de se estabelecer técnicas e normas para a proteção contra os efeitos da radiação.

Em 1925, ocorreu o Primeiro Congresso de Radiologia que tratou principalmente do estudo e publicação de recomendações a serem aceitas internacionalmente.

Em 1928, no Segundo Congresso em Estocolmo, foi fundada a Comissão de Proteção Radiológica, cuja principal função era a de fornecer guias gerais para o uso de radiação e estabelecer limites máximos para a radiação em trabalhadores.

No Brasil, o órgão responsável pela normatização e legislação do uso da radiologia é a CNEN, que elaborou um caderno com Normas Básicas de Proteção Radiológica.

E por que se proteger?

Os principais objetivos da proteção radiológica é proteger os indivíduos, seus descendentes, e a humanidade contra os efeitos danosos da radiação.

Evitar os efeitos *não estocásticos*, que são definidos pela gravidade do efeito em função da dose de radiação recebida.

Limitar a probabilidade de *efeitos estocásticos*, ou seja, são efeitos que aparecem em qualquer dose de radiação.

Quando se trata de trabalhadores com radiação, existem limites para evitar os efeitos não estocásticos e estocásticos e estes são: nenhum tecido deve receber mais que 500 mSv (unidade da radiação) ao ano com exceção do cristalino dos olhos onde o máximo é permitido é 150 mSv, caso contrário ocorre a formação de catarata e 50 mSv para a radiação uniforme no corpo todo.

Além disto, os trabalhadores devem tomar as seguintes precauções: usar máscaras para evitar a inalação de gases radioativos, lavar as mãos sempre que necessário, utilizar roupas e luvas especiais, permanecer o tempo mínimo possível próximo à fonte de radiação e usar blindagens adequadas.

Um dos grandes fantasmas de era moderna é a radiação ionizante, pois ela é invisível, inaudível, inodora e insípida, ou seja, não conseguimos perceber se fomos ou estamos sendo irradiados e muito menos quando esta exposição poderá levar à morte ou na indução de mutações de material genético dos organismos.

As reações causadas pela radiação ionizante podem ser divididas em quatro estágios que vão desde o primeiro estágio que é dado logo após a incidência da radiação em que ocorre a absorção de energia radiante, passando para o segundo estágio em que as ligações físico-químicas das moléculas do organismo são rompidas, no terceiro estágio no qual, após o rompimento das moléculas, são liberados radicais livres que são altamente reativos, e no último estágio, ocorrendo os efeitos bioquímicos e fisiológicos, que produzem alterações morfológicas e/ou funcionais em horas ou até mesmo em anos.

Para lesar uma molécula, a radiação possui dois mecanismos, o *direto* e o *indireto*: no primeiro caso a radiação age diretamente sobre uma biomolécula, por exemplo, uma molécula de ADN, e isto leva à danificação do material genético; já no segundo caso, a radiação age em

molécula com a da água que leva à decomposição de subprodutos que irão produzir danos biológicos.

Quando se fala em radiação nos organismos biológicos (seres humanos, aves, peixes etc.), pensa-se logo nos efeitos sobre eles. Neste caso, existem dois tipos de efeitos: os *somáticos* que afetam somente a pessoa irradiada e os *efeitos hereditários* que afetam os descendentes desta, principalmente quando as células do óvulo ou testículo forem irradiadas.

Nos organismos, principalmente nos seres humanos, os *efeitos agudos* são observáveis em apenas horas, dias ou semanas após a exposição do indivíduo a uma alta dose de radiação. Quando aparecem cânceres e lesões degenerativas e o indivíduo recebeu baixas doses de irradiação falamos em *efeitos somáticos tardios*.

Não só o homem está exposto à radiação. Sabe-se que entre os vertebrados, os mamíferos são mais sensíveis à radiação e os invertebrados são menos sensíveis, e os organismos unicelulares são mais ainda resistentes.

A radiação nada mais é que a incorporação de um radionucleotídeo pelo organismo. Esta não é uniformemente distribuída; o que ocorre é o acúmulo em certos órgãos, por exemplo, o céσιο-137 acumula-se nos músculos, o iodo-137 acumula-se na tireoide e o estrôncio-90 nos ossos. Por isso, quando se faz tratamento de doenças, utilizando-se radionucleotídeos, é preciso calcular a *dose interna* para cada indivíduo, cálculo este que é obtido a partir de informações físicas e biológicas do indivíduo, e é um cálculo extremamente complexo.

Voltando aos acidentes de Goiânia e Chernobyl, há alguns dados a apresentar:

- em Goiânia 112.800 pessoas foram monitoradas; destas, 1.000 pessoas foram irradiadas externamente, 249 pessoas apresentaram contaminação interna ou externa, 49 pessoas foram internadas, quatro óbitos e uma amputação de membro. Algumas casas e tudo o que havia em seu interior foi destruído. Em Chernobyl, cerca de 300 pessoas foram internadas totalizando 28 mortes, a área ao redor da Usina, de 2.5 km, foi totalmente evacuada.

No caso de Chernobyl a contaminação foi quase de todo o solo europeu e, por meio da cadeia alimentar, a radiação de Chernobyl chegou a todo o mundo inclusive no Brasil quando o leite em pó era importado da Europa principalmente da Dinamarca, com os demais alimentos ocorreu o mesmo fato alguns países como a Malásia e Japão, proibiram a entrada de alimentos europeus, criando uma polêmica em todo o mundo.

O que foi mostrado até agora é o lado negativo da radiação, mas atualmente contamos com tratamentos e aplicações da radiação que trazem benefícios à população humana. Podemos citar:

- 12- as fontes alternativas de energia, esterilização de seringas, agulhas e alimentos;
- 13- na medicina, a radioterapia, com seus aparelhos sofisticados, trata tumores, principalmente os malignos, pois conseguem atingir apenas o órgão ou tecido afetado,
- 14- a radiologia diagnóstica que, por meio de imagens, possibilita a prevenção uma gama de doenças,
- 15- a medicina nuclear que consegue diagnosticar, tratar e estudar doenças.

Enfim, temos muitos exemplos de radiações trazendo benefícios à população e principalmente salvando vidas.

Questões:

1 - Ernest Rutherford concluiu, em seus estudos, que a emissão proveniente de substâncias radioativas pode ser classificada em três tipos, assinale a alternativa correta:

- h) radiação taura, radiação gama e radiação beta
- i) radiação alfa, radiação beta e radiação gama
- j) radiação alfa, radiação estocástica e radiação beta
- k) radiação beta, radiação gama e radiação não estocástica

2 – Assinale a alternativa melhor define a radiação ionizante:

(a) quando a radiação é constituída de um feixe de energético de partículas como os elétrons, pósitrons, prótons, nêutrons

(b) é o tempo necessário para que metade dos átomos ingeridos ou inalados seja eliminada biologicamente

(c) quando a radiação possui energia o suficiente para arrancar um dos elétrons orbitais de átomos neutros, transformando-os em um par de íons.

(d) são os elétrons e pósitrons, é mais penetrante que a partícula alfa, produz densidade de ionização menor e possui um alcance maior que a partícula alfa.

3 - Quando se fala que uma pessoa foi irradiada, o que estamos afirmando:

(a) esta pessoa recebeu uma fonte de luz intensa.

(b) esta pessoa não teve contato com nenhuma fonte de radiação

(c) esta pessoa pode estar sujeita à radiação emitida por átomos radioativos de uma pessoa ou local contaminado.

(d) esta pessoa ingeriu, inalou ou sofreu contaminação com radionucleotídeos.

4 - No acidente em Goiânia- GO, com o Césio-137, a mulher do dono do ferro velho para onde foi vendido o equipamento, ao perceber que seus familiares estavam adoecendo, pegou um pedaço da fonte que foi retirado do interior da cápsula de Raio-X e levou de ônibus para a Vigilância Sanitária de Goiânia, de acordo com os estudos sobre a radiação os efeitos produzidos pela radiação podem ser classificados como:

(a) efeitos somáticos apenas, pois os efeitos apareceram apenas durante 15 dias.

(b) efeitos somáticos e hereditários, os efeitos apareceram no momento do contato com o césio- 137 e tardiamente também, pois os descendentes foram afetados.

(c) nenhum efeito, pois a irradiação do césio-137 é baixa e não provocou nenhum dano à população.

(d) efeitos somáticos, pois os descendentes também foram afetados e efeitos hereditários, pois os efeitos apareceram assim que houve contato com a fonte de radiação.

5 – Podemos definir a radiação como *“nada mais que a incorporação de um radionucleotídeo pelo organismo”*, considere a afirmação verdadeira:

- (a) somente mamíferos são afetados pela radiação.
- (b) os mamíferos assim como os invertebrados são extremamente resistentes a radiação.
- (c) os invertebrados são mais resistentes à radiação em relação aos mamíferos.
- (d) os peixes por estarem na água não são afetados pela radiação.

Resposta das questões:

1 – b, 2- c, 3 – c, 4- b, 5 - c

14. RESNICK, Robert; HALLIDAY, David; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2009. v. 1, 2, 3 e 4.

Este livro foi, a princípio, escrito para estudantes de ciências e engenharia de 1960. Foi atualizado para incluir os mais recentes progressos em Física e na sua pedagogia. O presente volume inicia-se com a natureza e a propagação da luz e termina com a física das partículas e a cosmologia.

#### Natureza e Propagação da Luz

Não há nada em sua natureza fundamental que distinga a luz de qualquer outra onda eletromagnética. O que distingue a luz de outras ondas eletromagnéticas são os nossos receptores (olhos), que são sensíveis à radiação eletromagnética, e somente numa estreita faixa de comprimento de onda, desde aproximadamente 400nm (violeta) até cerca de 700nm (vermelho). Neste capítulo, discutimos algumas das características das ondas luminosas, incluindo as fontes de radiação visíveis, a velocidade da propagação no vácuo e na matéria e o efeito Doppler para a luz, que ocorre quando a fonte e o observador estão em movimento relativo.

