

Matemática

Introdução à Física

Célio Rodrigues Muniz
Lázara Silveira Castrillo



Geografia



História



Educação
Física



Química



Ciências
Biológicas



Artes
Plásticas



Computação



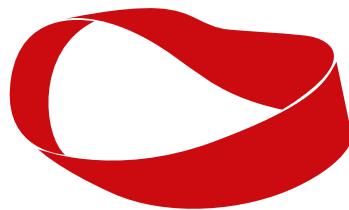
Física



Matemática



Pedagogia



Matemática

Introdução a Física

Célio Rodrigues Muniz
Lázara Silveira Castrillo

3^a Edição



Fortaleza
2019



Geografia



História



Educação
Física



Química



Ciências
Biológicas



Artes
Plásticas



Computação



Física



Matemática



Pedagogia

Copyright © 2019. Todos os direitos reservados desta edição à UAB/UECE. Nenhuma parte deste material poderá ser reproduzida, transmitida e gravada, por qualquer meio eletrônico, por fotocópia e outros, sem a prévia autorização, por escrito, dos autores.



Presidente da República

Jair Messias Bolsonaro

Ministro da Educação

Abraham Braga de Vasconcellos Weintraub

Presidente da CAPES

Abílio Baeta Neves

Diretor de Educação a Distância da CAPES

Carlos Cesar Modernel Lenuzza

Governador do Estado do Ceará

Camilo Sobreira de Santana

Reitor da Universidade Estadual do Ceará

José Jackson Coelho Sampaio

Vice-Reitor

Hidelbrando dos Santos Soares

Pró-Reitora de Pós-Graduação

Nucácia Meyre Silva Araújo

Coordenador da SATE e UAB/UECE

Francisco Fábio Castelo Branco

Coordenadora Adjunta UAB/UECE

Eloísa Maia Vidal

Direção do CED/UECE

José Albio Moreira de Sales

Coordenação da Licenciatura em Física

Carlos Jacinto de Oliveira

Coordenação de Tutoria da Licenciatura em Física

Emerson Mariano da Silva

Editor da EdUECE

Erasmo Miessa Ruiz

Coordenadora Editorial

Rocylânia Isidro de Oliveira

Projeto Gráfico e Capa

Roberto Santos

Diagramador

Francisco Oliveira

Revisão Ortográfica

Fernanda Ribeiro

Conselho Editorial

Antônio Luciano Pontes

Eduardo Diatahy Bezerra de Menezes

Emanuel Ângelo da Rocha Fragoso

Francisco Horácio da Silva Frota

Francisco Josônio Camelo Parente

Gisafran Nazareno Mota Jucá

José Ferreira Nunes

Liduina Farias Almeida da Costa

Lucili Grangeiro Cortez

Luiz Cruz Lima

Manfredo Ramos

Marcelo Gurgel Carlos da Silva

Marcony Silva Cunha

Maria do Socorro Ferreira Osterne

Maria Salete Bessa Jorge

Silvia Maria Nóbrega-Therrien

Conselho Consultivo

Antônio Torres Montenegro (UFPE)

Eliane P. Zamith Brito (FGV)

Homero Santiago (USP)

Ieda Maria Alves (USP)

Manuel Domingos Neto (UFF)

Maria do Socorro Silva Aragão (UFC)

Maria Lírida Callou de Araújo e Mendonça (UNIFOR)

Pierre Salama (Universidade de Paris VIII)

Romeu Gomes (FIOCRUZ)

Túlio Batista Franco (UFF)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Sistema de Bibliotecas

Biblioteca Central Prof. Antônio Martins Filho

Meirilane Santos de Moraes Bastos – CRB-3 / 785

Bibliotecária

A447m Almeida, Gerson Paiva.

Mecânica teórica I / Gerson Paiva de Almeida. 2.ed. –

Fortaleza, CE : EdUECE, 2014.

130 p. : il; 20,0 x 25,5cm – (Física)

Inclui referências.

ISBN: 978-85-7826-546-5

1. Mecânica. I. Título.

CDD : 531

Editora da Universidade Estadual do Ceará – EdUECE
Av. Dr. Silas Munguba, 1700 – Campus do Itaperi – Reitoria – Fortaleza – Ceará
CEP: 60714-903 – Fone: (85) 3101-9893
Internet www.uece.br – E-mail: eduece@uece.br
Secretaria de Apoio às Tecnologias Educacionais
Fone: (85) 3101-9962

Sumário

Apresentação	5
Parte 1 - Do Empirismo Primitivo à Cinemática Galileana	7
Capítulo 1 – As primeiras visões de mundo: Pré-História e Pré-Socráticos.....	9
Introdução	9
1.1 Empirismo Primitivo.....	10
1.2 Tales de Mileto.....	13
1.3 Pitágoras.....	14
1.4 Zenão	15
1.5 Os Atomistas.....	16
Capítulo 2 – O Mundo Aristotélico/Ptolomaico	19
2.1 Aristóteles.....	19
2.2 Ptolomeu.....	22
Capítulo 3 – O início do fim do reinado Aristotélico/Ptolomaico	25
3.1 Okcham	25
3.2 Copérnico	26
3.3 Bruno	27
3.4 Kepler	28
Capítulo 4 – Galileu e o nascimento da Mecânica	33
4.1 Galileu	33
4.2 A Cinemática	34
Parte 2 – Das Leis da Mecânica à Estática dos Fluidos.....	41
Capítulo 1 – A Mecânica Newtoniana	43
Introdução	43
1.1 Isaac Newton.....	43
1.2 As Três Leis do Movimento	47
1.3 A Lei da Gravitação Universal	53
1.4 Trabalho e Energia.....	57
1.5 A Física dos Corpos Rígidos	63
1.6 A Física dos Corpos Fluidos	66
Parte 3 - Da Termodinâmica às Ondas Eletromagnéticas	69
Capítulo 1 – Termodinâmica	71
Introdução	71
1.1 Conceitos básicos.....	71
1.2 Temperatura. Lei Zero da Termodinâmica.....	74

Escala de Temperatura	74
1.3 Calor. Trabalho. Primeira Lei da Termodinâmica	78
1.4 Entropia. Segunda Lei da Termodinâmica	83
1.5 Equações de Estado de um Gás Ideal.....	84
Capítulo 2 – Eletricidade e Magnetismo	89
2.1 Carga Elétrica.....	89
2.2 Quantização da Carga Elétrica	91
2.3 Princípio da Conservação da Carga Elétrica.....	91
2.4 O Campo Elétrico.....	92
2.5 Processos de Eletrização.....	93
2.6 Condutores e isolantes	95
2.7 Lei de Coulomb	96
2.8 Corrente Elétrica e Diferença de potencial	97
2.9 Magnetismo	98
2.10 Ondas Eletromagnéticas, Espectro	101
Parte 4 - Da Relatividade Einsteiniana à Mecânica Quântica.....	103
Capítulo 1 – As Teorias da Relatividade de Einstein	105
Introdução	105
1.1 O Princípio da Relatividade de Galileu	105
1.2 O Princípio da Relatividade de Einstein	107
1.3 A Cinemática Relativística	110
1.4 A Dinâmica Relativística	113
1.5 A Teoria da Relatividade Geral	115
Capítulo 2 – A Teoria Quântica da Matéria.....	119
2.1 A Luz e o Espectro do Corpo Negro	119
2.2 O Efeito Fotoelétrico	123
2.3 O Efeito Compton.....	124
2.4 Modelos e Espectros Atômicos.....	125
2.5 Propriedades Ondulatórias dos Elétrons e o Surgimento da Mecânica Quântica	130
2.6 Heisenberg e o Princípio da Incerteza.....	132
Sobre os autores	135

Apresentação

Existem muitos livros de Física Básica à disposição de instrutores e estudantes de graduação. Como justificar, então, a edição de um novo texto abordando esse tema? A justificativa se dá pelo fato de que esse texto chega para completar um processo de educação em implantação no Estado do Ceará. Com o objetivo de ser o livro texto do curso à distância da disciplina de Introdução à Física da Universidade Estadual do Ceará, esse material didático, que trata da Física Básica em seu mais amplo espectro, excede em muito os seus objetivos e é um excelente livro didático para qualquer curso de nível superior que aborde os fundamentos históricos e conceituais da Física.

O presente livro texto é, portanto, uma tentativa de expor os conceitos básicos de uma forma moderna e pragmática. Isso se evidencia logo na primeira unidade, onde é feita uma revisão dos conceitos filosóficos que levaram ao desenvolvimento dos princípios da Mecânica. Nesse sentido, a Mecânica Newtoniana é tratada de uma forma objetiva, mas com referências históricas importantes para complementar a formação do estudante em um nível mais universal. As definições das grandezas físicas fundamentais são bem destacadas para que não fique dúvida sobre quais são os aspectos importantes a serem observados pelo estudante. A discussão sobre a Mecânica Newtoniana se encerra com as seções sobre corpos rígidos e fluidos, onde é feita uma generalização do que foi descrito para poucas partículas a um sistema de muitas partículas.

A terceira unidade trata da Termodinâmica e do Eletromagnetismo, onde os aspectos fundamentais são vistos numa sequência bem compreensível. Em particular, a discussão sobre quantização e conservação de carga é feita de uma forma bastante acessível. E, para completar, o livro texto tem em sua quarta unidade uma discussão bem moderna sobre e as Teorias da Relatividade e a Estrutura Quântica da Matéria. O material apresentado tem uma linguagem fácil de ser absorvida sem deixar o nível científico vulgarizado.

Raimundo N. Costa Filho

London, Ontario, Canada

Outubro de 2009.

1

Parte

Do Empirismo Primitivo à Cinemática Galileana

Objetivos:

- Compreender as origens do pensamento racional no ocidente a respeito do conhecimento da Natureza e sua evolução até o surgimento da Cinemática.

I

Capítulo

As primeiras visões de mundo: Pré-História e Pré-Socráticos

Introdução

Veremos nesta unidade, inicialmente, como era o conhecimento do mundo natural antes do surgimento da ciência moderna, baseado, na aurora dos tempos, puramente no empirismo, como na descoberta do fogo, por exemplo. Muito tempo depois veio a especulação, primeiro de caráter místico/religioso, depois filosófico.

Na história do ocidente, o pensamento racional iniciou-se com os gregos antigos, notadamente com os chamados filósofos Pré-Socráticos. Estes foram os primeiros a pensar o mundo físico em termos não-místicos. Tales de Mileto, por exemplo, sem apelar a deuses ou outros seres fantásticos, afirmara que “Tudo é Água”, frase que incorpora a primeira tentativa de unificação da natureza, ainda objeto de intensas pesquisas por parte dos físicos contemporâneos.

Depois trataremos de Aristóteles e Ptolomeu, o primeiro afirmando que o movimento de um corpo só poderia existir enquanto a sua causa estiver ainda em ação e que a física dos céus era diferente da física da Terra. O segundo construiu um intrincado modelo astronômico em que a Terra ocupava o centro do Universo.

Trataremos, em seguida, da Física Medieval, que é quase inteiramente dominada pela Escolástica, na qual a “ciência” de Aristóteles e Ptolomeu foi consagrada como dogma pela Igreja Católica. Quem ousasse ir contra esse sistema sofreria duras penas. Mas nem tudo são trevas: há também nesse período filósofos que contribuíram para a evolução do pensamento acerca do mundo natural, como Guilherme de Ockham.

Sobre o início da era moderna, não poderíamos deixar de falar a respeito de Nicolau Copérnico e seu Sistema Heliocêntrico, que causou uma verdadeira reviravolta em nossa visão de mundo. Posteriormente, testemunharemos o lento e difícil nascimento da ciência como hoje a conhecemos, baseada, primeiramente, na observação e matematização do mundo, analisando a fundamental contribuição de Johannes Kepler para o estabeleci-

Metabolismo (do grego *metabolismos*, μεταβολισμός, que significa “mudança”, troca) é o conjunto de transformações que as substâncias químicas sofrem no interior dos organismos vivos. O termo “metabolismo celular” é usado em referência ao conjunto de todas as reações químicas que ocorrem nas células. Estas reações são responsáveis pelos processos de síntese e degradação dos nutrientes na célula e constituem a base da vida, permitindo o crescimento e reprodução das células, mantendo as suas estruturas e adequando respostas aos seus ambientes <http://pt.wikipedia.org/wiki/Metabolismo>.

mento das leis do movimento dos corpos celestes (planetas) e, em segundo lugar, na experimentação, com o que surge o método científico, a partir do qual Galileu estipulou as leis do movimento dos corpos terrestres, fundando a Cinemática, ou o estudo do movimento sem considerar suas causas físicas, abrindo caminho para a elaboração do genial sistema de mundo formulado por Isaac Newton.

1.1 Empirismo Primitivo

Uma lebre magra e pequena foi tudo quanto se caçou em mais um desses dias perdidos na longa e nebulosa noite da pré-história. Famintos e exaustos, quatro bípedes nus arrastam a lebre e a si próprios pelo vale. O calor é torturante e nuvens ameaçadoras cobrem o impiedoso céu, que há muitas noites esconde suas belas e cintilantes pepitas, deixando triste o coração daqueles seres.

Algo vago e inquietante os aflige, e a sensação de uma perda iminente os paralisa e angustia. Súbito, um arrepió percorre seus corpos e o rugido tenebroso como o de um urso colossal atravessa os céus. Um grito estridente, porém humano, ecoa pelo vale. O grupo detém-se e percebe, horrorizado, que um deles está deitado, morto, coberto de uma fuligem negra. Espirais de fumaça levantam-se de seu corpo inerte. A lebre que o homem trazia também está escura e queima as mãos de quem ousa tocá-la.

De repente, torrentes de água são despejadas dos céus, enquanto os sobreviventes veem, estarrecidos, luzes que cegam serpenteando sobre suas cabeças, deixando árvores próximas no mesmo estado que aquele irmão e aquela lebre: escuras e fumarentas. Movidos pelo instinto, correm sem rumo até se esconderem na cavidade de uma grande rocha.

Ali esperam em sobressalto que a tempestade passe. Enquanto isso, lembram-se de que estão com uma fome verdadeiramente atroz. Felizmente, não haviam esquecido de trazer a lebre e, como agora estavam reduzidos a três, poderiam satisfazer seus estômagos por mais tempo. Dão-se conta de que a carne úmida está mais macia e mais saborosa que de costume e rapidamente devoram-na, deixando apenas os ossos e a pele tostada daquilo que foi uma lebre.

Alguns dias depois, o mais sagaz daquele grupo espreita outra lebre, segurando uma grande pedra. Com destreza, arremessa-a na direção do animal, mas este é mais ágil e esquia-se prontamente. O homem, no seu balbucio gutural ininteligível, resmunga algo que, se pudéssemos compreender, o pudor não nos permitiria traduzi-lo. Nesse ínterim, a pedra atirada choca-se com uma maior, quando, dentre elas, o homem vê emergirem uns riscos de luz que roçam o capim seco logo abaixo. Ele acerca-se do local e observa uma pequena fumarola erguendo-se da vegetação.

Instantaneamente, a cena de dias atrás se reproduz em seu cérebro, e ele revê aqueles rasgos ziguezagueantes de luz fulgurante precipitando-se dos céus, derrubando homens e árvores, deixando-os quentes e expelindo fumaça. Subitamente, o homem percebe, à sua maneira pré-histórica de pensar, que o que acaba de presenciar é um fenômeno em menor escala semelhante àquele que matara seu irmão. Ele novamente toma em suas mãos a pedra arremessada e bate-a com força na outra. Mais uma vez escapam dentre elas os mesmos riscos de luz, numerosos e fugazes, de modo que instintivamente procura bater em pontos próximos ao capim seco, obtendo o resultado inconscientemente desejado, isto é, fumaça, calor e novamente... luz. Sim, uma luz que dança, intensa, corpórea e avermelhada... Ou seria alaranjada, azulada? Ele não sabe precisar e muito menos nomear as cores. Apenas percebe que são cambiantes e as compara com a penugem das aves canoras e agitadas que já tivera oportunidade de observar. Ou com o tênue arco-íris que se seguiu àquela trágica tempestade. Aproxima suas mãos espalmadas e sente o forte, porém agradável calor. Então, sua boca semidesdentada se abre em um largo sorriso e seus olhos brilham mais que a luz neles refletida...

O resto da história, bem, já é mais ou menos conhecido ou imaginado.

A descoberta e o domínio do fogo podem ter constituído a primeira das grandes revoluções tecnológicas experimentadas pelo *Homo sapiens*, que permitiu ao homem cozer seus alimentos (facilitando sua digestão e eliminando micro-organismos patogênicos), afugentar feras e, talvez, proporcionar as primeiras formas de socialização (homens, mulheres e crianças reunidos em volta da fogueira). Curiosamente, o calor gerado em processos ordinários de combustão desempenhará outro importante papel, centenas de milhares de anos mais tarde, durante a primeira grande revolução tecnológica, também chamada de industrial, iniciada na Inglaterra do século XVIII. A ciência da Termodinâmica foi consequência direta dessa revolução.

Muito antes que os homens se organizassem em sociedades e estas se tornassem complexas o bastante a ponto de serem chamadas de civilizações, há cerca de 50.000 anos, vivia-se isolada e precariamente de acordo com o instinto de sobrevivência, como qualquer outro animal. Segundo Eduardo Galeano (*Espelhos – Uma História Quase Universal*):

"Na intempéria inimiga, ninguém nos respeitava e ninguém nos temia. A noite e a selva nos causavam terror. Éramos os bichos mais vulneráveis da zoologia terrestre, filhotes inúteis, adultos de nada, sem garras, nem grandes presas, nem patas velozes, nem olfato longo."

Mas a seleção natural havia dotado aquela espécie – a nossa espécie – de um equipamento biológico privilegiado em relação às suas presas e predadores: um cérebro de robustas dimensões. A cena descrita no início desta

Enumere outras revoluções tecnológicas da História.

seção, apesar de imaginada, dá-nos uma idéia do quanto esse órgão, que pesa pouco mais de 1 kg, juntamente com os seus delicados acessórios, como olhos, ouvidos, nariz e mãos livres, sensíveis e hábeis, permitiu que fôssemos observando e manipulando objetos da natureza, comparando entre si fatos e fenômenos naturais, inicialmente de forma tosca e fragmentada, com o propósito de garantir a mera sobrevivência de nossos estômagos e de nossa prole.

Com a passagem dos milênios, sob a reflexão e a ação de milhões de seres humanos, a partir de um vasto conjunto de observações colhidas na sofrida labuta de seus cotidianos e transmitida às gerações seguintes a partir do desenvolvimento da linguagem, lentamente foram se estruturando nossas atuais idéias e práticas humanas, como também nossa sólida compreensão e manipulação do mundo natural em que nos inserimos e com o qual interagimos incessantemente. Assim, com o tempo, as visões do mundo vão se amalgamando e se transformando em visões de mundo. Ou seja, fatos observados no mundo geram interpretações a respeito do mesmo.

O processo inverso também se verifica, isto é, visões de mundo contribuem para que se tenham inéditas visões do mundo. Esta via de mão dupla é particularmente movimentada no domínio da ciência. No âmbito da Física, protótipo de todas as ciências, fica bem evidenciada na dicotomia teoria/experimento, a qual lhe é inerente. As observações, controladas ou não, bem como os dados coletados dos experimentos científicos, alimentam ou ajudam a construir uma teoria da mesma forma que o discurso bem fundamentado e articulado dessa teoria antecipa novos aspectos dos fenômenos naturais, verificáveis (ou não) em laboratório.

Muitos estudiosos da história das ciências afirmam que as primeiras rationalizações a respeito do mundo começaram quando o homem, em algum momento de sua trajetória histórica, desembarcou-se, embora não completamente, da visão mágica e mítica que dele possuía, isto é, daquela que se deixava impregnar de deuses, heróis e outros seres fantásticos, produtos de mentes férteis, ignorantes ou meramente oportunistas. Vejamos um exemplo desses mitos, que trata da criação do mundo, extraído de um texto chinês de cerca de 600 a.C.:

"Phan Ku, o Criador Gigante, saiu de um ovo e começou a criar o mundo usando um cinzel para esculpir os vales e montanhas. Em seguida ele colocou o Sol, a Lua e as estrelas no céu, e morreu assim que essas tarefas tinham terminado. Os fragmentos de seu próprio corpo ajudaram a completar o mundo. O crânio de Phan Ku formou a abóbada celeste, sua carne deu origem ao solo, seus ossos se transformaram nas rochas e seu sangue gerou os rios e mares. Seu último suspiro produziu o vento e as nuvens, enquanto seu suor transformava-se na

chuva. Seu cabelo caiu na Terra, criando a vida vegetal, e os PIOLHOS escondidos em seus cabelos forneceram a base para a ESPÉCIE HUMANA! E como o nosso nascimento exigiu a morte de nosso criador, fomos amaldiçoados com a tristeza eterna".

Bem antes do surgimento dessas visões míticas ou religiosas, a frágil e deambulante criatura humana desejava unicamente sobreviver, o que era muito penoso naqueles tempos, como já afirmado e ilustrado anteriormente. Os esboços de rationalizações que tal criatura empreendia, nessa distante época, eram meras e simples associações de idéias, frágeis nexos causais ou correlações entre eventos não muito dessemelhantes e parcamente desenvolvidos a partir dos escassos e imediatos fatos que podia apreender do mundo. Com o desenvolvimento da linguagem, pôde, enfim comunicar suas descobertas a outros indivíduos e legá-las às gerações seguintes, possibilitando sua continuidade enquanto espécie.

A esse modo prático e pouco eficiente de raciocinar do homem pré-histórico denominamos empirismo primitivo.

1.2 Tales de Mileto

Nada das rationalizações e/ou representações do mundo formuladas pelo homem pré-histórico ficou registrado para a posteridade, afora alguns interessantes rabiscos em grutas espalhadas pelo mundo. Contudo, o que se consolidou enquanto história foi que um grupo de homens, já possuidores do dom da escrita e que se vestiam e moravam decentemente, mas que ainda não faziam a barba, não tendo porque colocar a serviço da subsistência imediata o resultado de suas análises e reflexões, passou a meditar longa e exaustivamente a respeito de tudo quanto o ócio criativo trazia às suas mentes, inebriadas de vinho e do sol da Anatólia, atual Turquia, na Ásia Menor. Isso, lá pelos idos do séc. IV ou V antes de Cristo, ou séc. I ou II antes de Sócrates, daí esse grupo de, bem, por que não chamá-los pensadores, serem comumente apelidados de **pré-socráticos**.