Os capítulos posteriores tratarão da ótica, dando prosseguimento ao nosso estudo da propagação da luz. A velocidade da luz na matéria é dada por

$$n = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \frac{C}{C} \quad C = 299.792.458 \text{ m/s, onde:}$$



$\epsilon_0$  corresponde à constante dielétrica e ao cte de permissividade;  $\mu_0$  corresponde ao cte de permeabilidade relativa (para materiais magnéticos);  $\epsilon_0 \mu_0$  corresponde ao cte do campo magnético na matéria.

O efeito doppler para a luz dá-se por

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 + \mu/c}{1 - \mu/c}} \neq v = v_0 (1 + \mu/v) \delta$$

onda sonora, fonte fixa, observador se aproximando) 1-me ã onda de luz, fonte e observador se aproximando.

O efeito Doppler relativístico leva em consideração dois postulados de Einstein e as equações da transformação de Lorentz. As consequências importantes do efeito Doppler relativístico são: o deslocamento para o vermelho e o deslocamento da frequência, que pode ser usado para rastrear satélites.

### **Reflexão e Refração em Superfícies Planas**

Quando falamos em Ótica, referimo-nos ao estudo das propriedades da luz e sua propagação através dos vários materiais. Aplicações tradicionais da Ótica incluem lentes corretivas para a visão e a formação de imagens pelos telescópios e microscópios. Aplicações modernas abrangem o armazenamento e a recuperação de informações, tais como toca-discos de CD (discos compactos) ou leitoras de código de barras em supermercados, ou a transmissão de sinais através de cabos de fibras óticas, que podem transportar uma densidade maior de informações do que os fios de cobre e são mais leves e menos suscetíveis à interferência eletrônica.

Neste capítulo e no seguinte, consideramos casos em que a luz se propaga em linha reta e encontra objetos cujas dimensões são muito maiores do que seu comprimento de onda da luz. Este é o domínio da ótica geométrica, que inclui os estudos das propriedades, dos espelhos e das lentes. O estudo da passagem de luz através de fendas muito estreitas ou em torno de obstáculos muito estreitos, cujas dimensões podem ser comparáveis ao comprimento de onda, constitui uma parte da Ótica Física (ou Ótica Ondulatória).

A reflexão e a refração são governadas pelas leis de Snell Descartes, inclusive para ondas eletromagnéticas, incluindo as equações de Maxwell. As deduções das leis da reflexão e da refração podem ser obtidas por dois métodos: o de Huygens e o de Fermat.

Ao espelho plano, a nossa experiência ótica mais comum, cabe o estudo da reversão de imagens. A reflexão interna total, originária de uma fonte pontual S, ocorre para todos os ângulos de incidência maiores do que o ângulo crítico.

### **Espelhos e Lentes Esféricas**

A reflexão e a refração em superfícies planas, consideradas no capítulo anterior, são de utilidade limitada em instrumentos óticos, porque são incapazes de transformar luz divergente em luz convergente. A luz divergente, como a que vem de uma fonte puntiforme, permanece divergente depois da reflexão em um espelho plano ou após a refração através de uma fronteira plana entre dois meios transparentes.

Neste capítulo, analisaremos a formação de imagens por lentes e espelhos esféricos. Através de métodos algébricos ou gráficos, é possível encontrar a posição da imagem e determinar o seu tamanho em relação ao objeto original. Exemplos, incluindo o microscópio e o telescópio, mostram como esses princípios podem ser usados para o projeto de sistemas óticos, que estendem o alcance da visão humana ao muito pequeno ou ao muito distante.

A partir das equações dos espelhos, da convenção de sinais, do traçado dos raios e das superfícies refratoras esféricas, pode-se desenvolver um estudo das várias posições e natureza das imagens. As lentes delgadas exigem um estudo maior, por permitirem a construção de lentes de contato e lentes de óculos, além de conduzirem a construção de sistemas óticos compostos, como binóculos, telescópios e microscópios.

### **Interferência**

Os dois capítulos anteriores trataram da ótica geométrica, onde a luz encontra obstáculos ou aberturas (lentes, por exemplo) de dimensões muito maiores do que o comprimento de onda da luz. Neste e no próximo capítulo, examinaremos os fenômenos de interferência e difração, onde a luz encontra obstáculos ou aberturas cujos tamanhos são comparáveis ao seu comprimento de onda. Este é o domínio da Ótica Física (também conhecida como Ótica Ondulatória), que difere da Ótica Geométrica por envolver efeitos que dependem da natureza ondulatória da luz.

De fato, é a partir de experiências de interferência e difração que obtemos provas de que a luz comporta-se (ao menos nessas circunstâncias) como uma onda, em vez de um fluxo de partículas (como Newton acreditava). Embora ocupemo-nos somente com

ondas luminosas neste capítulo, todos os outros tipos de ondas (tais como ondas sonoras na água) também podem experimentar interferência e difração. Por exemplo, na disposição de alto-falantes em uma sala, é necessário considerar a interferência e difração de ondas sonoras. Os princípios que desenvolvemos para ondas luminosas aplicam-se igualmente a outros tipos de ondas.

Para isso, faz-se necessário desenvolver o estudo da interferência com fendas duplas, considerando-se os seus máximos e mínimos, como fez Thomas Young, em 1801. O que nos leva à coerência é a intensidade na interferência em fenda dupla e películas finas.

Quando falamos em Reversibilidade Ótica e Mudança de Fase na Reflexão, falamos de um fenômeno que nos conduz a G. G. Stókes (1819-1903) e a sua investigação da reflexão da luz na interface entre dois meios. O princípio afirma que, se não houver absorção da luz, o raio de luz refletido ou refratado percorre o caminho inverso se o seu sentido for revertido.

Observação: Interferômetro - instrumento que pode ser usado para medir comprimento ou variações de comprimento com grande precisão.

## **Difração**

Difração é o desvio de ondas que encontram um objeto (uma barreira ou uma abertura) no seu caminho. Este capítulo trata apenas da difração de ondas de luz, mas a difração ocorre com todos os tipos de ondas. As ondas sonoras, por exemplo, são difratadas por objetos comuns e, como resultado, podemos ouvir sons mesmo que não estejamos alinhados com suas fontes. Para que a difração ocorra, o tamanho do objeto deve ser da ordem do comprimento de onda das ondas incidentes. Quando o comprimento de onda é muito menor do que o tamanho do objeto, a difração geralmente não é observada e o objeto projeta uma sombra bem definida.

Os padrões de difração consistem em bandas claras e escuras, semelhantes a padrões de interferência. Estudando esses padrões, podemos obter informações acerca do objeto que provoca a difração. Por exemplo, a difração de raios-X é um método importante no estudo da estrutura dos sólidos e a difração de raios-gama é empregada no estudo dos núcleos. A difração também apresenta efeitos indesejáveis, como a dispersão da luz quando penetra a abertura de um telescópio, limitando sua capacidade de resolver ou separar estrelas que parecem estar próximas umas das outras. Estes vários efeitos da difração serão analisados neste capítulo e no seguinte.

Os presentes processos e fenômenos que englobam a teoria ondulatória da luz, como quando frentes de ondas luminosas coerentes incidem sobre uma barreira opaca B, que contém uma abertura de forma arbitrária, ocorrendo a difração, permitem o estudo com separação entre telas muito pequenas, muito grandes e intermediárias.

A difração na fenda única e na abertura circular, assim como na fenda dupla, permite aumentar o conhecimento da difração.

## Redes de Difração e Espectros

No capítulo 45, discutimos o padrão de interferência produzido quando uma luz monocromática incide sobre duas fendas: um módulo bem definido de bandas claras e escuras (franjas de interferência). Cada uma das fendas é considerada como um radiador elementar. Primeiro, precisamos considerar a largura da fenda muito menor do que o comprimento de onda da luz; assim, a luz difratada em cada fenda iluminará uniformemente o anteparo. Depois, levamos em conta a largura da fenda e determinamos o fator de difração que modula o padrão de interferência.

Neste capítulo, estendemos nossa discussão para casos em que o número de radiadores elementares, ou centros de difração, é maior (frequentemente muito maior) do que dois. Consideraremos arranjos múltiplos de fendas em um plano e também arranjos tridimensionais de átomos em um sólido (para os quais usaremos raios-X em vez de luz visível).

Em ambos os casos, precisamos distinguir, cuidadosamente, as propriedades de difração de um radiador simples (uma fenda ou um átomo) e a interferência de ondas coerentes difratadas, produzidas por um grupo de radiadores. O estudo se dá pela compreensão das fendas múltiplas: uma extensão lógica da interferência com duas fendas aumenta este número para um número  $N$  maior (um arranjo de fendas ou rede de difração, onde  $N$  pode ser tão grande quanto 10). O processo de traçar redes é chamado de blazing. Atualmente, a maioria das redes é deste tipo.

A dispersão e poder de resolução pela habilidade de uma rede, para produzir espectros que permitem medidas precisas de comprimento de onda, é determinada por duas propriedades intrínsecas da rede: 1) a separação entre linhas espectrais e 2) a largura (ou nitidez) das linhas.

Especificando a difração de raios-X, temos que são radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda da ordem de  $0,1\text{nm}$ . Em 1912, ocorreu, ao físico Max Von Laue, que um sólido cristalino, constituído por um arranjo regular de átomos, poderia formar uma rede de difração natural, tridimensional para raios-X ( $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ ).

A partir desses conhecimentos, foi possível constituir aparelhagens para produzir holografia (a luz emitida por um objeto que contém as informações completas sobre o seu tamanho e forma).