Não apenas relações triviais e corriqueiras entre conceitos e fatos vizinhos ou assemelhados eram por eles estabelecidas, como normalmente se fizera até ali, mas amplas abstrações e generalizações, foram empreendidas por aqueles homens. Como na afirmação de Tales de Mileto, formulada a partir de suas longas observações e meditações sobre a *physis* (natureza), de que "Tudo é Água" – expressando a intuição de que todos os corpos são feitos de uma única essência ou substância. Tal forma de pensar o mundo nos remete ao sonho dos físicos teóricos de nossa época de encontrar um único conjunto de princípios do qual seriam derivadas todas as leis que governam os fenômenos naturais, a chamada "Teoria de Tudo" (em inglês TOE - Theory of Everything).

Aprofunde e dê mais exemplos do conceito de empirismo.



Tales de Mileto
640-545 a.C.

Uma Candidata a Teoria de Tudo

Supercordas: Considerada a teoria mais promissora, embora muito distante de uma confirmação experimental, postula basicamente que os objetos fundamentais da natureza não são partículas puntiformes, e sim minúsculos filamentos de energia que vibram incessantemente. Os estados de vibração desses filamentos dariam conta de todos os demais objetos do mundo e, em última instância, de todos os fenômenos naturais.

Pela primeira vez, com Pitágoras e o seu monocórdio, um fato natural (a vibração de uma corda fixa nas extremidades) foi compreendido em termos de conceitos matemáticos, antecipando em dois mil anos o que Galileu estabeleceria como princípio e diretriz da moderna Física.

É importante que se diga que a capacidade de generalização desenvolvida por esses homens da antiguidade, como Tales, decorre basicamente de suas mentes matemáticas. O raciocínio matemático parte de determinadas proposições ou enunciados para, de acordo com certas regras e procedimentos, chegar a novas proposições ou enunciados, alguns de caráter bastante geral. Como sabemos, àquele pensador é atribuída à formulação do chamado Teorema de Tales, que estudamos em nossos cursos colegiais de Geometria Plana, segundo o qual um feixe de retas paralelas, ao interceptar duas retas concorrentes, determina segmentos de reta cujas medidas guardam relações de proporção entre si.

Embora as teorias **cosmológicas** e **cosmogônicas** desse período da história não sejam explicitamente colocadas nos moldes de hipóteses e teses matemáticas, afirmamos que a mente matemática bem treinada de alguns desses pensadores, como Tales, contribuiu sobremaneira para a preparação e formulação de princípios gerais contidos nessas teorias. Veremos que, se no passado, a relação entre inferências acerca da natureza e a matemática era bem indireta ou fortuita, hoje há uma dependência quase que visceral entre elas.

1.3 Pitágoras

Pitágoras de Samos (c.570-496 a.C.) também fez afirmações de caráter universal, recorrendo diretamente a idéias e conceitos matemáticos, e propôs que “Tudo é Número”. Foi uma generalização do que esse filósofo e matemático observou a partir dos sons oriundos de um instrumento musical chamado monocórdio, que era constituído de uma única corda esticada e presa em suas extremidades sobre uma caixa de ressonância. Pitágoras percebeu que os sons produzidos pelo instrumento eram mais “harmônicos”, ou soavam de forma mais agradável aos ouvidos, quando se tangia a corda ao mesmo tempo em que era fixada em certos pontos intermediários, desde que esses pontos dividissem a corda em segmentos que representassem frações simples do seu comprimento total. Pitágoras ampliou esta idéia ao conceber que o mundo como um todo era composto de harmonias expressas a partir de relações numéricas ou proporções simples entre números inteiros.

O conceito grego de **cosmos** representa bem essa idéia de harmonia e proporção estendida para o Universo. Ele também se faz presente na arte produzida a partir desse período – denominada **clássica**, que se manifesta não só na pintura, escultura e arquitetura, mas também no teatro, literatura e música. Esse ideal grego de ordem e beleza fundamenta-se na relação bem proporcionada entre as partes que formam as obras artísticas, estabelecendo determinados padrões e regras no seu dimensionamento e na sua composição, os quais foram retomados sucessivamente em diferentes períodos da história ocidental da arte, como no Renascimento.

1.4 Zenão

Zenão de Eléia, nascido em 489 a.C., foi outro pré-socrático que exerceu enorme influência sobre gerações inteiras de pensadores. Seu objeto maior de reflexão e de crítica foi a realidade do movimento. Ele identificava a noção de **estar** com a de **ser** - um objeto situado em um lugar jamais poderia sair dele, uma vez que a posição ocupada pelo mencionado objeto era parte integrante de sua essência, ou do seu ser, de modo que o movimento, na perspectiva de Zenão, seria ilusório.

Esse filósofo ilustrou tal idéia com a estória da corrida entre Aquiles e a tartaruga: se fosse dada uma vantagem adicional ao réptil, Aquiles jamais o alcançaria, uma vez que, quando o veloz herói atingisse a marca de onde partira a tartaruga, esta teria avançado um pouco, e assim por diante até o infinito. Este é um dos famosos paradoxos de Zenão.

Hoje sabemos que não há nada de errado com a idéia do infinito, presente em nossos conceitos ordinários de espaço e tempo. A moderna análise matemática deu-nos rigorosas definições a respeito do contínuum, o qual sustenta a definição dos números reais. Com base nesse contínuo, pressupõe-se a existência de infinitos números reais entre dois reais quaisquer, os quais não podem ser postos em correspondência biunívoca com os inteiros. Por essa razão, os matemáticos dizem que eles são **não-enumeráveis**, ou seja, incontáveis.

Segundo outro argumento usado por Zenão para refutar a idéia de movimento, uma flecha disparada nunca atingiria o alvo, pois ela teria de percorrer metade da distância inicial entre o arqueiro e o alvo, depois a metade da distância restante e assim ad infinitum. Hoje, sabemos que é perfeitamente possível somar quantidades infinitas de números e obter-se um valor finito, como no caso das progressões geométricas de razão menor que um. Assim, por exemplo, temos que $\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \dots = 1$.

É um fato conhecido que, no início, os gregos tiveram dificuldades monumentais em lidar com números incomensuráveis - como o irracional $\sqrt{2}$. Há a lenda do homem que demonstrou a irracionalidade deste número (isto é, que não pode ser expresso pela razão entre dois inteiros) e foi assassinado, pois tal demonstração constituía uma afronta, um sacrilégio ao conceito pitagórico de harmonia e perfeição, da matemática e do mundo. Os paradoxos de Zenão talvez sejam, em última instância, sintomas dessa incompreensão ou não aceitação dos números irracionais.

Diferentemente do que afirmava Zenão, a Física Clássica de Galileu e Newton estabeleceu que, tanto a velocidade instantânea quanto a posição entram na definição do estado de uma partícula. Ou, numa linguagem mais filosófica, o movimento, juntamente com o lugar ocupado pela partícula, caracteriza a sua essência ou ser.

Dê outros exemplos de somas finitas com infinitos termos.

1.5 Os Atomistas

Prosseguindo em nosso estudo sobre os pré-socráticos, vamos conhecer outros pensadores que deram um passo extraordinário na compreensão de aspectos fundamentais do mundo natural, mas cujas idéias foram praticamente silenciadas por mais de dois milênios. São os chamados filósofos atomistas e seus dois expoentes são Leucipo de Eléia e Demócrito de Abdera. O primeiro, de acordo com o filósofo Aristóteles, escreveu uma obra intitulada *A Grande Ordem do Mundo*, a respeito da qual só existem referências de outros autores, como a do já citado filósofo. Nessa obra, Leucipo teria lançado as bases do atomismo, que consiste na afirmação de que o mundo é constituído de entidades fundamentais indivisíveis chamadas átomos (em grego, *tomas* significa partes, e *a* é o prefixo que exprime negação).

O discípulo de Leucipo, Demócrito, retomou e desenvolveu esta idéia em sua vasta obra escrita (o historiador e biógrafo antigo Diógenes Laércio menciona mais de noventa livros), da qual restam pouquíssimos fragmentos. Ele também se baseou no lampejo que teve quando cheirou um pão recém-saído do forno, imaginando que partículas extremamente pequenas e, portanto, invisíveis, se desprendiam do alimento e voavam até seu nariz, sensibilizando-o agradavelmente.

Assim, Demócrito sustenta que os átomos movimentam-se no vazio e tudo quanto há no mundo, desde corpúsculos insignificantes até as mais altas montanhas, passando por rios, oceanos, ventos e seres vivos, são ajuntamentos dessas unidades fundamentais, reunidas em maior ou menor grau de coesão. Uma idéia que, apesar de bastante antiga, aproximou-se razoavelmente bem daquilo que temos hoje como um paradigma inquestionável da Física, embora saibamos que os átomos já não são indivisíveis. Nas palavras do físico norte-americano R. Feynman, em suas *Lições de Física*, vol. I:

“Se em alguma catástrofe, todo o conhecimento científico fosse destruído e só uma frase pudesse ser passada para a próxima geração, qual seria a afirmação que conteria a maior quantidade de informação na menor quantidade de palavras? Eu acredito que seria a hipótese atômica (ou fato atômico, como queira chamá-lo), de que todas as coisas são feitas de átomos - pequenas partículas que se agitam em constante movimento, atraindo-se umas às outras quando separadas por pequenas distâncias, mas repelindo-se ao serem comprimidas umas contra as outras.

Leucipo e Demócrito não só anteciparam em 24 séculos um conceito que hoje em dia nos é muito caro, como o de átomo, mas há nele também o embrião daquilo que veio a ser denominado determinismo mecanicista que, com Isaac Newton, tornou-se a pedra angular de nosso modo de compreender

Defina, com suas palavras, o conceito de paradigma.

a natureza. Essa visão de mundo prescreve que as partículas que constituem o Universo interagem entre si em sequências de eventos de causa e efeito, como bolas se chocando em uma mesa de bilhar, por exemplo. Tais eventos estão na base de todo e qualquer fenômeno natural, de forma que conhecer o comportamento individual dessas partículas – o modo como interagem entre si e o movimento que executam – é conhecer todo o resto.

Alguns também se referem a esse tipo de concepção como reducionismo, isto é, todo fenômeno pode e deve ser decomposto e analisado em termos dos entes fundamentais que participam do referido fenômeno. Em uma linguagem contemporânea, dizemos que as propriedades **macroscópicas** de um sistema físico devem ser derivadas do comportamento dos entes **microscópicos** subjacentes. Ou, ainda mais sucintamente, o mundo macroscópico emerge do microscópico.

Aqui nos despedimos do pensamento pré-socrático, dando um grande salto no tempo, ignorando alguns importantes filósofos, como Sócrates e Platão, até chegarmos a Aristóteles.

Pesquise e escreva a respeito de outros filósofos pré-socráticos; Faça um relatório da importância da filosofia platônica para a história da ciência; Fale a respeito dos filósofos Lucrécio e Epicuro, que resgataram e divulgaram o pensamento atomista na Roma antiga;

O Mundo Aristotélico/ Ptolomaico

2.1 Aristóteles

Já citamos na seção anterior o filósofo Aristóteles. Nasceu em Estagira, na Macedônia, no ano de 384 a.C., viveu até 322 a.C. Foi discípulo de Platão e um profundo conhecedor de tudo quanto se produziu intelectualmente na Grécia até a sua geração. Forneceu grandes contribuições para o pensamento ocidental, as quais exerceceram uma influência avassaladora durante os séculos seguintes, a ponto de se tornarem a base para a Escolástica, que é o conjunto das doutrinas mantidas e ensinadas pela Igreja Católica durante a Idade Média.

A caracterização e sistematização do pensamento lógico, abstraído de sua roupagem matemática, foi uma das primeiras e importantes contribuições de Aristóteles para a Filosofia e para as ciências. Hoje em dia, rigor de pensamento é um dos requisitos básicos exigidos de todos aqueles que se dedicam a qualquer área das ciências. Nas exatas, como a Física, esse rigor é fundamental.

O estudo de tal maneira rigorosa de pensar é a **Lógica**. Consiste em estabelecer a formalização e estruturação de sentenças ou proposições de modo a se chegar a conclusões necessárias e inequívocas. Tal método de encadeamento de sentenças é conhecido por **silogismo** e é denominado **indutivo** (quando se parte de premissas particulares e se chega a conclusões gerais) e **dedutivo** (quando, do contrário, se parte do geral para o particular). Exemplo deste último: “Todos os homens são mortais; Sócrates é homem, logo Sócrates é mortal”. A lógica também deve nos prevenir em relação aos **falsos silogismos**, do tipo “A Terra é um planeta e tem vida. Marte é um planeta, logo ele deve ter vida”.

A principal contribuição de Aristóteles para a Física foi ao estudo do movimento. Conforme vimos, Zenão não acreditava na realidade do movimento e seus argumentos eram bastante intuitivos. Aquele filósofo, de certo modo, atualizou e incorporou em seu pensamento as idéias de Zenão, sem descartar a idéia de movimento de suas reflexões.

Dê exemplos de um silogismo indutivo.

A filosofia natural (ou física) aristotélica era de caráter teleológico, isto é, as causas dos movimentos eram finais. Não havia um “porquê” dos corpos se moverem, e sim um “para quê”.

Aristóteles afirmou que o movimento acontecia na medida em que:

- 1) Os corpos tendessem a procurar o lugar que lhes cabia no mundo – os chamados movimentos naturais;
- 2) Houvesse algum agente ou causa externa atuando no sentido de tirá-los de seu estado natural – os movimentos violentos.

Assim, por exemplo, os corpos pesados (ou graves, daí o nome gravidade), possuindo o elemento **terra** em sua constituição, tendem a cair para o solo, seu lugar natural. Os corpos leves, como a fumaça ou o vapor, tendem a mover-se para o alto, pois são formados com o elemento **fogo**. E o mesmo ocorreria com os demais corpos, dotados dos elementos **água** e **ar**.

Para Aristóteles, quanto mais pesado um corpo, mais prontamente ele procura o seu lugar natural junto à Terra, ou seja, mais rapidamente ele cai. Isto era bastante intuitivo, pois a experiência ordinária mostrava que os corpos leves demoravam mais tempo a chegar ao solo do que os pesados. Somente Galileu, no século XVII, desconstruirá essa idéia com sua famosa experiência da torre de Pisa.

Por outro lado, a flecha atirada pelo arqueiro só mantém o seu movimento “não-natural” ou violento enquanto a ação que a impulsionou ainda está presente. Segundo essa visão, a flecha vai se deslocando mais lentamente até cair, isto é, até prevalecer o movimento natural, devido à diminuição da ação do agente motor sobre ela. A idéia de **inércia** ainda estava longe de ser concebida, uma vez que, no sistema aristotélico, não poderia haver movimento se não houvesse o agente motor. Essa noção teria de esperar quase dois mil anos para ser formulada de forma consistente.

Aristóteles tomou emprestada uma antiga idéia do pré-socrático Empédocles de Agrigento, a de que o mundo material (sublunar) é formado pelos quatro elementos já citados (terra, ar, fogo e água). O filósofo macedônico acrescentou a esses elementos propriedades (ou **qualidades**, como ele denominou) de calor, frio, secura e umidade. De acordo ainda com o seu pensamento, esses elementos poderiam ser convertidos um no outro por meio da qualidade que possuísem em comum. O princípio material que deu forma a esses elementos é que seria imutável.

Tal pensamento veio a influenciar a **alquimia**, um conjunto de preceitos e conhecimentos a respeito das substâncias naturais perseguido durante muitos séculos por sábios (e charlatães), tanto do ocidente como do oriente, no sentido de dominar a matéria. Os alquimistas tinham dois objetivos básicos: encontrar a **pedra filosofal**, que permitiria a transmutação de um metal ordinário, como chumbo, em ouro, e o **elixir da vida**, que tornaria o homem imortal. O esforço empreendido pelos alquimistas no sentido de alcançar esses

objetivos resultou no aprimoramento de técnicas de manipulação das substâncias químicas, como, por exemplo, a destilação. A esses ancestrais dos químicos modernos também é atribuída a descoberta de alguns elementos químicos, como o fósforo, bismuto, arsênico, zinco e antimônio.

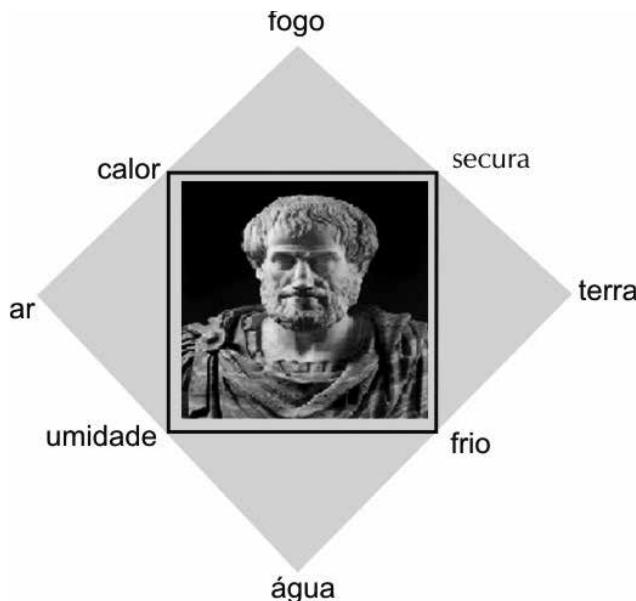


Fig.1.1 - Esquema indicando os quatro elementos e suas propriedades

Baseando-se em uma idéia de Platão, Aristóteles postulou a existência de um quinto elemento, a **quintessência**, que seria o lugar ou meio de permanência dos corpos supralunares, isto é, daqueles que estavam situados para além da Lua, os quais executariam seus movimentos naturais de acordo com trajetórias circulares. Para Aristóteles, o mundo celeste era incorruptível e os astros feitos de uma matéria eterna e imutável. Assim, o movimento natural desses astros deveria ser circular, pois o círculo era tido como a forma geométrica mais perfeita que existe. Mesmo o movimento aparentemente errático dos planetas poderia ser visto como uma combinação ou superposição de diversos movimentos circulares. Essa idéia, como veremos, foi aprimorada por Ptolomeu no século II de nossa era.

Aristóteles asseverou também que a natureza tem horror ao vácuo (*horror vacui*), uma vez que esse hipotético meio não ofereceria qualquer resistência ao movimento dos corpos. De acordo com ele, se houvesse vácuo os corpos mover-se-iam com velocidade infinita, o que seria um absurdo. Não era a primeira vez, e nem seria a última, que a idéia do infinito assombrava as cabeças dos que procuravam entender o funcionamento do mundo natural (vide hipertexto). Com esta crítica à idéia de vácuo, e ao considerar que objetos extensos indivisíveis são impensáveis do ponto de vista matemático, Aris-

Horror ao infinito

A Eletrodinâmica Quântica foi desenvolvida durante a primeira metade do século XX de nossa era e é a teoria que unificou o eletromagnetismo clássico de Faraday/Maxwell com os postulados da mecânica quântica, explicando com enorme precisão os fenômenos decorrentes da interação da luz com a matéria em nível microscópico. No início de sua formulação, o cálculo de algumas grandezas físicas resultava em valores infinitos e uma nova técnica matemática, chamada renormalização, teve de ser inventada para banir esses infinitos da teoria, o que valeu o prêmio Nobel de Física para I. Tomonaga, R. Feynman e J. Schwinger em 1965.

Discorra e discuta com seus colegas o significado da frase “para Aristóteles, a física dos céus era diferente da física terrestre”.

O atual Modelo Padrão das Partículas Elementares (MPPE), que descreve todas as partículas elementares conhecidas e as interações entre elas, com exceção da gravitacional, passará, a partir de 2010, por um grande teste de validade no interior do maior acelerador de partículas do mundo (LHC), construído a 100 metros de profundidade na fronteira da Suíça com a França. Apesar do enorme sucesso do MPPE na explicação de inúmeros processos físicos inerentes ao mundo subatômico, há importantes previsões aguardando confirmação experimental. Uma delas é sobre a partícula de Higgs, a partir da qual são geradas as massas das demais partículas, e que até agora não foi detectada. A busca por essa partícula será um teste decisivo para o MPPE.

tóteles contribuiu para que o pensamento atomístico caísse no ostracismo. Vimos que tal pensamento requeria a existência do vácuo como meio onde os átomos devessem se mover.

2.2 Ptolomeu

Cláudio Ptolomeu (110 – 170 d.C.) viveu a maior parte de sua vida em Alexandria, província do Egito que foi dominada pelos romanos, e onde existiu a maior biblioteca jamais construída até então, à qual havia anexos um museu e um zoológico. Para este centro de pesquisas do mundo antigo afluiam sábios de todos os lugares, em busca das centenas de milhares de papiros (fala-se em quase um milhão!) que reuniam todo o conhecimento humano daquela época. A biblioteca foi criminosamente incendiada no séc. IV de nossa era, perdendo-se para sempre os tesouros de saber e cultura que abrigava.



Fig. 1.2 - A moderna Biblioteca de Alexandria

O sistema mecânico/astronômico ptolomaico, classificado como geocêntrico, ou ainda geoestático, baseava-se na suposição aristotélica de que a Terra era fixa e os demais astros é que se moviam em círculos. Esta suposição era bastante natural para o homem daquele tempo, pois, segundo sua visão, se a Terra girasse em torno de um eixo passando pelo seu centro, por exemplo, um objeto lançado verticalmente para o alto não cairia sobre o mesmo ponto de onde fora lançado. Veremos que essa percepção é completamente errônea.

Para que o sistema de Ptolomeu descrevesse corretamente os movimentos do Sol, da Lua e dos cinco planetas conhecidos na época, como eram vistos da Terra, ele teve de considerar que nem todos aqueles círculos tinham

o seu centro em nosso planeta. Alguns deles, que Ptolomeu chamou de **epí-ciclos**, giravam em torno de pontos situados sobre outros círculos, os **deferentes**, estes, sim, com centro localizado na Terra ou próximo a ela. Depois o astrônomo acrescentou mais círculos e pontos extras, como os **excêntricos** e os **equantes**, para dar conta de outros movimentos observados naqueles astros. O sistema ptolomaico, descrito na sua obra magna *Almagesto*, possuía grande complexidade, pois exigia a construção de dezenas de círculos (mais precisamente, quarenta, contando com o das estrelas fixas) para que se representasse o movimento de uns poucos corpos celestes. Não obstante, era capaz de fazer previsões corretas sobre futuros eclipses solares e lunares, tendo sido o sistema modelar utilizado por astrônomos do ocidente e do oriente próximo até o início do século XVII.

Cumpre ressaltar que essa capacidade de fazer previsões é a virtude maior de toda e qualquer teoria científica. Um bom modelo teórico, além de explicar fenômenos já conhecidos, tem de apontar a existência de novos aspectos e/ou fatos da natureza, ainda não registrados. Este é o seu grande teste de validade (vide hipertexto).