## Polarização

É possível compreender a polarização a partir do conceito de que as ondas eletromagnéticas se propagam com o campo elétrico  $E$  e com o campo magnético  $B$ , perpendiculares um ao outro, e também à direção de propagação da onda. Isto equivale dizer que as ondas eletromagnéticas são transversais. Esta característica das ondas pode se deduzir a partir das equações de Maxwell. Em muitas experiências, a

natureza transversal dessas ondas não tem nenhuma influência sobre os resultados. Por exemplo, reflexão, interferência e difração ocorrem tanto com ondas longitudinais (como as ondas sonoras, por exemplo), quanto com ondas transversas. Em 1817, Thomas Young (que também concebeu e realizou a famosa experiência de difração e interferência da luz com fenda dupla), baseando-se em experimentos feitos pelos seus contemporâneos Arago e Fresnel, com o fenômeno que denominamos hoje em dia dupla refração, estabeleceu as bases experimentais para a descoberta da natureza transversal das ondas luminosas.

Neste capítulo, vamos considerar a polarização da luz e das outras ondas eletromagnéticas. Associaremos a direção do campo elétrico  $E$  da onda ao da polarização. Discutiremos os diferentes tipos de polarização, incluindo a linear e a circular, e também as técnicas experimentais utilizadas para produzir e detectar luz polarizada.

A característica básica de uma onda transversal tem os vetores  $E$  e  $B$  perpendiculares entre si e à direção de propagação da onda. A direção de polarização é definida por convenção como sendo a do campo elétrico da onda. O plano determinado pelo vetor  $E$  (direção da onda) é chamado de plano de polarização da onda, que nos leva a lâminas polarizadas, polarização por reflexão e dupla refração.

Uma analogia mecânica, em termos da estrutura atômica dos cristais opticamente anisotrópicos, refere-se às propriedades mecânicas (plano de clivagem), elétricas e magnéticas. Ondas luminosas, com polarizações cruzadas e com velocidades diferentes, podem existir e permitir oscilações periódicas forçadas, retransmitindo a onda luminosa.

A ação das forças restauradoras, no interior do cristal, é a mesma para todas as orientações do plano de polarização das fendas que se propagam em uma corrente como essa. Essas considerações nos permitem entender mais claramente os estudos de polarização da luz representados pela superfície de onda dupla. Para superfície esférica elipsoidal, necessita-se de outras considerações quanto ao vetor  $E$ .

O espalhamento da luz, utilizando um gás, pode ser total ou parcialmente polarizado, mesmo que a luz incidente não seja polarizada. Podemos considerar polarização e espalhamento, alternativa e complementarmente, como a descrição quântica em que as propriedades da radiação estão associadas não aos campos, mas aos quanta individuais de radiação (fótons).

Até aqui, nos dedicamos ao estudo da radiação — incluindo não só a luz, mas todo o espectro eletromagnético —, abordando os fenômenos da reflexão, refração, interferência, difração e polarização que podem ser entendidos ao se tratar a radiação como uma onda. A evidência a favor deste comportamento ondulatório é indiscutível.

Vamos, agora, nos voltar para uma direção inteiramente nova e analisar experiências que só podem ser entendidas com uma hipótese completamente diferente sobre a radiação eletromagnética, onde ela se comporta como um fluxo de partículas.

Os conceitos de onda e partícula são tão diferentes que é difícil compreender como a luz (e qualquer outra radiação) pode se comportar destas duas maneiras. Numa onda, por exemplo, a energia e o momento se distribuem uniformemente por toda frente de onda, enquanto num fluxo de partículas estas grandezas se concentram em pacotes. Mas isto é uma discussão sobre o comportamento dual da radiação eletromagnética. Não vamos nos preocupar com este problema agora, mas sim nos limitar a investigar a forte evidência experimental que aponta para a natureza corpuscular da radiação. Este assunto inicia nosso estudo da Física Quântica e nos levará a uma melhor compreensão da estrutura fundamental da matéria.

A radiação térmica são os filamentos das lâmpadas incandescentes, das fogueiras. Ainda que vejamos tais objetos pela luz visível que emitem, eles emitem também radiação na região infravermelha. É curioso que a Física Quântica que governa a concepção moderna do mundo à nossa volta origine-se do estudo sob condições controladas em laboratório, das radiações emitidas por objetos aquecidos. Foi a Física Quântica que deu origem à radiação da cavidade ou radiação do corpo negro, à lei de Stefan Boltzmann, à radiação espectral e à lei de deslocamento de Wien, até chegar à constante de Planck:  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ . A hipótese da quantização da energia é de fato radiada. Os osciladores atômicos não podem emitir ou absorver qualquer energia  $E$ , mas somente energias selecionadas de um conjunto discreto, definido por  $E = nh\nu$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Einstein acabou por referendar a quantização da energia quando mostrou que as mesmas ideias que tinham funcionado tão bem para o problema da radiação da cavidade poderiam ser usadas para resolver outro problema, o da capacidade calorífica de um sólido; a ideia ganhou o mundo científico a partir de então. O efeito fotoelétrico envolve a constante de Planck de um modo fundamental e expande o conceito de quantização à natureza da radiação propriamente dita. Confirma, ainda, a limitação da teoria clássica ondulatória quanto aos problemas do efeito fotoelétrico: o problema da intensidade, da frequência e do retardo no tempo.

### **A teoria de Einstein sobre o fóton, 1905**

Einstein fez uma suposição notável sobre a natureza da luz. Sob certas circunstâncias, ela se comporta como se sua energia estivesse concentrada em pacotes localizados, posteriormente denominados fótons. A energia  $E$  de um fóton é dada por  $E = h\nu$ .

Aplicando-se o conceito de fóton de Einstein ao efeito fotoelétrico, podemos escrever  $h\nu = (j) + K_{\text{máx}}$ . O efeito Compton, que envolve o espalhamento da radiação por átomos, pode ser compreendido em termos de colisões, como as das bolas de bilhar, entre fótons e elétrons e à terceira forma de interação da radiação com a matéria.

Os resultados experimentais do efeito fotoelétrico e do Compton fornecem uma evidência incontestável da existência do fóton ou da natureza corpuscular da radiação eletromagnética, em função dos espectros (espectros de raios), que resultam da emissão ou da absorção da radiação, e dos componentes individuais (linhas espectrais).

## **Natureza Ondulatória da Matéria**

Foram raras as vezes em que os físicos se enganaram ao confiar nas simetrias da natureza. Por exemplo, depois de sabermos que um campo magnético variável produz um campo elétrico, faz sentido pensarmos (e de fato é verdade) que um campo elétrico variável produza um campo magnético. Sabia-se que o elétron possuía uma antipartícula (uma partícula da mesma massa, mas de carga oposta) e podia-se imaginar que o próton também tivesse uma antipartícula. Para confirmar esta hipótese, construiu-se um acelerador de prótons, com uma energia adequada; o antipróton foi descoberto.

No capítulo anterior, discutimos as propriedades corpusculares da luz e de outras radiações que, tradicionalmente, são tratadas como ondas. Baseados na simetria, somos todos levados a fazer a seguinte pergunta: Será que a matéria, que tradicionalmente é analisada como um conjunto de partículas, possui propriedades ondulatórias?

Neste capítulo, mostraremos que a matéria é conhecida como Mecânica Ondulatória, um caso particular da Mecânica Quântica. Como veremos nos capítulos seguintes, a Mecânica Quântica fornece os meios para se compreender o comportamento fundamental dos sistemas físicos, desde os sólidos até os quarks. A natureza ondulatória da matéria é evidenciada através de diversas experiências que utilizam tipos muito diferentes de partículas e diferentes sistemas de fendas e de detectores e, ainda assim, todos eles têm uma característica em comum: as partículas parecem estar sofrendo uma espécie de interferência. O comprimento de onda de Broglie é uma conexão entre uma propriedade ondulatória da radiação e da matéria.

### **Ondas: pacotes de onda e partículas**

A diferença básica entre estes dois pontos de vista é que a posição de uma partícula pode ser localizada tanto no espaço quanto no tempo, mas uma onda não, pois está distribuída ao longo destas duas dimensões. Foi isto que gerou as relações de incerteza de Heisenberg, que concluiu que uma partícula não pode ser descrita por um pacote de onda onde tanto a posição quanto o momento linear varia dentro de faixas

arbitrariamente pequenas. Não é possível determinar, ao mesmo tempo, a energia e a coordenada temporal de uma partícula com precisão ilimitada.

Max Born propôs a função de onda  $\Psi$  para um feixe de partículas. Passamos, então, a analisar a natureza da onda. As ondas numa corda e as ondas sonoras são governadas pelas leis da mecânica newtoniana; as ondas eletromagnéticas são previstas e descritas pelas equações de Maxwell. Em 1926, Erwin Schrödinger, inspirado pelo conceito de De Broglie, construiu uma teoria notável, que governa a variação da função de onda  $\Psi$  no espaço e no tempo. Abriu caminho para estudar partículas confinadas e densidade de probabilidade, tunelamento através de barreiras e o princípio da correspondência, resolvido por Bohr, que pode ser enunciado, em linhas gerais, como a teoria quântica que deve concordar com a teoria clássica no limite dos grandes números quânticos.

## **A Estrutura do Hidrogênio Atômico**

Desde que se descobriu que a matéria era composta de átomos, a questão fundamental foi descobrir como é um átomo. Nosso propósito, neste capítulo, é responder a esta questão do ponto de vista da Mecânica Ondulatória. Entender a estrutura dos átomos é essencial, se quisermos compreender como os átomos se juntam para formar moléculas e sólidos. Tanto a química, quanto a física do estado sólido, dependem do conhecimento da estrutura atômica, obtida através da Mecânica Ondulatória.

Começamos, neste capítulo, com o hidrogênio, que é, ao mesmo tempo, o mais simples e o mais abundante átomo do universo. A compreensão do modo como os princípios da Mecânica Ondulatória determinam a estrutura do hidrogênio nos leva a aplicar considerações semelhantes para explicar a estrutura de átomos mais complexos, o que faremos no próximo capítulo. Por causa de sua simplicidade, o hidrogênio tem a vantagem de suas propriedades poderem ser calculadas com exatidão, o que permitiu a comparação entre a previsão e a experiência para uma grande variedade de teorias físicas, desde a Mecânica Quântica, nos anos 20, até a Eletrodinâmica Quântica, nas décadas de 40 a 50.