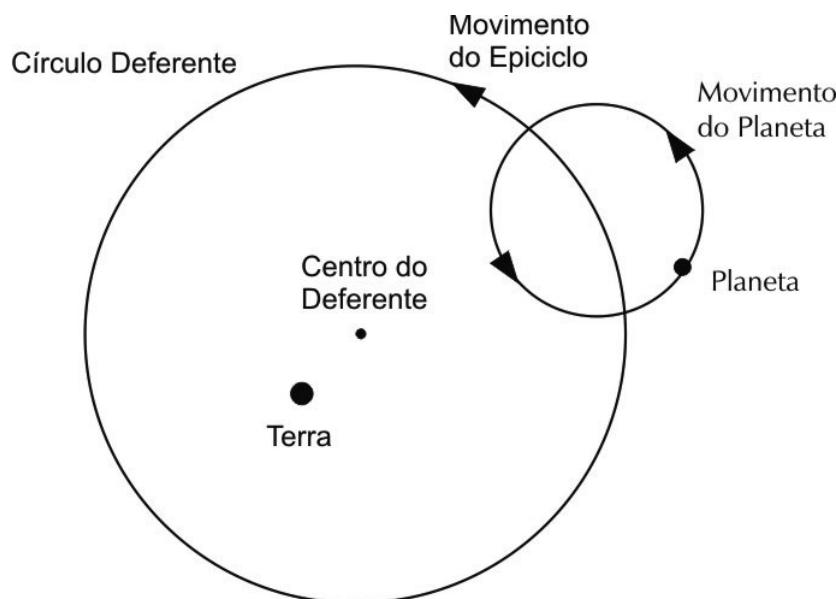


Fig. 1.3 - Esquema ilustrativo do sistema ptolomaico.

O início do fim do reinado Aristotélico/Ptolomaico

3.1 Okcham

Daremos outro salto gigantesco na história, o que não nos trará prejuízos, pois, como já assinalado, para as ciências físicas a Idade Média representou apenas a consolidação do sistema aristotélico/ptolomaico. Isto se deu graças à forte influência dos doutores da Igreja Católica, sendo o principal deles São Tomás de Aquino, um dos elaboradores da doutrina escolástica. Homens que se dispunham a questionar tal sistema de idéias eram invariavelmente condenados, quase sempre à morte, pelo poderoso tribunal do Santo Ofício (conhecido também por Inquisição), que não poupava nem os próprios integrantes da igreja.

Alguns, entretanto, tiveram a sorte de escapar com vida. Guilherme de Okcham (1285-1347) foi um frade franciscano nascido na Inglaterra que, cansado de se deparar com discussões estéreis motivadas pela escolástica, do tipo “quantos anjos cabem na cabeça de um alfinete?”, começou a considerar seriamente a possibilidade de Aristóteles ter cometido equívocos em seu pensamento.

Foi pioneiro ao propor a idéia de que o movimento poderia estar desvinculado da presença de um agente motor, diferentemente do que pensava Aristóteles, idéia que contribuiu fortemente para a posterior formulação do princípio de inércia. Também foi um dos primeiros a considerar a possibilidade de haver ação à distância entre os corpos, conceito basilar na formulação newtoniana da Lei da Gravitação Universal.

O filósofo inglês também se destacou por formular um princípio que ficou conhecido como “navalha de Okcham”, o qual, ainda hoje, serve de guia para muitos homens da ciência. Consiste na afirmação de que as necessidades não devem ser multiplicadas arbitrariamente (princípio da economia), isto

O conceito de ação à distância foi uma recusa à idéia aristotélica de que a ação entre os corpos só poderia existir por contato. Apesar de Newton ter formulado a sua Gravitação Universal em termos de ação à distância, achava-a contra-intuitiva.

A atual descrição que os físicos fazem da ação entre os corpos é uma espécie de síntese entre a idéia da ação por contato e à distância: ela se dá por meio dos campos.

é, devemos ter predileção por hipóteses ou teorias mais simples, que exijam uma quantidade mínima de leis ou proposições fundamentais, mas que consigam explicar o máximo de fatos ou fenômenos da natureza.

O princípio da navalha de Okcham atingiu indiretamente o sistema de Ptolomeu que, como vimos, era de uma complexidade enorme, a ponto do rei Afonso X, o Sábio (1221-1284), grande mecenas da Astronomia, haver afirmado, ao ser apresentado ao sistema ptolomaico:

“Se o Todo Poderoso me tivesse consultado antes de iniciar a criação, eu lhe haveria recomendado coisa mais simples”

Quando outro padre da igreja, Nicolau Copérnico, dois séculos depois, propuser o sistema heliocêntrico, a navalha de Okcham será invocada para que se decida entre os dois sistemas, uma vez que o de Copérnico era de uma simplicidade consideravelmente maior e explicava igualmente bem todos os movimentos dos astros.

A influência de Okcham no cenário intelectual da época foi profunda e duradoura. A Igreja Católica não ficou indiferente a ela, punindo-o com a expulsão da Universidade e recusando conceder-lhe o grau de mestre em Teologia. Um castigo que consideramos leve para os padrões daquela instituição.

3.2 Copérnico

Desde a época de Okcham, a Igreja Católica vinha se tornando muito mais intolerante e repressiva com os promotores de idéias consideradas heréticas. O padre, matemático e astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) era sabedor disso, de modo que resolveu adiar a publicação do seu tratado *Sobre as Revoluções das Esferas Celestes*, de 1540, embora tivesse elaborado um manuscrito que fez circular entre amigos de confiança, no qual expunha o seu sistema já em 1514 – os Pequenos Comentários de Hipóteses Sobre os Movimentos Celestes. O primeiro exemplar impresso do tratado de 1540 chegou às mãos do autor em seu leito de morte.

Nessas obras, Copérnico demonstra que é completamente desnecessário o emprego e a superposição de tantos círculos, como ocorre no sistema ptolomaico, para explicar o movimento dos planetas. Já comentamos que, vistos da Terra, esses astros apresentam trajetórias bastante complicadas, com diversas paradas e retrocessos em sua incursão pelo céu durante a noite.

Para Copérnico, entretanto, é suficiente que todos os planetas, inclusive o nosso, executem órbitas circulares em torno do Sol com velocidades angulares constantes, mas distintas entre si (rigorosamente, o centro desse novo sistema não estava no Sol, e sim em um ponto bem próximo a esse astro chamado equante, que é um elemento do sistema ptolomaico mantido por Copérnico. Assim, as órbitas planetárias eram circulares, mas excêntricas).

cas). Os planetas mais afastados do Sol girariam mais lentamente que os mais próximos. Por exemplo, o planeta menos distante, Mercúrio, perfaz uma revolução em torno de nossa estrela em 80 dias terrestres, e Saturno, o mais distante que se sabia na época, em 30 anos.

O sistema copernicano, consideravelmente mais simples que o de Ptolomeu, foi denominado **heliocêntrico**, pois o Sol ocupa o centro dos círculos concêntricos descritos pelos planetas. Nas palavras do próprio Copérnico:

"Imóvel, no entanto, no meio de tudo, está o Sol. Pois nesse mais lindo templo, quem poria tal candeeiro em outro lugar melhor do que este, do qual ele pode iluminar tudo ao mesmo tempo?"

Mais tarde, Kepler mostrará que Copérnico estava certo, com exceção de que as trajetórias dos planetas são elípticas, e não circulares.

3.3 Bruno

Giordano Bruno (1548-1600) foi um entusiasta das idéias de Copérnico. Defendia o heliocentrismo, mas por razões diferentes daquelas apresentadas pelo astrônomo polonês. Ordenado frade dominicano, foi expulso da ordem por ter sido acusado de propalar idéias e práticas de magia, tendo de fugir da Itália a fim de escapar das malhas da Inquisição. Percorreu vários países da Europa, como França, Inglaterra e Alemanha, contribuindo para a disseminação do sistema copernicano por onde andou.

O ex-frade acreditava que o Sol ocupava o centro do nosso sistema planetário. Sua crença era devida à influência que recebeu dos textos de filosofia hermética que havia lido, elaborada por um místico do Egito antigo chamado Hermes Trimegisto. De acordo com essa filosofia, o Sol desempenhava um papel primordial como fonte de vida e de emanações divinas.

Bruno se destacou também por imaginar que o Universo era de extensão infinita, preenchido por infinitos sistemas planetários, muitos deles iguais ou semelhantes ao da Terra e povoados com vida inteligente. Com essas idéias, ele mais uma vez se contrapôs à Igreja, pois, de acordo com elas, nosso lar planetário perdia sua prerrogativa de lugar escolhido por Deus para a realização de Seus desígnios através da criação do homem, feito à Sua imagem e semelhança.

Na concepção de Bruno, se o Cosmos é infinito, não há mais porque considerarmos a Terra ou qualquer outro astro como o seu centro. Nesse aspecto, ele foi além de Copérnico, pois nem o Sol era mais visto como o centro de tudo. Isto significa que não existe um lugar ou posição privilegiada no Universo, e esta foi uma brilhante antecipação do que os cosmólogos do século XX vieram a formular com a finalidade de fornecer uma explicação científica para a sua estrutura e evolução, o chamado **Princípio Cosmológico**.

O primeiro sistema heliocêntrico foi proposto por um grego da ilha de Samos, chamado Aristarco, 1800 anos antes de Copérnico. Esse notável astrônomo fez observações e cálculos no sentido de estimar os diâmetros do Sol, da Lua e a distância da Terra a esses dois astros.

Faça um estudo comparativo entre sistemas heliocêntrico e geocêntrico.

Pesquise e defina o conceito de Ano-Luz.

A idéia dos infinitos mundos de Giordano Bruno ganha ainda mais sentido neste início de século, quando a astronomia observational vem descobrindo os chamados planetas extrassolares, que orbitam outras estrelas. Atualmente, são conhecidos mais de trezentos desses objetos, e a meta é tentar identificar mundos planetários parecidos com a nossa Terra.

Esse princípio afirma que o Universo, quando observado a distâncias maiores que 300 milhões de **anos-luz**, apresenta o mesmo aspecto ou aparência, qualquer que seja a direção para a qual apontemos nossos instrumentos. Dito de outra maneira, a matéria universal, formada pelas galáxias e seus aglomerados, parece distribuir-se uniformemente em todas as direções. Ou ainda, o Universo é **homogêneo e isotrópico**.

Bruno cometeu o erro fatal de retornar para a Itália, onde continuou a divulgar suas idéias. Foi denunciado por um desafeto, preso, julgado e, após um longo e penoso processo, condenado pelo tribunal da Inquisição a morrer na fogueira. A execução ocorreu a 17 de fevereiro de 1600, em uma praça da cidade de Roma.

3.4 Kepler

A revolução promovida por Copérnico começou a ganhar força a partir das investigações de Johannes Kepler, nascido em 27 de dezembro de 1571, em um pequeno vilarejo alemão de domínio luterano. Dedicou-se ao estudo da Astronomia e da Matemática, passando a conhecer a fundo o modelo copernicano. No início de sua carreira, ganhava a vida fazendo mapas astrológicos para os nobres da época.

Logo após conseguir um posto de professor em uma escola luterana da cidade austríaca de Graz, no ano de 1594, durante uma aula, Kepler teve a extravagante idéia de inscrever os cinco sólidos perfeitos de Platão em seis esferas concêntricas que ele associou com a órbita dos planetas conhecidos, incluindo a Terra, com o Sol ocupando o centro do arranjo. Esse modelo é conhecido como a **Taça de Kepler** (vide fig.1.4), descrito com detalhes na sua obra de referência *Mysterium Cosmographicum*, publicada em 1625.

Os sólidos de Platão são figuras geométricas tridimensionais fechadas, cujas faces são formadas por polígonos regulares congruentes. Estas figuras são o cubo, formado por 6 quadrados; o tetraedro, cujas 4 faces são triângulos equiláteros; o dodecaedro, com 12 faces que são pentâgonos; o icosaedro e o octaedro, formados, respectivamente, de 20 e 8 faces que são novamente triângulos equiláteros. No modelo proposto, a última esfera era a de Saturno e, entre cada uma das demais esferas (correspondentes às órbitas de Júpiter, Marte, Terra, Vênus e Mercúrio), Kepler inscreveu os sólidos regulares na ordem acima descrita.



Johannes Kepler

Estabeleça e discuta com seus colegas a distinção entre Astronomia e Astrologia.



Fig. 1.4 - Modelo de Kepler para o Sistema Solar

Dessa forma, Kepler pôde determinar, por meio de argumentos puramente geométricos, o tamanho da órbita dos planetas conhecidos com um erro de apenas 5%, uma vez que a razão entre as distâncias das esferas ao centro do arranjo era praticamente a mesma obedecida pelas órbitas planetárias! Coincidência? Talvez... Contudo, a descoberta dos outros três planetas (Urano, Netuno e Plutão) do Sistema solar, muitos anos depois, fez cair por terra o arranjo kepleriano, que era verdadeiramente impressionante. Esse modelo é considerado uma tentativa de conciliar as velhas concepções gregas de harmonia e ordem com as modernas e revolucionárias idéias de Copérnico.

Essa idéia de harmonia ou **música das esferas**, que vem desde a época de Pitágoras, perseguiu a mente de muitos homens, mesmo depois de Newton haver formulado sua Lei da Gravitação Universal. Assim, Johann Daniel Titius (1729-1796) encontrou uma lei empírica que relacionava os números naturais às órbitas dos planetas, de forma semelhante à que Pitágoras associou com a vibração de uma corda. Vale a pena conhecê-la nas palavras do próprio Titius:

"Tome-se a distância do Sol a Saturno como 100 unidades, Mercúrio distará do Sol 4 dessas unidades; Vênus $4 + 3 = 7$ unidades; a Terra $4 + 6 = 10$; Marte $4 + 12 = 16$. No entanto, note-se que entre Marte e Júpiter há um desvio a esta progressão, uma vez que a seguir a Marte vem $4 + 24 = 28$ unidades, onde até ao presente nenhum planeta foi descoberto. Será que o Construtor deixou este espaço livre? Nunca! Sem dúvida este lugar é ocupado por um satélite de Marte, que ainda não foi descoberto [...]. Depois temos a posição de Júpiter $4 + 48 = 52$ e Saturno $4 + 96 = 100$. Mas que relação tão curiosa."

De certa forma, a Lei de Titius será resgatada pelo modelo de Niels Bohr para o átomo de hidrogênio, quase 150 anos depois. Neste modelo, as órbitas permitidas aos elétrons em torno do núcleo atômico também são expressas em termos de números inteiros, isto é, são quantizadas.

Use a Lei de Titius para Netuno e compare o resultado encontrado com a distância média real deste planeta ao Sol (pesquise). A discrepância é grande ou pequena?

A estrela observada por Brahe, em 1572, foi uma Supernova, que representa o estágio final da evolução de estrelas de grande massa. Nessa ocasião, a estrela, não mais suportando seu enorme peso, desaba sobre si mesma, para em seguida explodir num evento de gigantesca magnitude, emitindo bilhões de vezes mais luminosidade que o nosso Sol.

Multiplicando-se os números obtidos a partir dessa lei matemática, cuja expressão é $D_n = 4 + 3 \times 2^n$, com $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, por 15.000.000, obtém-se a distância média, em quilômetros, dos planetas ao Sol. Como lemos acima, Titius afirmou que, para $n = 3$, não existe um planeta correspondente, e sim um satélite de Marte. Na verdade descobriu-se, em 1801, o asteroide Ceres, o maior de todos os que se situam no chamado **Cinturão de Asteróides**, entre as órbitas da Terra e Marte, a uma distância média descrita pela Lei de Titius com uma boa aproximação. A partir de 2006, Ceres foi classificado pela União Astronômica Internacional como **Planeta-Anão**, juntamente com o ex-planeta Plutão e mais três outros astros que orbitam o Sol.

Não obstante o enorme sucesso granjeado pela Lei de Titius, a exemplo do que ocorreu ao modelo de Kepler, ela veio a perder sua credibilidade quando deixa de se aplicar ao planeta Netuno, descoberto no ano de 1846.

Mas voltemos a Kepler. Este, juntamente com outros professores da escola onde ensinava, apesar do grande prestígio que havia conquistado, foi expulso da cidade de Graz pelas autoridades vinculadas à Igreja Católica, que se tornara ainda mais intolerante com o estabelecimento da Contra-Reforma. Recebe, então, um convite para trabalhar em Benatek, nos arredores de Praga, e lá foi acolhido pelo eminentíssimo astrônomo dinamarquês Tycho Brahe. Este homem, durante trinta anos, realizou minuciosas observações dos astros com instrumentos que ele mesmo havia projetado, as mais acuradas feitas antes da invenção do telescópio, e guardava consigo as anotações de tudo o que havia observado.

Uma dessas observações, por exemplo, tratava de uma estrela nova (vide hipertexto) que surgira na constelação de Cassiopéia, descoberta quando Brahe tinha vinte e seis anos. Esse registro tornou-se importante porque derrubava a tese aristotélica, muito cara à Igreja Católica, de que os céus, para além da esfera lunar, eram imutáveis e, portanto, incorruptíveis. Com efeito, Brahe demonstrou que essa nova stella estava situada na esfera das estrelas fixas, bem mais distante, portanto, da Terra do que a Lua.

Kepler só teve acesso aos preciosos registros de Brahe após a morte deste, ocorrida em 1601. De posse dos mesmos, passou a estudar a órbita do planeta Marte, a mais complicada de todas quando observada da Terra. Verificou que essa trajetória não se adequava ao modelo de Copérnico, e, após muitos cálculos e reflexões, percebeu que a única curva a ser seguida pelo planeta em seu trânsito ao redor do Sol, compatível com as observações precisas de Brahe, era a elipse. E assim, ele pôde formular sua **Primeira Lei do Movimento Planetário**:

“Os planetas seguem curvas que são elipses, com o Sol ocupando um dos seus focos.”

É importante que se diga que, apesar da Terra percorrer uma órbita elíptica em torno do Sol, a **excentricidade**, isto é, o achatamento dessa órbita é tão pequeno que a sua forma é praticamente a de um círculo. Se assim não fosse, veríamos o diâmetro do disco solar maior em certa época do ano e menor em outra, o que nunca é observado, de modo que não devemos explicar a sucessão das estações como decorrente da forma da órbita terrestre. As estações são devidas, na verdade, à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol.

Kepler verificou também que Marte viajava mais rápido quando estava mais próximo do Sol e, mais devagar, quando estava mais distante, de forma que enunciou sua **Segunda Lei do Movimento Planetário**, ou Lei das Áreas:

“O raio vetor que liga o Sol ao planeta varre áreas iguais em tempos iguais”

As duas áreas hachuradas da fig. 1.5 têm a mesma medida e são percorridas, devido à Segunda Lei de Kepler, no mesmo intervalo de tempo. Podemos perceber que o arco sobre a elipse, correspondente à área de maior abertura angular, tem comprimento maior que o traçado sobre a outra área, de modo que o planeta é mais veloz nesse trecho, localizado mais proximamente ao Sol.

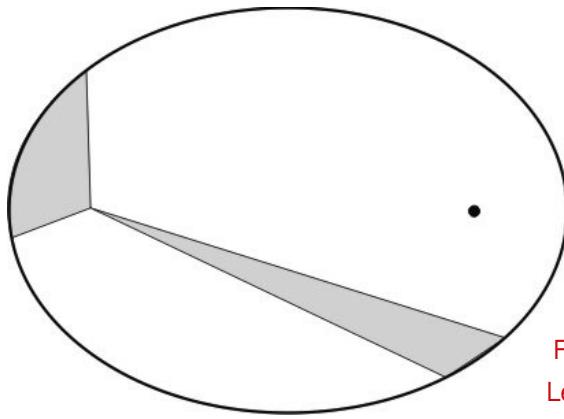


Fig. 1.5 - Primeira e Segunda Leis de Kepler

Historicamente, a Primeira Lei foi descoberta depois da Segunda, mas, por motivos didáticos, prefere-se enunciá-las na ordem aqui exposta. A razão para a Segunda Lei ter sido descoberta primeiramente é que ela é a mais geral das três, válida para qualquer sistema cuja dinâmica é governada por uma **força central**, isto é, por uma força que está sempre dirigida para um ponto fixo do espaço. No caso dos planetas, esse ponto fixo – um dos focos da elipse – está no Sol. O fato de termos uma força central regendo o comportamento dos planetas determina também que eles sigam curvas situadas em um plano (vide hipertexto). Kepler percebeu isto e abandonou seu modelo baseado nos sólidos de Platão, que acomodava as órbitas planetárias em esferas concêntricas.

A Hipótese Nebular –
Desde muito tempo, sabe-se que as órbitas planetárias situam-se em um plano comum, ocorrendo pequenos desvios para fora do mesmo, o que levou o filósofo alemão Immanuel Kant (1724-1804) a formular a hipótese de que o Sol e os planetas foram gerados a partir de uma nebulosa muito quente que girava com grande velocidade angular. Devido, então, aos efeitos centrífugos oriundos dessa rotação, a nebulosa tornou-se bastante achatada, dando origem ao plano no qual atualmente orbitam os planetas, formados a partir de condensações da referida nebulosa.

Traçando uma elipse:
fixe, em um pedaço de fórmica, dois pregos a dez centímetros um do outro. Ajuste um barbante em volta dos pregos e prenda suas pontas. A seguir, deslize um marcador (pincel para lousa branca, por exemplo), posicionado entre os pregos e as pontas do barbante, forçando-o “para fora”. A curva traçada sobre a fórmica é uma elipse, e os pregos ocupam os seus dois focos.

Já a Primeira Lei aplica-se também para forças centrais, mas especificamente para o tipo que varia com o inverso do quadrado da distância até o centro, como é o caso da força gravitacional. Kepler não precisava conhecer essa informação, nem a utilizou, pois seu objetivo era apenas adequar o traçado da curva do planeta às observações de Brahe. De qualquer forma ele intuiu, bem antes de Newton, que a gravidade deveria ser uma força que obedece à lei do inverso do quadrado, em analogia ao que havia descoberto antes em suas investigações sobre ótica, a saber, que a **luminosidade** de uma fonte de luz também obedece a essa lei. Assim, o Sol, fonte de luz e de vida também é a fonte de onde emanaria a força que guia os planetas em seu cortejo celeste.

Kepler, dez anos após a publicação de sua obra Astronomia Nova ou Física Celeste, de 1609, onde expôs as duas leis do movimento planetário que descobriu, publica a Harmonia do Mundo, na qual descreve a **Terceira Lei do Movimento Planetário**, ou Lei dos Períodos:

“A razão entre os quadrados dos períodos das órbitas de dois planetas é igual à razão entre os cubos dos semi-eixos maiores de suas órbitas elípticas”.

Expresso em linguagem matemática, temos que $\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3$, onde

os sub-índices 1 e 2 referem-se aos dois planetas em questão.