A teoria de Bohr nos conduziu ao postulado dos estados estacionários (o átomo de hidrogênio poderia existir por um longo tempo, sem emitir radiação) e ao postulado da frequência (o átomo de hidrogênio somente poderia emitir e absorver radiação quando passasse de um desses estados estacionários para outro), o que nos limita a compreensão da estrutura do hidrogênio atômico e de íons como um único elétron, quando se trata de compreender detalhes além dos comprimentos de onda das linhas espectrais. Porém, com a equação de Schrödinger e com o princípio da exclusão, pode-se aprofundar esta compreensão. Por ser o átomo de hidrogênio um sistema tridimensional, a equação de Schrödinger deve ser resolvida em três dimensões. Por causa da forma de energia potencial, é mais conveniente resolver este problema em coordenadas esféricas, o que envolve o momento angular e o momento angular orbital



e magnético. A experiência de Stern-Gerlach trata da quantização espacial, isto é, da noção de que um vetor momento angular atômico  $L$  ou um vetor momento dipolo magnético  $u$  só pode possuir um conjunto discreto de projeções sobre um eixo determinado. Isto nos leva ao Spin do elétron, denominado momento angular intrínseco: abundância e simplicidade, possibilitando a contagem dos estados do átomo de hidrogênio, o seu estado fundamental, o estado excitado e os detalhes da estrutura atômica (estrutura fina e efeito Zeeman).

## **Física Atômica**

Nos três capítulos anteriores, desenvolvemos as bases da mecânica ondulatória e utilizamos seus princípios para entender a estrutura do átomo de hidrogênio. Neste capítulo, ampliamos este desenvolvimento, considerando a estrutura de átomos além do hidrogênio.

Começamos considerando a emissão de raios-X pelos átomos, que historicamente forneceu o primeiro processo definitivo para medir o número de elétrons em um átomo. Depois, consideramos as regras que determinam a construção de átomos com mais de um elétron e também como estas regras e estrutura resultante determinam a disposição dos elementos na tabela periódica. Utilizamos a informação proveniente da estrutura atômica para analisar o funcionamento do laser de helio neônio, e concluímos este capítulo com um breve exame sobre a maneira pela qual podemos ampliar nosso conhecimento da estrutura atômica e das funções de onda, para compreendermos a estrutura das moléculas. O espectro contínuo dos raios-X abre caminho para aplicações de diagnósticos e terapia, razão mais do que suficiente para aprofundar o conhecimento de onda, do espectro característico dos raios-X e da frequência. Moseley, por meio de uma série brilhante de experiências, mostrou que as frequências características dos raios-X aumentavam regularmente com o número atômico de um elemento, processando, assim, uma assinatura indelével.

Desde que se cumpra com o princípio do número quântico, com o princípio da exclusão de Pauli e com o princípio da energia mínima, pode-se prever qualquer elemento químico da tabela periódica.

O laser tem, como característica definida, a luz altamente monocromática e coerente e altamente direcional, podendo ser facilmente focalizada. Tem base teórica na emissão estimulada, contemplando o trabalho de Einstein sobre o advento do laser, em 1960. Um laser funciona em três níveis:

- do nível E3, átomos que decaem rapidamente para um estado de energia E2;
- do nível E2, átomos que dão origem à luz laser em estado metaestável, que, se adequada, torna-os mais densamente populosos e depois decai para o nível E1;
- nível E1, aonde se cria a inversão da população necessária.

## Condução Elétrica nos Sólidos

Nos dois capítulos anteriores, vimos como a teoria quântica funciona bem quando aplicada aos átomos isolados. Neste, mostramos que esta poderosa teoria funciona igualmente bem quando a aplicamos a conjuntos de átomos agrupados na forma de sólidos.

Todo sólido possui uma enorme quantidade de propriedades que podemos examinar. Ele é macio ou duro? Pode ser martelado até tornar-se uma folha fina ou pode ser esticado, formando um fio? É transparente? Que espécies de ondas se propagam através dele e a que velocidades? Conduz calor? Quais são as suas propriedades magnéticas? Qual é a sua estrutura cristalina? E assim por diante. Em cada um desses casos, gostaríamos de usar a teoria quântica para compreender as propriedades que medimos.

Neste capítulo, focalizamos uma propriedade dos sólidos, em particular, a condução de eletricidade. Discutiremos a classificação dos sólidos em condutores, isolantes, semicondutores e supercondutores e mostraremos como a teoria quântica fornece a estrutura necessária para que possamos compreender porquê alguns materiais se comportam de uma forma e outros de outra. Os elétrons de condução num sólido qualquer, se comportam como um gás (quântico) de elétrons livres. Porém, esta hipótese nunca é estritamente verdadeira; quando lidamos com metais, precisamos da distribuição de Fermi para a velocidade. Sem campo elétrico, os estados situados até a velocidade de Fermi estão preenchidos. Quando um campo elétrico  $E$  é aplicado na direção e sentido indicados, a distribuição se desloca, pois os elétrons são acelerados pelo elétron.

As bandas e lacunas nos sólidos sugerem a variação de energia potencial, para descrever um elétron de condução num metal. A característica principal dos condutores, isolantes e semicondutores dá-se pelas suas bandas e lacunas com níveis de energia, e preenchidas ou vazias. Semicondutores dopados pela introdução deliberada de um pequeno número de átomos substitutos adequados, que atuam como impurezas na rede do semicondutor, são chamados de extrínsecos.

A junção pn é um dispositivo que permite a fabricação de dispositivos semicondutores complexos sob medida, para atenderem a uma necessidade específica, porque, embora possa ser utilizada de muitas maneiras, ela é formada por diodos emissores de luz (LEDA). Exemplos de sua utilização são os painéis de bombas de gasolina, as máquinas registradoras e outros. O transistor é um dispositivo com três ou mais junções, funcionando com uma corrente estabelecida entre dois terminais, regulada por uma corrente ou voltagem no terceiro terminal (n-p-n ou p-n-p).

A supercondutividade dos supercondutores resulta de um forte acoplamento entre elétrons de condução e a rede, a partir de uma temperatura crítica. A densidade de estados num supercondutor dá-se abaixo da temperatura de transição. Existe uma lacuna de energia igual a  $2\Delta$ , dentro da qual a densidade de estados é zero. Tipicamente, a energia de Fermi  $E_F$  é de alguns poucos elétron-volt, enquanto que a lacuna de emparelhamento varia entre 10 e 10 V.

## Física Nuclear

No interior do átomo encontra-se seu núcleo, que ocupa somente 10% do volume do átomo, e é responsável pela maior parte de sua massa, bem como a força que mantém o átomo coeso. O próximo objetivo em nosso estudo da física é compreender a estrutura do núcleo e a subestrutura de seus componentes. Nossa tarefa é bastante facilitada pelas várias semelhanças existentes entre o estudo dos átomos e o dos núcleos. Ambos os sistemas são governados pelas leis da Mecânica Quântica. Assim como os átomos, os núcleos têm estados excitados, que podem decair para o estado fundamental por emissão de fótons (raios-gama). Como veremos, em certas circunstâncias, os núcleos podem apresentar efeitos de camadas que são muito semelhantes aos dos átomos. Notaremos também que existem diferenças entre o estudo dos átomos e o estudo dos núcleos, o que nos impede de obtermos um entendimento dos núcleos tão completo como o que temos dos átomos.

Neste capítulo, estudaremos a estrutura dos núcleos e seus constituintes. Consideramos algumas técnicas experimentais para estudarmos as propriedades dos núcleos e concluímos com uma descrição da base teórica, necessária para a compreensão do núcleo.

Quando a Física Nuclear deu seu ponta pé, iniciou-se a descoberta do núcleo atômico em um aparato de folhas metálicas delegadas por Ernest Rutherford (1911). Houve, então, uma deflexão para trás da partícula  $\alpha$ , derrubando-se o modelo de átomo proposto por J. J. Thomson (1897). Algumas propriedades governam a sistemática nuclear. O número Atômico  $Z$  e o número de nêutrons  $N$  são uma espécie nuclear de partículas, governadas por uma força nuclear de curto alcance, por uma massa nuclear e uma energia de ligação que se interrelacionam, porque a queda da curva de energia de ligação para números de massas grandes nos diz que os núcleons estão ligados de modo mais forte, quando reunidos em dois núcleos de massas intermediárias do que quando num único núcleo de grande massa. Em outras palavras, energia pode ser liberada, pela fissão nuclear de um único núcleo de grande massa, em dois fragmentos menores.

O Spin nuclear e o magnetismo: os núcleos, a semelhança dos átomos, também possuem momento angular.

Decaimento radioativo é a emissão espontânea de uma partícula. Uma grandeza de especial interesse é o intervalo de tempo, denominado meia-vida de radioisótopo.

O decaimento alfa é caracterizado pela energia cinética de recuo do núcleo residual, com base teórica no tunelamento da barreira. A Física Quântica explica o decaimento alfa.

O decaimento beta ocorre pelo decaimento espontâneo, pela emissão de um elétron (positivo ou negativo). Nesta emissão, inclui-se a captura de elétron, onde um núcleo decai pela absorção.

As medidas da radiação são o curie (para taxa de decaimento), o roetgen (medida da exposição), o rad (medida da radiação absorvida) e o rem (para medir a dose equivalente).

A radioatividade natural está ligada a alguns isótopos radioativos produzidos pela natureza, como cádmio 113 ou renonio 187. A datação radioativa é utilizada para determinar a idade de uma amostra através do decaimento de um isótopo. As reações nucleares ocorrem através de um núcleo projétil e um núcleo alvo, dadas pela equação  $x+a^y+b$ .

Modelos nucleares foram desenvolvidos, pela ausência de uma teoria compreensiva da estrutura nuclear. Prevaecem hoje, dois modelos complementares: o modelo coletivo, que descreve situações em que podemos considerar todos os prótons e nêutrons interagindo fortemente entre si, de modo cooperativo, e o modelo da partícula independente, despreza tais interações e considera que cada nucleon se mova, essencialmente sem colisões, em uma órbita quantizada.

## **Energia Nuclear**

Podemos extrair energia útil de um sistema de partículas que interagem entre si, quando o sistema passa para um estado de energia mais baixa (isto é, um estado mais fortemente ligado). Em um sistema atômico, é possível extrair essa energia por meio de reações químicas, tais como a combustão. Em um sistema nuclear, podemos extrair a energia de vários modos. Por exemplo, a energia liberada de certos decaimentos radioativos vem sendo usada para fornecer potência elétrica tanto ao marca-passos cardíaco quanto às sondas espaciais. Neste capítulo, consideramos os dois procedimentos básicos que são usados para extrair energia do núcleo e convertê-la em fins úteis. Na fissão nuclear, um núcleo pesado é separado em dois fragmentos. Na fusão nuclear, dois núcleos leves são combinados para formarem um núcleo mais pesado. Cada um desses processos pode resultar em núcleos mais fortemente ligados e, por isso, podem liberar o excesso de energia da ligação nuclear para ser convertida em outras formas de energia. Reatores que utilizam a fissão nuclear fornecem, atualmente, parte da energia elétrica mundial. A pesquisa e engenharia estão voltadas para desenvolver reatores que utilizem a fusão nuclear. A teoria da fissão nuclear foi desenvolvida por Niels Bohr e John Wheeler, logo após a sua descoberta, que especificou as suas principais características: quando um núcleo de Urânio-235 absorve um nêutron térmico, ele forma um núcleo de Urânio-236 com excesso de energia, oscila violentamente e, após, a oscilação produz um estrangulamento no núcleo. As forças coulombianas alongam o sistema e finalmente ocorre a fissão, com a produção de fragmentos que se afastam. Ocorre, então, a evaporação de nêutrons rápidos.

## **Reatores nucleares**

Alguns princípios básicos precisam ser seguidos para se projetar os reatores nucleares. Três dificuldades solúveis são criadas:

- 1) O problema do vazamento de nêutrons solúvel fazendo uma relação superfície/volume;
- 2) O problema da energia do nêutron, cuja solução simples é usar o moderador;
- 3) O problema da captura de nêutrons.

Os projetistas, com base nessas dificuldades, propõem uma disposição geométrica do combustível e do moderador que seja a mais eficiente possível. Curioso é saber da ocorrência de um reator natural, há dois bilhões de anos, com a fissão espontânea no Galvão da África Ocidental.

### **Fusão Termolecular**

A maior dificuldade no processo básico da fusão termolecular está na combinação de dois núcleos leves, que precisam vencer a repulsão mútua de coulomb. O segredo está em usar um dos núcleos como alvo e acelerar o outro por meio de um ciclotron, para gerar energia. Em média, um em cada 42.000 encontros dará origem à fusão. Outras fusões também ocorrem, como a fusão termolecular das estrelas e a fusão termolecular controlada. Para que esta última ocorra com segurança, é preciso cumprir-se três exigências: 1) alta densidade  $n$  de partículas (plasma), 2) alta temperatura  $T$  do plasma e 3) longo tempo de confinamento magnético (Tokamak) do campo toroidal. Uma segunda técnica opcional que é o confinamento inércia (a fusão a laser já é usada no mundo todo).

### **Física das Partículas e Cosmologia**

As pesquisas em física das partículas são geralmente realizadas em aceleradores, onde um feixe de partículas que se movem com velocidades próximas à velocidade da luz (e que têm, portanto, energias cinéticas muito maiores do que suas energias de repouso) incide sobre um alvo, geralmente constituído de prótons. Em outros aceleradores, dois feixes de partículas de alta energia, que se movem em sentidos opostos, são postos em contato. As colisões das partículas individuais causam reações em que dúzias, ou talvez centenas, de novas partículas são produzidas. Algumas destas partículas têm uma existência limitada a períodos curtos inconcebíveis, geralmente menores do que 10s. Todavia, os físicos podem monitorar estas partículas e estudar suas propriedades. É principalmente por meio deste processo que obtemos informação acerca dos constituintes fundamentais da matéria.

Os astrofísicos utilizam um método muito diferente para desvendar os segredos do Universo. A partir de observações realizadas por meio de telescópios e detectores, que são sensíveis a radiações de todas as partes do espectro eletro-magnético, eles tentam olhar para trás no tempo, tentando obter informações acerca do Universo,

quando este era ainda muito jovem, e também projetam suas conclusões no futuro, para tentar compreender sua evolução subsequente. Estas investigações fazem parte da Cosmologia, o estudo da origem e da evolução do Universo.

Pode parecer surpreendente que tenhamos agrupado estes dois ramos de estudo tão diferentes num único capítulo. Como veremos, as medições de partículas realizadas pelos físicos podem nos dizer muito a respeito da estrutura do Universo, logo após o seu nascimento, e as conclusões dos cosmologistas podem estabelecer limites sobre a variedade de partículas fundamentais e sobre as interações entre elas.

Embora estejam em extremos opostos, na escala das observações, a física das partículas e a cosmologia andam de mãos dadas para promover a compreensão da estrutura do Universo,

A física das partículas é governada por quatro forças básicas: a gravitacional, a fraca, a eletromagnética e a interação forte. Porém, ainda que esforços homéricos tenham sido desenvolvidos para uni-las, ainda não se foi possível. As partículas possuem, ainda, algumas familiaridades: o Lépton com interações fracas e eletromagnéticas, os Mesons com interações fraca, eletromagnéticas e fortes e os Bárions com interações fracas, eletromagnéticas e fortes. Todas as famílias obedecem às leis de conservação da energia e do momento linear, o que permite compreender a geração de números nas famílias. Como em qualquer processo, o número leptônico dos léptons do tipo elétron, do tipo múon e do tipo tau deve permanecer constante.

Porém, existem processos difíceis, como a lei da conservação da estranheza, que interferem nas interações.

O aspecto mais incomum é o fato de os quarks apresentarem cargas elétricas fracionárias, pois todas as partículas descobertas até agora possuem cargas elétricas que podem ser expressas como múltiplos inteiros da unidade fundamental de carga  $E$ .

A cosmologia do Big Bang propõe a expansão do universo e a radiação de fundo na faixa de micro-ondas serve como evidência do ocorrido. O conceito nucleossíntese refere-se à formação dos elementos do universo atual. Este termo serve para englobar várias teorias, como: nucleossíntese do Big Bang, nucleossíntese em reações de fusão e nucleossíntese por captura de nêutrons.

Parece claro que tanto a estimativa sobre a idade do universo, baseada na nucleossíntese, quanto a cosmologia, fornece valores para idade do universo consistentes, com o intervalo de  $1 - 15 \times 10^9$  anos.

Síntese elaborada por João Paulo da Silva

15. ROCHA, José Fernando. *Origens e evolução das ideias da Física*. Salvador: EDUFBA, 2002.

O objetivo dos autores é resgatar a história dos conceitos da física e mostrar que, ao contrário do que sugere a apresentação linear dos fatos nos livros didáticos, esse conjunto de conhecimentos foi construído progressivamente, ao longo de séculos, por cientistas de crenças e civilizações diferentes. Era comum, até o século XIX, que a presença de Deus fosse uma variável presente nas hipóteses científicas.

Alguns nomes, como Isaac Newton e Albert Einstein, tiveram papel essencial na formulação dos conceitos. Mas, a verdade é que eles souberam interpretar, de forma genial, um conhecimento que gerações de outros pesquisadores já haviam trabalhado.

A primeira parte do livro narra desde os primórdios da filosofia e da ciência até o advento da mecânica newtoniana e enumera os mitos de criação do universo dos povos antigos, apontando-os como a Física de nossos antepassados. Esses mitos já buscavam responder, de modo geral, a duas perguntas: Houve um início de tudo? O universo surgiu do nada ou foi obra de um ou mais criadores? A Bíblia descreve o universo com início e como obra de um único criador, que do caos cria, nomeia e ordena as coisas. O taoísmo, do século 6 a.C., descreve um universo que surge espontaneamente. O Código de Manu, indiano, descreve um universo com sucessivas criações e destruições por obra da divindade Shiva. Na Grécia Antiga, entre o século 6 a.C. e o início da era cristã, o saber humano ganhou uma visão filosófica, a qual é precursora do que seria a ciência. Pitágoras nasceu por volta do século VI a.C. e criou a famosa comunidade dos pitagóricos que, com os ideais de saber, cultuavam vida ascética. Pitágoras foi matemático, astrônomo, filósofo, líder religioso e criador do famoso teorema dos triângulos retângulos, que leva o seu nome.

Uma de suas mais importantes contribuições foi ter descoberto o princípio de vibração dos corpos. Notou haver uma relação matemática entre as notas das escalas musicais e os comprimentos de uma corda vibrante ou de uma coluna de ar, como numa lira ou numa flauta. Para ele, a música era um cântico sagrado entoado pelos números inteiros e suas proporções. O amor dos pitagóricos pela simetria e pelos números conduziu-os a importantes teorias em relação ao universo, como a de que planetas e estrelas deveriam girar ao redor da Terra, obedecendo à mais simétrica das curvas, o círculo.