Antes de morrer, em 1630, Kepler dedicou-se ao estudo da Ótica, e, além da Lei da Luminosidade, descobriu outras leis associadas à trajetória e curvatura da luz em lentes côncavas e convexas. O uso do telescópio estava começando a se consolidar na prática da Astronomia e era conveniente conhecer como se processava a ampliação da imagem de objetos distantes, a fim de se otimizar o desempenho de tais instrumentos a partir de seu projeto e fabricação.

Galileu Galilei, de quem falaremos na próxima seção, embora não tenha sido o inventor do telescópio, teve um papel de grande importância como hábil construtor desses instrumentos e, mais ainda, ao empregá-los na observação dos corpos celestes, realizando descobertas astronômicas extraordinárias. Contudo, seu papel de maior relevância foi mesmo o de **construtor da moderna ciência**, tal como hoje a conhecemos e praticamos.

- **Lei da Luminosidade de Kepler:** Vamos supor que nos encontramos a certa distância de uma vela acessa. Se nos afastarmos para uma distância três vezes maior, quantas vezes sua luz aparecerá mais fraca?
- Use a Lei dos Períodos para encontrar a maior distância de Marte ao Sol. Dados: 1) Maior distância da Terra ao Sol: 152,1 milhões de km; 2) Período da órbita de Marte em torno do Sol: 780 dias.
- Comente as principais descobertas astronômicas feitas por Galileu com o uso do telescópio.

4

Capítulo

Galileu e o nascimento da Mecânica

4.1 Galileu

Como vimos na seção anterior, os amplos e regulares movimentos dos principais corpos celestes (“supralunares”, na terminologia aristotélica) foram codificados por Kepler nas suas famosas três leis do movimento planetário. Faltava agora codificar os breves e caóticos movimentos dos corpos terrestres (“infralunares”). Tal tarefa coube a Galileu Galilei (1564-1642).

Este matemático e astrônomo italiano, desde cedo, reconheceu a importância de se fazer experimentos controlados com o propósito de minimizar as perturbações, de eliminar ou reduzir ao máximo a interferência de fatores que são alheios à natureza dos entes ou fenômenos que estão sendo investigados. Com isso, pretendia perceber regularidades também no movimento dos corpos terrestres.

Galileu mostrou a necessidade de se instituir padrões de medidas para as grandezas físicas, que fossem numericamente expressas, podendo ser comparadas entre si nos diversos experimentos e relacionadas por meio de equações matemáticas. As grandezas e suas medidas são formuladas em termos de conceitos físicos e as leis matemáticas que as relacionam caracterizam um **modelo teórico**, que deve ser testado por meio de experimentos **reprodutíveis** e capaz de prever resultados ainda não conhecidos. Esta é a essência do chamado **método científico**, e Galileu parece ter sido o primeiro a formulá-lo e utilizá-lo amplamente.

Instituído o método, Galileu passou a investigar os movimentos que ocorrem com os corpos na superfície da Terra como, por exemplo, com esferas de metal em queda livre. Era de grande utilidade o estudo do movimento de esferas metálicas sob a ação da gravidade, isto é, de projéteis lançados dos canhões que proliferavam naqueles tempos de intermináveis e numerosas guerras, não muito diferentes do nosso. Esse estudo é denominado **Balística**.

Para justificar o uso da Matemática no estudo dos fenômenos físicos, Galileu afirmou que a “linguagem do mundo natural estava escrita em caracteres matemáticos”. O físico húngaro Eugene Wigner, no século XX, acreditava que a incomparável capacidade preditiva de determinadas teorias físicas estava no extenso uso que faziam da “nada razoável razoabilidade da Matemática”.

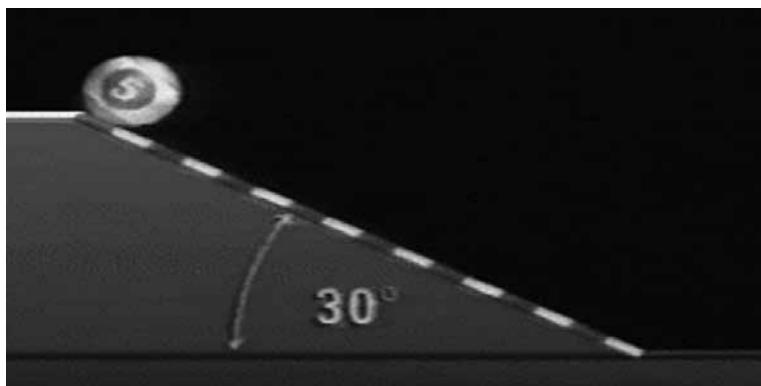


Fig. 1.6 - Representação de uma esfera sobre um plano inclinado

Como era complicado extrair medidas diretamente de esferas em queda livre, Galileu concebeu a idéia de fazê-las rolar sobre planos inclinados com superfícies perfeitamente polidas, ou seja, com o mínimo de irregularidades, a fim de reduzir o atrito e diminuir sua taxa de variação da velocidade, isto é, sua **aceleração**, durante a queda. Este último conceito será definido detalhadamente mais adiante.

Em seus experimentos, Galileu trabalhou com dois planos inclinados unidos em sua base por um terceiro plano, horizontal. Ele observou que a esfera abandonada a partir de certa altura do solo rolava pelo primeiro plano inclinado, percorria a superfície horizontal para, em seguida, subir o segundo plano inclinado até alcançar a mesma altura de onde havia partido. Repetiu diversas vezes esse experimento, estabelecendo inclinações e distâncias diferentes para os planos inclinados, mas obtinha sempre o mesmo resultado: a esfera subia o segundo plano e atingia a mesma altura de onde havia rolado inicialmente.

Foi aí que Galileu extrapolou os experimentos realizados, fazendo a seguinte pergunta: e se o segundo plano inclinado estivesse a uma distância **infinita** do primeiro? Não haveria razão para a esfera interromper o seu movimento no plano horizontal. Assim, concluiu que ela deveria prosseguir indefinidamente no seu trajeto em busca do segundo plano inclinado, desde que não se considerasse a resistência oferecida pelo ar. Que tipo de movimento seria este, então? Galileu verificara que quanto maior (ou menor) a inclinação do plano mais rapidamente (ou lentamente) variava a velocidade da esfera. Como no plano horizontal a inclinação era nula, não haveria variação da velocidade, ou seja, ela deveria ser **constante**, ou seja, em movimento retílineo e uniforme.

Com a ajuda desses experimentos, Galileu foi pioneiro ao estabelecer a Lei da Inércia, que será enunciada por Isaac Newton alguns anos mais tarde, demolindo de vez a suposição aristotélica de que é necessário um agente motor atuando sobre os corpos para que ocorra o movimento. Assim, ao abstrair as causas do movimento dos corpos, Galileu foi o criador da **Cinemática**.

4.2 A Cinemática

Essa área de estudos da Física leva em conta apenas as relações existentes entre o espaço – cenário dos acontecimentos (lugar) - e o tempo – ritmo dos acontecimentos (duração). As propriedades intrínsecas das partículas que se movimentam, bem como a forma com que interagem umas com as

outras, não são consideradas nessa análise. A relação dessas propriedades e interações com o movimento das partículas constitui o objeto de estudo da Dinâmica, que juntamente com a Cinemática, forma a Mecânica.

Iniciar o estudo da Física pela investigação do movimento é um bom começo, pois ele está presente em todos os fenômenos da natureza, desde a frenética agitação das moléculas de um gás até o incessante recuo das distantes galáxias de nosso Universo em expansão. Para o estudo da Cinemática, ou dos movimentos considerados per se, definir alguns conceitos como **velocidade e aceleração** é imprescindível.

Examinemos o primeiro desses conceitos no tipo de movimento mais simples que existe – o **movimento retilíneo uniforme**. Os gregos antigos tinham idéia do movimento uniforme, mas não puderam definir adequadamente o conceito de velocidade, pois achavam que espaço e tempo eram conceitos radicalmente **distintos** um do outro, de modo que não achavam correto dividir medida de espaço pela de tempo. Assim, definiam que um corpo está em movimento retilíneo uniforme quando ele percorre distâncias que são proporcionais aos tempos gastos em percorrê-las, ou seja, se em determinado trecho do seu movimento em linha reta o corpo percorre uma distância d_1 num tempo t_1 e, em outro trecho, percorre d_2 num tempo t_2 , então:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_1}{t_2} \quad (1.1)$$

Sabiam também que é matematicamente correto fazer

$$\frac{d_1}{t_1} = \frac{d_2}{t_2}, \quad (1.2)$$

mas não viam sentido em dividir grandezas de naturezas tão distintas, de modo que preferiam a forma (1.1), perdendo a chance de formular adequadamente o conceito de velocidade (vide hipertexto).

Modernamente, definimos que se a razão (1.2), que chamamos de **velocidade média**, for igual para **qualquer trecho** do movimento executado pelo corpo, esse movimento é dito retilíneo e uniforme.

As unidades de medida mais frequentemente empregadas para a velocidade são o m/s (metro por segundo), o km/h (quilômetro por hora) e o cm/s (centímetro por segundo). A conversão entre essas unidades é fácil. Se quisermos, por exemplo, converter m/s em cm/s (e vice-versa), basta lembrarmos que $1\text{cm}=1\text{m}/100$ ou $100\text{cm} = 1\text{m}$. Se quisermos também converter para km/h, temos $1\text{m}=1\text{km}/1000$ ou $1000\text{m}=1\text{km}$, e ainda que $1\text{h}=3600\text{s}$ ou $1\text{s}=1\text{h}/36$. Então, por exemplo,

$$300\text{cm} / \text{s} = 300 \frac{100}{\text{s}} \frac{\text{m}}{100} = 300 \frac{\text{m}}{100 \cdot \text{s}} = 3\text{m} / \text{s}$$

Hoje em dia, além de relacionarmos diretamente os conceitos de espaço e tempo por meio do conceito de velocidade, sabemos também que há uma velocidade limite (máxima) na natureza igual à velocidade da luz, o que implica que espaço e tempo são grandezas que não só estão relacionadas entre si, mas que também são essencialmente indistintas.

Questão rápida: Se, em movimento retilíneo e uniforme, um corpo percorre 20 metros em 5 segundos, quanto tempo levará para percorrer 60 metros? Qual é a sua velocidade?

Nesse outro exemplo, temos que

$$200m/s = 200 \frac{\frac{1km}{1000}}{\frac{1h}{3600}} = 200 \cdot \frac{3600}{1000} km/h = 720 km/h$$

Vamos assinalar com um marco referencial (ou marco zero) um ponto da reta por onde trafega o móvel, como a placa “km 0” em uma BR. A partir desse marco todas as distâncias serão medidas, de modo que a distância inicial, isto é, aquela medida em relação ao marco zero quando acionamos nossos relógios ou cronômetros para monitorar o movimento, será escrita davante como s_0 . Ao fim de certo tempo t medimos novamente a distância do móvel até o marco zero, que chamaremos simplesmente s , e que obviamente será uma função do tempo cronometrado t . Assim, de (1.2) a velocidade média será definida por

$$\frac{s - s_0}{t} = v \quad (1.3)$$

onde $s - s_0$ é a distância percorrida. Se o movimento é uniforme, então a velocidade média v será a mesma qualquer que seja s e s_0 , e a relação (1.3) é simplesmente denominada velocidade. Se quisermos encontrar a distância final s em relação ao marco zero depois de um tempo t , temos, então,

$$s(t) = s_0 + vt \quad (1.4)$$

Assim, no movimento retilíneo e uniforme, a relação entre a distância final e o tempo de percurso é linear (dependente apenas da potência primeira do tempo).