Empédocles, nascido em 490 a.C, formulou a doutrina dos quatro elementos, substâncias imutáveis chamadas de raízes de todas as coisas e que se combinavam sob a ação de duas forças básicas. Os elementos eram a terra, o ar, o fogo e a água e as duas forças eram o amor e o ódio, isto é, a atração e a repulsão. Alguns historiadores supõem que Isaac Newton se deixaria influenciar pelas ideias desse

pensador quando descobriu que tanto maçãs quanto planetas eram atraídos por uma única força de atração universal. Leucipo e Demócrito, que viveram nos anos 500 a.C., desenvolveram o atomismo, teoria que previa a existência de apenas duas coisas: os átomos e o vácuo. O mundo seria composto de matéria imersa em um vazio total. Com tal concepção, pôde-se imaginar uma realidade em constante mutação, composta por pequenas partes imutáveis e indivisíveis que se combinam infinitamente. Com Aristóteles, chega-se a um dos pontos culminantes do pensamento grego e da História da Ciência. Ele nasceu em 384 a.C., na província da Macedônia. Aos 17 anos, foi para Atenas completar seus estudos na Academia de Platão e permaneceu lá por 20 anos. Fundou, em 335 a.C., o Liceu de Atenas, o mais avançado centro de estudos e pesquisas da época. Depois do declínio da civilização grega, a obra de Aristóteles permaneceu desconhecida na Europa por 15 séculos, até ser descoberta, reescrita e introduzida na Península Ibérica. Aristóteles tornou-se influência dominante até o fim da Idade Média. Só depois de mais de dois milênios de sua morte é que suas teorias começaram a ser refutadas. Segundo Aristóteles, havia dois tipos de movimento: os naturais, produzidos por causas internas, e os violentos, com causas externas. Os quatro elementos terrestres - fogo, ar, água e terra - devem se deslocar verticalmente para ocupar seus lugares naturais. A terra se deslocaria sempre para baixo, porque é o elemento mais pesado. O fogo ficaria acima de todos. A água estaria acima da terra e o ar, entre a água e o fogo. Corpos celestes seriam feitos de um quinto elemento, a quinta essência, com movimento natural distinto, circular e uniforme. A questão básica para Aristóteles não era saber por que um corpo se move, mas sim, para quê? A resposta é: para ocupar seu lugar natural no universo. Se jogarmos uma pedra para o alto, ela se afastará de seu lugar natural, mas logo tornará a cair, buscando seu lugar natural. Foram ideias extraídas do senso comum que levariam vinte séculos para ser derrubadas.

Arquimedes nasceu em Siracusa, hoje Sicília, Itália, por volta de 287 a.C. Ficou famoso por fatos curiosos, embora de veracidade duvidosa, como sua defesa de Siracusa, enfrentando a esquadra romana com espelhos focados contra as velas dos barcos inimigos. Diz-se que criou o grito "heureka!" ao descobrir uma forma de desvendar se a coroa do rei Hierão II era de ouro puro, como o monarca mandara fazer, ou de ouro fundido com prata, como se suspeitava. Ao tomar banho, Arquimedes observou que a quantidade de água derramada da banheira era igual ao volume de seu corpo. Concluiu que, se a coroa fosse de ouro, poderia derramar uma quantidade de água deslocada por um bloco de ouro de igual peso. Se fosse misturada com prata, teria um volume maior e deslocaria mais água

Claudius Ptolomeu (110-170 d.C.) nasceu no Alto Egito e passou quase toda sua vida em Alexandria. Sua grande obra, o Almagest, tornou-se a base da Astronomia-Matemática até o século XVII. Ptolomeu apresentou uma descrição matemática dos movimentos do Sol e da Lua capaz de prever as datas de futuros eclipses dos dois astros. Conseguiu atribuir aos planetas órbitas, tendo sempre a Terra como o centro de tudo e usando o círculo como figura básica. Para ele, os planetas, a Lua e o Sol se moviam em torno de epiciclos, cujo centro, por sua vez, se movia em movimento uniforme ao longo de um círculo maior. Para mudar o sistema ptolomaico, era preciso



mudar toda a mecânica aristotélica, façanha só conseguida, 16 séculos depois, por Isaac Newton.

Nicolau Copérnico nasceu em Thora, Polônia, em 1473. Insatisfeito com a teoria ptolomaica, simplificou o sistema, propondo que a Terra e os planetas se movem em torno do Sol, esse em repouso. Sua teoria heliocêntrica foi aceita como matematicamente genial, mas absurda do ponto de vista da Física da época. Ela virava a ciência de cabeça para baixo, com reflexos na Religião e na Moral. O homem não estava mais situado no centro de todas as coisas, mas banido para um mero planeta entre tantos outros.

Johannes Kepler nasceu em 27 de dezembro de 1551, num pequeno vilarejo incrustado na Floresta Negra. Aos 13 anos, começou a estudar em seminários teológicos protestantes. Em 1594, torna-se professor de Matemática e Astronomia na Escola Luterana de Graz, na Áustria. Em 1598, é obrigado a sair de Graz pela Igreja Católica, juntamente com os demais professores protestantes. Recebe um convite irrecusável para trabalhar em Benatek, nas cercanias de Praga, com o maior astrônomo da época, o dinamarquês Ticho Brahé. Logo, o rabugento Kepler e o arrogante Brahé entraram em conflito, mas a rivalidade foi produtiva. Brahé encarregou Kepler de analisar a trajetória de Marte, cuja forma de curva ovalada é a mais complexa do sistema solar. Kepler disse que resolveria o problema em oito dias, mas demorou oito anos para obter a resposta. Desvendou-a, substituindo os círculos pela forma da elipse. Nascia a 1ª Lei de Kepler: todos os planetas do sistema solar executam trajetórias elípticas, tendo o Sol em um dos focos.

Kepler intuiu um poder emanado do Sol, atribuindo ao Espírito Santo, que diminuiria com a distância. Se as trajetórias dos planetas são elípticas, uma conclusão lógica é que, quando se aproximam do Sol, sofrem influência maior e adquirem mais velocidade. Chegaria, assim, à sua segunda Lei. Por fim, estabeleceu que havia uma relação matemática entre o tempo que os planetas levam para percorrer uma órbita completa e as distâncias médias do planeta ao Sol. A terceira lei pontificava que, quanto mais afastado do Sol, mais tempo o planeta leva para percorrer sua órbita completa.

Galileu Galilei nasceu em Piza, em 1564. Aos 26 anos, era professor de Matemática em Piza. Mudou-se para Pádua e voltou-se para a Astronomia, tornando-se um defensor do sistema heliocêntrico de Copérnico. Em Pádua, ele conhece um telescópio e é o primeiro a empregar o instrumento cientificamente. Em 1610, publica o livro Mensageiro Sideral, no qual descreve montanhas e crateras na Lua. Descobriu que a Via Láctea era constituída por uma infinidade de estrelas e que Júpiter tinha quatro pequenas luas. A descoberta mostrava que ter satélites não era privilégio da Terra e contrariava o argumento aristotélico de que, se a Terra se movesse, deixaria a Lua para trás.

No livro O Ensaíador, Galileu lança os fundamentos do moderno método científico, com a identificação de um problema, construção de hipóteses para explicá-lo, seguida de experiências para comprar ou refutar essa teoria. Galileu também escreveu Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo, publicado em 1632, no qual discute a

concepção geral do universo e refuta a ideia de que o mundo terrestre e o celeste teriam leis diferentes. E insiste na tese de que a Terra se move. A Inquisição Católica julgou e condenou Galileu em 1633, mas foi poupado da fogueira porque era idoso. Só nos anos 90, a Igreja reconheceu seu erro. Galileu morreu em 1642, ano em que Isaac Newton nasceu. O ano é apontado como o marco de uma nova era da ciência.

O filósofo matemático René Descartes (1596-1650) nasceu em La Haye, França. Formulou uma nova concepção filosófica do Universo, baseada na razão pura. Para Descartes, Deus proveu o mundo com leis matemáticas precisas, com as quais se pode chegar a todo conhecimento. Também propôs a divisão de um problema em partes menores e mais simples.

A influência de Descartes e seu método foram determinantes para todo o procedimento científico dos dois séculos seguintes. O sábio acreditava que a linguagem da natureza era a Matemática. Isso levou a relacionar curvas e figuras geométricas com a Álgebra, estabelecendo um novo ramo da Matemática, a Geometria Analítica. Para o homem medieval, Deus governava o universo, não cabendo a ninguém questioná-lo. Para Descartes, Deus criou o universo e as leis que o governam, mas o homem deve descobri-las.

No dia de Natal de 1642, em Woolsthorpe, Lincolnshire, Inglaterra, nascia Isaac Newton, o criador da Mecânica clássica e um dos maiores pensadores da história da humanidade. A morte do pai, ocorrida três meses antes de seu nascimento, e o quase imediato segundo casamento de sua mãe deixaram marcas em sua trajetória. A orfandade transformou-o num menino introvertido e, mais tarde, num adulto neurótico. O padrasto, um fazendeiro, legou-lhe patrimônio considerável, o que permitiu a Newton dedicar-se à sede pelo conhecimento. Tornou-se, com pouco mais de 20 anos de idade, o maior matemático da Europa. Depois, mergulhou no estudo das Escrituras, construindo uma teologia particular. Defendia a existência de um único Deus, duvidando do dogma da Santíssima Trindade. Dedicou várias décadas ao estudo da alquimia, da qual extraiu a ideia de ação a distância e que se tornou o germe da lei da gravitação universal. Em 1666, uma grande peste assolou a Grã-Bretanha. Newton refugiou-se em Woolsthorpe e teve um dos anos mais produtivos de sua carreira, criando os cálculos diferencial e integral.

Foi nesse ano que Newton avistou em seu jardim uma maçã se despreendendo da macieira e intuiu que ela, como a Lua orbitando em torno da Terra, respondia a uma mesma força que as puxava para o centro da Terra. O que relacionava os dois eventos era uma força inversamente proporcional à do quadrado das distâncias. Mas, essa conclusão teve de esperar cerca de 20 anos para ser desenvolvida, até a obra *Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, de 1687. O núcleo central do livro são as três leis fundamentais da Mecânica. A primeira é a lei da inércia: todo corpo permanece em seu estado de repouso ou movimento uniforme em linha reta, a menos que seja obrigado a mudar seu estado por forças impressas nele. A segunda lei: a mudança no movimento é proporcional à força motriz impressa, e se faz segundo a linha reta pela qual se imprime essa força. A terceira: uma ação sempre se opõe a uma reação igual. A causa da força gravitacional jamais foi explicada por Newton, que

se contentou apenas com a correta descrição de que a lei do inverso do quadrado das distâncias oferecia à maioria dos problemas terrestres ou celestes. Os princípios de Isaac Newton unificaram a Astronomia e a Mecânica, sintetizando toda a ciência feita pela humanidade até então.

O segundo capítulo explora a evolução do conceito de Termodinâmica, o qual se desenvolveu nos séculos XVIII e XIX, vinculado-se ao momento histórico e econômico da Europa, com a Revolução Industrial. Teve como símbolo o advento da máquina a vapor.

A noção de calor faz parte da experiência humana desde a antiguidade. Aristóteles vincula os atributos de quente e frio aos quatro elementos: fogo e ar (quentes), água e terra (frias). Com a revolução científica do século XVII, o estudo do calor passa a ter uma dimensão quantitativa. Começa com o desenvolvimento de termômetros: Galileu constrói um modelo rudimentar em 1592, que, mais tarde, evolui para protótipos de álcool e de mercúrio. O calor era visto como uma substância, conhecida como calórico, um fluido elástico cujas partículas são capazes de passar de um corpo para outro até atingir o equilíbrio térmico. A teoria tinha um ponto fraco. Ninguém conseguia explicar porque o atrito entre corpos produzia calor. Assim, começa a tomar corpo a ideia de que o calor não é substância, mas energia. Essa ideia é formalizada, em 1847, pelo alemão Hermann Helmholtz. Enquanto isso, a técnica evoluía. A máquina a vapor, originalmente criada por Denis Pappin em 1691, seria aperfeiçoada pelo mecânico e inventor escocês James Watt em 1764, tornando-a mais econômica e com maior rendimento. O agente da máquina é a água, submetida a um processo cíclico e operando entre uma caldeira que cede calor e uma fonte fria que recebe calor. Além da indústria têxtil, a utilização da máquina a vapor é expandida a minas e barcos a vapor. Em 1815, é criada a primeira locomotiva a vapor.

A busca da máquina com melhor rendimento impulsionou a ciência. Desenvolvem-se conceitos como o da entropia (cuja variação é a razão entre o calor trocado e a temperatura). Lord Kelvin postula que não existe nenhuma máquina térmica com 100% e não é possível realizar um processo cíclico no qual todo o calor seja transformado em trabalho. O trabalho de cientistas, como Sadi Carnot, James Joule, Rudolph Clausius, Kelvin e Helmholtz, unificaria os conhecimentos sobre gases, pressão, temperatura e calor.

O terceiro capítulo trata da descoberta das ondas eletromagnéticas. Elas foram previstas teoricamente pelo físico escocês James Maxwell em 1861 e verificadas experimentalmente, em 1887, pelo alemão Heinrich Hertz. Hoje, as ondas de natureza semelhante às obtidas por Hertz são emitidas por antenas de emissoras de TV e captadas em nossas casas.

Outra descoberta notável é a do efeito magnético da corrente elétrica, feita pelo dinamarquês Hans Oersted, em 1820. Naquele mesmo ano, os franceses Dominique Arago e Joseph Gay Lussac inventaram o eletroímã, uma aplicação tecnológica do achado de Oersted e hoje utilizado em campainhas, guindastes, autofalantes e receptores telefônicos.

Também em 1820, foi descoberto um outro fenômeno básico relacionado ao Eletromagnetismo: surgirá uma força sobre um condutor imerso num campo

magnético toda vez que ele passar por uma corrente elétrica. Esse fenômeno é a base de funcionamento do motor elétrico, inventado pelo inglês Michael Faraday. O motor elétrico é usado em qualquer dispositivo que transforme energia elétrica em energia mecânica, como liquidificadores e furadeiras. A descoberta do fenômeno de Indução Eletromagnética, ou seja, da produção de corrente elétrica num circuito a partir de efeitos magnéticos, é outra contribuição importante para o avanço do conhecimento científico e tecnológico. A transmissão de informação por pulsos elétricos viabilizaria o advento do telégrafo, do telefone e de outros meios de comunicação. Em 1932, a primeira antena de televisão seria instalada no alto do Empire State Building, em Nova York. Pouco se conhecia sobre magnetismo e eletricidade até o século XVIII. Apesar do uso generalizado da bússola, não se sabia, até a época do Descobrimento do Brasil, que a orientação da agulha magnética da bússola se devia ao fato de a Terra comportar-se como uma grande esfera magnética. A primeira grande contribuição para a compreensão dos fenômenos magnéticos e elétricos seria dada pelo físico inglês William Gilbert, no século XVII. No seu livro *De Magnete*, publicado em 1600, ele compila os efeitos conhecidos do âmbar, pedra amarelada formada por seiva vegetal que, uma vez atritada com lã, torna-se capaz de atrair corpos leves. Foi Gilbert quem denominou de elétricos os corpos que se comportavam como o âmbar e de não elétricos os que não exibiam tal propriedade (inspirado nos gregos, que chamavam o âmbar de *elektron*). Uma nova fronteira do conhecimento seria aberta no início do século XVIII, a partir do fenômeno da descoberta da condução elétrica e da indução elétrica, conceitos introduzidos pelo inglês Stephen Gray. Ele pontificava que a virtude elétrica de um tubo de vidro atritado pode ser transmitida a outros corpos com os quais ele entra em contato, mostrando que há corpos que conduzem eletricidade (os condutores) e os que não conduzem (isolantes).

Por volta de 1745, o pastor polonês Ewald von Kleist e o professor holandês Pieter van Musschenbroek inventaram um dispositivo elétrico denominado de garrafa de Leiden - uma garrafa comum cheia até a metade de água, com paredes internas e externas revestidas de uma folha metálica - um antecessor dos atuais capacitores e condensadores. O americano Benjamin Franklin ligaria várias garrafas de Leiden em série, a qual chamou de bateria elétrica. A experiência de Franklin com uma pipa se tornaria famosa e culminaria com a invenção do pára-raios. Em 1752, ele conseguiu provar que os relâmpagos tinham natureza elétrica. Empinou o papagaio com uma chave metálica presa à linha próxima à ponta que ele segurava. No momento em que a pipa desapareceu numa nuvem, a linha se enrijeceu e uma centelha saltou-lhe no dedo, vinda da chave.

Outro acontecimento importante foi a invenção da pilha eletroquímica, por Alessandro Volta e Luigi Galvani, capaz de produzir a corrente elétrica constante durante um período relativamente longo, sem necessidade de recarregar a cada utilização, como acontecia com a garrafa de Leiden.

Em 1785, o físico francês Charles Coulomb comprovou a relação entre a eletricidade à lei da gravitação de Newton. Constatou que a força repulsiva de duas esferas, eletrizadas igualmente, era inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os centros das esferas. Mas, só na segunda metade do século XIX, a investigação sobre a natureza da eletricidade ganha impulso e a ideia de sua constituição é

desvendada com a descoberta dos elétrons, partículas de carga negativa. Consta-se que a eletrização de um corpo acontece quando ele perde ou recebe elétrons.

A Teoria Eletromagnética, desenvolvida por Maxwell, unificou os conhecimentos nos ramos do Magnetismo, Eletricidade e Óptica. Uma das grandes proezas da teoria de Maxwell foi incluir a óptica na sua teoria. Isaac Newton, em suas experiências com prismas (descobriu que o arco-íris era causado pela dispersão da luz do Sol nas gotículas de chuva), acreditava que a luz era composta de partículas.

Outros cientistas, como Thomas Young, observaram que a luz tinha propriedades ondulatórias e a classificaram como onda. A afirmação do modelo ondulatório para a luz implicou em supor a existência de um meio mecânico no qual se propagassem as ondas luminosas. Esse hipotético meio indispensável, segundo as leis da mecânica, recebeu o nome de éter luminífero. Experiências para detectar a influência do éter, contudo, nada encontravam. A comprovação, por Hertz, de que a luz tinha mesmo propriedades ondulatórias não encerrou a questão. Einstein mostraria que a luz também é constituída por partículas de energia, posteriormente batizadas de fótons. Essa constatação surgiu com a descoberta do efeito fotoelétrico, observado fazendo-se incidir luz ultravioleta sobre uma placa de zinco ou iluminando com luz amarela uma placa de potássio. A radiação eletromagnética despreendeu os elétrons dessas placas, deixando-as carregadas positivamente.

Em 1905, Einstein explica o efeito fotoelétrico propondo que a luz não era propriamente uma onda, mas um pacote de energia dotado de algumas características ondulatórias e corpusculares. Tais achados deram lastro à tese de que a luz tem natureza dual, ora ela se comporta como onda, ora como partícula. O quarto capítulo versa sobre a Teoria da Relatividade, uma das teorias científicas mais conhecidas em nossa época, cujo criador, Albert Einstein, conquistou popularidade planetária. Estabelecida em 1905, ela revolucionou os conceitos usuais de espaço e de tempo e abandonou a convicção de que o mundo podia ser descrito em termos da geometria tradicional.

Nas representações do universo físico, feitas pela teoria, não há o espaço plano da geometria euclidiana, mas o conceito de espaço curvo. Ele propôs que, se um observador medisse a velocidade da luz enquanto viajasse rumo à sua fonte obteriam um valor maior do que se estivesse estacionário. A formulação matemática da relatividade geral considera o tempo não como grandeza absoluta, mas como uma das dimensões em pé de igualdade com o espaço. Surge, assim, um novo conceito, o do espaço-tempo. A relatividade geral explicava desvios na órbita observada do planeta Mercúrio que não desafiavam a gravitação newtoniana. Também previa um desvio na trajetória de raios luminosos quando esses passassem por grandes massas, como o Sol, igualmente incompatível com a gravitação newtoniana.

Essa discrepância poderia ser submetida a um teste empírico quando acontecesse um eclipse do sol. Para o eclipse previsto para 1919, foram organizadas expedições para a Ilha de Príncipe e para Sobral, interior do Ceará, locais favoráveis para as observações. Uma reunião conjunta da Royal Society e da Royal Astronomical Society, em Londres, no dia 6 de novembro de 1919, analisou os resultados e concluiu

que eles confirmavam a teoria da relatividade de Einstein. O Times, prestigiado jornal britânico, na edição de 7 de novembro de 1919, colocou como manchete Revolução na Ciência; Nova Teoria do Universo; Ideias Newtonianas Derrotadas.

Einstein ganharia o Nobel de Física de 1921 não pela Teoria da Relatividade, mas pela descoberta do efeito fotoelétrico. A teoria da relatividade, descrita em equações, mas ainda à procura de mais comprovações, só seria totalmente aceita alguns anos mais tarde. A Teoria do Efeito Fotoelétrico de Einstein propôs, em 1905, que a luz era constituída por glóbulos ou partículas de energia, ou quanta (plural de quantum, que significa porção discreta). A teoria pertencia a uma outra revolução, a Física Quântica, objeto do quinto capítulo desse livro. No dia 14 de dezembro de 1900, o físico alemão Max Planck (1858-1947) apresentou uma conferência, na qual introduzia a solução do problema da radiação emitida por um corpo metálico quando ele é aquecido a grandes temperaturas e se torna incandescente, emitindo luz. Ao desenvolver a expressão matemática que parecia expressar os dados experimentais, Planck concluiu que um corpo aquecido só podia emitir números inteiros de pacotes de energia, os quanta. A rigor, poderia emitir 1, 2, 3, 4, [...], um trilhão de quanta, mas nunca uma fração de um quantum.

Apesar do grande salto proposto em seu trabalho, Planck era um físico de formação clássica e foi difícil para ele admitir que a radiação eletromagnética, até então um fenômeno tipicamente ondulatório, viesse a se comportar daquela maneira. Mas, era a única possibilidade teórica que justificava os dados experimentais.

Só cinco anos mais tarde, Planck seria reconhecido como o grande pioneiro da mecânica quântica, quando Einstein identificou os quanta de luz. Foi no ano de 1925 que se iniciou a publicação das primeiras grandes teorias matemáticas que viriam a estruturar, definitivamente, a nova Teoria Quântica e Mecânica Quântica. Foi, a partir de então, que se consagraram cientistas como Werner Heisenberg (1901-1976), Max Born (1882-1970) e Pascoal Jordan (1902-1980).

Heisenberg intuiu que a teoria do átomo, proposta em 1911 pelo físico dinamarquês Niels Henrik Bohr, não tinha ainda recebido a melhor confirmação experimental, pelo fato de ser baseada em conceitos não diretamente observáveis; como a imagem de elétrons movendo-se em órbitas ao redor do núcleo atômico. Ele estabelecia, em 1927, as célebres relações de incertezas, as quais indicavam que, na nova Teoria Quântica, ao contrário da física clássica, é impossível medir com precisão certos pares de variáveis. Se tentarmos medir a velocidade e posição de um elétron a orbitar em um núcleo atômico, haverá um limite de precisão em nossas medidas. Quanto mais precisas forem as medidas de um variável, maior será a incerteza sobre a outra.

Nos anos 40, já era estabelecido que a estrutura atômica era formada de um núcleo, constituído de prótons e nêutrons, ligado aos elétrons por meio da teoria eletromagnética. O físico inglês Paul Dirac daria outra enorme contribuição para a Física Quântica, introduzindo, nos anos 20, uma nova formulação matemática para esse ramo da Física. Ainda nos anos 40, Richard Feynman, Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga edificariam a Eletrodinâmica Quântica, a qual proporcionaria os primeiros grandes passos para a descrição de partículas elementares a partir de suas interações eletromagnéticas.

## RESPONSÁVEIS PELA PUBLICAÇÃO

### SECRETARIA DE FORMAÇÃO

Nilcéa F. Victorino  
Magda Souza de Jesus

### CEPES

CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS  
EDUCACIONAIS E SINDICAIS  
Maria Izabel A. Noronha  
Coordenadora

### SECRETARIA DE COMUNICAÇÕES

Paulo José das Neves  
Roberto Guido

### ASSESSORIA DE COMUNICAÇÕES

Rosana Inácio

### DIAGRAMAÇÃO

Carlos Roberto F. dos Santos  
Rosely Soares

### ASSESSORIA DE FORMAÇÃO

Edson Roberto Nunes

### SECRETÁRIA

Solange Cavalheiro  
Produção da Secretaria de Formação

### REVISÃO

Profa. Sandra Andréia Ferreira

## DIRETORIA DA APEOESP – TRIÊNIO 2008/2011

### DIRETORIA EXECUTIVA:

Presidenta: Maria Izabel Azevedo Noronha; Vice-Presidente: José Geraldo Corrêa Júnior; Secretário Geral: Fábio Santos de Moraes; Secretário Geral Adjunto: Odimar Silva; Secretária de Finanças: Luiz Gonzaga José; Secretária Adjunta de Finanças: Suely Fátima de Oliveira; Secretário de Administração e Patrimônio: Sílvio de Souza; Secretário Adjunto de Administração e Patrimônio: Fábio Santos Silva; Secretário de Assuntos Educacionais e Culturais: Pedro Paulo Vieira de Carvalho; Secretário Adjunto de Assuntos Educacionais e Culturais: Carlos Ramiro de Castro; Secretário de Comunicações: Paulo José das Neves; Secretário Adjunto de Comunicações: Roberto Guido; Secretária de Formação: Nilcéa Fleury Victorino; Secretária Adjunta de Formação: Magda Souza de Jesus; Secretário de Legislação e Defesa dos Associados: Francisco de Assis Ferreira; Secretária Adjunta de Legislação e Defesa dos Associados: Zenaide Honório; Secretário de Política Sindical: João Luis Dias Zafalão; Secretária Adjunta de Política Sindical: Eliana Nunes dos Santos; Secretária de Políticas Sociais: Francisca Pereira da Rocha; Secretário Adjunto de Políticas Sociais: Marcos de Oliveira Soares; Secretária para Assuntos de

Aposentados: Sílvia Pereira; Secretário Adjunto para Assuntos de Aposentados: Gilberto de Lima Silva; Secretária Geral de Organização: Margarida Maria de Oliveira; Secretário de Organização para a Capital: José Wilson de Souza Maciel; Secretário de Organização para a Grande São Paulo: Douglas Martins Izzo; Secretário de Organização para o Interior: Ezio Expedito Ferreira Lima; Secretário de Organização para o Interior: Ederaldo Batista.

### DIRETORIA ESTADUAL:

Ademar de Assis Camelo; Aladir Cristina Genovez Cano; Alberto Bruschi; Alex Buzeli Bonomo; Ana Lúcia Santos Cugler; Ana Paula Pascarelli dos Santos; Anita Aparecida Rodrigues Marson; Antonio Carlos Amado Ferreira; Antonio Jovem de Jesus Filho; Ariovaldo de Camargo; Ary Neves da Silva; Benedito Jesus dos Santos Chagas; Carlos Alberto Rezende Lopes; Carlos Barbosa da Silva; Carlos Eduardo Vicente; Carmen Luiza Urquiza de Souza; Cilene Maria Obici; Deusdete Bispo da Silva; Dorival Aparecido da Silva; Edgard Fernandes Neto; Edith Sandes Salgado; Edna Penha Araújo; Eliane Gonçalves da Costa; Elizeu Pedro Ribeiro; Emma Veiga Cepedano; Fernando Borges Correia Filho; Fláudio Azevedo Limas; Floripes Ingracia Borioli Godinho; Geny Pires Gonçalves Tiritilli; Gerson José Jório Rodrigues; Gisele Cristina da Silva Lima; Idalina Leis de Freitas Souza; Inês Paz; Janaina Rodrigues; Josafa Rehem Nascimento Vieira; Jose Luiz Moreno Prado Leite; José Reinaldo de Matos Leite; Josefa Gomes da Silva; Jovina Maria da Silva; Jucinéa Benedita dos Santos; Juvenal de Aguiar Penteado Neto; Leandro Alves Oliveira; Leovani Simões Cantazini; Lindomar Conceição da Costa Federighi; Luci Ferreira da Silva; Luiz Carlos de Sales Pinto; Luiz Carlos de Freitas; Luiz Cláudio de Lima; Luzelena Feitosa Vieira; Maisa Bonifácio Lima; Mara Cristina de Almeida; Marcio de Oliveira; Marcos Luiz da Silva; Maria José Carvalho Cunha; Maria Lícia Ambrosio Orlandi; Maria Liduina Facundo Severo; Maria Sufaneide Rodrigues; Maria Teresinha de Sordi; Maria Valdinete Leite Nascimento; Mariana Coelho Rosa; Mauro da Silva Inácio; Miguel Leme Ferreira; Miguel Noel Meirelles; Moacyr Américo da Silva; Orivaldo Felício; Ozani Martiniano de Souza; Paulo Alves Pereira; Paulo Roberto Chacon de Oliveira; Ricardo Augusto Botaro; Ricardo Marcolino Pinto; Rita de Cássia Cardoso; Rita Leite Diniz; Roberta Lara Maria Lima; Roberta Maria Teixeira Castro; Roberto Mendes; Roberto Polle; Ronaldo Torelli; Sandro Luiz Casarini; Sebastião Sérgio Toledo Rodovalho; Sergio Martins da Cunha; Solange Aparecida Benedeti Penha; Sonia Aparecida Alves de Arruda; Stenio Matheus de Moraes Lima; Suzi da Silva; Tatiana Silvério Kapór; Telma Aparecida Andrade Vítor; Teresinha de Jesus Sousa Martins; Tereza Cristina Moreira da Silva; Uilder Cácio de Freitas; Ulisses Gomes Oliveira Francisco; Vera Lúcia Lourenço; Vera Lúcia Zimberger; Wilson Augusto Fiúza Frazão.