Além do exposto, pode-se considerar a possibilidade de termos um móvel se deslocando em linha reta cuja velocidade sofre variação, como no caso examinado por Galileu, quando fez esferas de metal rolarem por planos inclinados. Aqui entra o conceito de aceleração. Da mesma forma como definimos velocidade média, definiremos **aceleração média**, a, como sendo a variação da velocidade ($v - v_0$) dividida pelo tempo t em que se deu (ou se observou) essa variação:

$$\frac{v - v_0}{t} = a \quad (1.5)$$

O tipo de movimento acelerado mais simples que existe é o **uniformemente variado** e acontece quando, para qualquer medida de v_0 e v ao longo do deslocamento do corpo, obtivermos sempre o mesmo valor para a quando dividirmos a variação da velocidade pelo tempo gasto t . Neste caso, essa

grandeza é simplesmente denominada aceleração e, de (1.5), temos que a velocidade final v pode ser calculada, desde que saibamos qual a velocidade inicial v_0 , o tempo t e a aceleração a :

$$v = v_0 + at \quad (1.6)$$

As unidades de medida mais usadas para aceleração são o m/s^2 e o cm/s^2 , pois aceleração indica, no primeiro caso, variação de velocidade (m/s) por unidade de tempo (s), de modo que temos $(m/s)/s = m/s \cdot s = m/s^2$. Assim, um corpo que tinha uma velocidade inicial de $5m/s$ e aumentou uniformemente para $10m/s$ em um tempo de $10s$, sofreu uma aceleração de $a = (10\ m/s - 5\ m/s)/10\ s = 0,5\ m/s^2$.

Galileu descobriu que o movimento uniformemente variado ocorre com corpos próximos à superfície da Terra, em queda livre ou rolando por planos inclinados, desde que efeitos de atrito sejam desprezíveis. Esse cientista italiano também descobriu que os corpos, **independentes de seu peso ou constituição interna, caem com a mesma aceleração**, escrita nos textos científicos como g e é igual a aproximadamente $9,8\ m/s^2$. Essa descoberta representou outro golpe para a Física de Aristóteles, que afirmava que os corpos mais pesados caem mais rapidamente.

Como calculamos as distâncias percorridas nesse tipo de movimento? Se este for uniformemente variado podemos simplesmente considerar a média aritmética da velocidade $\bar{v} = \frac{1}{2}(v + v_0)$, achando-a a partir da expressão (1.6) e substituindo-a em (1.4), a seguir. Nesse tipo de movimento a velocidade média, como expressa em (1.3), é exatamente igual à média da velocidade. Para isso, vamos acrescentar v_0 aos dois membros de (1.6) e depois dividi-los pelo fator 2, de modo a ficarmos com

$$\bar{v} = \frac{v + v_0}{2} = v_0 + \frac{at}{2} \quad (1.7)$$

Substituindo em (1.4) o valor encontrado para a média da velocidade, ficamos com

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1.8)$$

Verificamos, portanto, tal como Galileu encontrou experimentalmente, que no movimento uniformemente variado a distância percorrida pelo móvel varia **quadraticamente** com o tempo, isto é, depende da potência segunda desta grandeza.

Situação – problema: Uma pequena pedra foi abandonada por Galileu do topo da Torre de Pisa, que tem $58\ m$ de altura. Desprezando-se a resistência do ar, com que velocidade ela atingiu o solo?



Torre de Pisa - Itália

Dos dados fornecidos pelo problema, sabemos que a altura da torre é $s = 58\text{m}$, a velocidade inicial $v_0 = 0\text{m/s}$ (se a pedra é solta então ela parte do repouso), a distância inicial $s_0 = 0\text{m}$ (escolhemos o marco zero como sendo o topo da torre) e $a = g = 9,8\text{m/s}^2$. Substituindo em (1.8) temos

$$58\text{m} = (0 + 0.t + \frac{1}{2}9,8.t^2)\text{m} \Rightarrow 58 = 4,9t^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{58}{4,9}} \approx 3,4\text{s}$$

onde o símbolo \approx indica aproximação ou arredondamento. Uma vez que aceleração e velocidade são vetores (objetos matemáticos a serem estudados oportunamente) e têm a mesma direção (a reta vertical), se o sentido da velocidade inicial fosse contrário ao da aceleração da gravidade, estas grandezas entrariam com sinais opostos em (1.8).

Situação – problema: com base no último exercício proposto, calcule o tempo que a pedra levou desde que foi solta do topo da Torre de Pisa até chegar ao solo.

É possível encontrarmos outra expressão que relaciona desta vez a velocidade final com a velocidade inicial, a aceleração e a distância percorrida pelo corpo em movimento uniformemente variado, conhecida como equação de Torricelli, que foi um dos alunos de Galileu. Ela é obtida a partir das expressões (1.6) e (1.8), a saber

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta s, \quad (1.9)$$

onde Δs é a distância percorrida pelo móvel, $s - s_0$.

Como aplicação da equação de Torricelli, imaginamos a seguinte situação-problema:

Situação - problema: Um automóvel segue em uma pista reta a uma velocidade constante de 72 km/h, quando o motorista percebe, 26 m à sua frente, um cachorro distraído tomando banho de sol no meio da pista. Apavorado, o condutor imediatamente aplica os freios, o que comunica ao veículo uma (des)aceleração constante de -8m/s^2 . Pergunta-se: o animal será atropelado ou não?

Primeira coisa a ser feita: converter a velocidade inicial para m/s, já que a aceleração está em m/s^2 ; então $v_0 = 72\text{km/h} = 20\text{m/s}$. Também temos que

$$v = 0\text{m/s} \text{ (velocidade final)} \text{ e } a = -8\text{m/s}^2.$$

Logo, usando a (1.9) para encontrarmos o espaço que será percorrido pelo veículo até parar, vem:

$$0^2 = 20^2 + 2.(-8).\Delta s \Rightarrow 400 = -16.\Delta s \Rightarrow \Delta s = 25\text{m}$$

de modo que, dessa vez, o cachorro escapa.

Obtenha a expressão (1.9) a partir de (1.6) e (1.8). Sugestão: procure eliminar o tempo t , que não figura em (1.9).

Galileu também investigou o lançamento oblíquo de corpos, concluindo que, em um mesmo corpo, tipos distintos de movimento podem acontecer simultaneamente em direções diferentes. Isto resolveu a questão colocada por Aristóteles para justificar a hipótese geoestática, a saber, se fosse a Terra que estivesse em movimento de rotação diária, um objeto solto do alto de uma torre não cairia ao seu pé, e sim mais para oeste, já que a Terra giraria de oeste para leste, o que não é observado. Galileu contrapôs que a pedra abandonada do alto da torre participa, juntamente com esta, do movimento de rotação de nosso planeta, de modo que a pedra cai diretamente ao pé da torre.

Assim, por exemplo, mesmo que estejamos em movimento retilíneo uniforme horizontal, podemos arremessar um objeto pesado verticalmente para cima e observá-lo cair diretamente em nossas mãos, embora alguém em repouso relativamente ao solo veja o objeto traçar uma curva chamada **parábola**, resultante da combinação do movimento uniforme horizontal do objeto com o movimento uniformemente variado na direção vertical (vide hipertexto).

Situação-problema: Mostrar que a trajetória de queda seguida por uma pequena esfera que rola para fora do tampo de uma mesa horizontal é parabólica. Desprezar a resistência da atmosfera.

Para resolvemos este problema, vamos considerar a possibilidade de ter o movimento retilíneo uniforme horizontal, seguido pela esfera imediatamente após deixar a mesa, combinado com o retilíneo uniformemente variado vertical durante a queda.

Assim, o movimento horizontal será descrito por (1.4), em que s será substituído por x (abscissa), definida como a distância até a borda da mesa, que é o marco zero. Então $x = v_x t$, onde v_x é a componente horizontal da velocidade da bola, que não varia no tempo (é constante).

Já a altura y (ordenada) da bola em relação ao solo é dada a partir de (1.8), na forma $y = h - gt^2/2$, onde h é a altura da mesa (a distância vertical inicial até o solo). O sinal menos indica que a altura está diminuindo à medida que a esfera cai. Como os movimentos tiveram o mesmo início e são simultâneos, então t é o mesmo, de modo que podemos fazer $t=x/v_x$ e substituí-lo na última equação, ficando com

$$y = -gx^2/2v_x^2 + h$$

que é a equação de uma parábola com coeficientes constantes $-gx^2/2v_x^2$ e h (lembremos que a equação geral dessa curva, com eixo de simetria perpendicular ao eixo y , é $y = ax^2 + bx + c$). O sinal negativo do coeficiente de x^2 indica que a concavidade da parábola é para baixo. O termo linear em x não existe na nossa equação acima, dado o lançamento ser horizontal.

Princípio da Relatividade Galileu

A forma do movimento dos corpos é totalmente dependente do ponto de vista dos observadores. Quando estes se deslocam retilíneamente e com velocidade constante uns em relação aos outros, entretanto, as leis físicas que governam tais movimentos são independentes desses observadores, isto é, estes devem concordar que as leis da mecânica são exatamente as mesmas.

A parábola é dita ser uma **curva cônica**, pois é gerada a partir da intersecção de um plano com a superfície de um cone. A elipse, o círculo e a hipérbole também são curvas cônicas. Constatamos, assim, o primeiro indício da semelhança entre os movimentos terrestres (balas de artilharia) e celestes (planetas), isto é, ambos seguem trajetórias cônicas (parábolas e elipses, respectivamente). Galileu já havia apontado, em suas observações astronômicas, contra Aristóteles mais uma vez, para o fato de que o que ocorre nos céus não é diferente do que se passa na Terra.

Coube a Isaac Newton levar essa constatação às últimas consequências, ao formular as Leis da Mecânica, objetos de estudo da próxima unidade.



Leituras, filmes e sites

Cosmos, de Carl Sagan, série de treze episódios produzidos para a TV norte-americana no fim da década de setenta do século passado. Aborda toda a evolução da visão ocidental e científica do mundo, desde a Grécia Clássica até nossos dias.

2

Parte

Das Leis da Mecânica à Estática dos Fluidos

Objetivos:

- Compreender as Três Leis do Movimento, formuladas por Isaac Newton, bem como seus desdobramentos e aplicações para sistemas materiais formados por poucas e muitas partículas.

Capítulo

A Mecânica Newtoniana

Introdução

Começaremos por estudar o maravilhoso sistema de mundo desenvolvido por Isaac Newton, basicamente estudando alguns conceitos fundamentais como massa, quantidade de movimento e força para, em seguida, anunciar suas famosas três leis do movimento. Avançaremos então no estudo da Gravitação Universal, a primeira interação fundamental da natureza a ser descrita adequadamente e consistentemente, por meio da qual qualquer corpo atrai outro corpo (e é por este atraído) através de uma força diretamente proporcional ao produto das suas massas e inversamente ao quadrado da distância entre esses corpos. Explica perfeitamente bem as leis de Kepler do movimento planetário.

Depois estudaremos dois conceitos fundamentais da Física, desenvolvidos a partir da mecânica newtoniana: Trabalho e Energia, e discutiremos o Princípio da Conservação da Energia Mecânica a eles associados.

Dirigiremos, a seguir, nossa atenção para a Física dos Corpos Rígidos, que é o estudo de sistemas físicos formados por inúmeras partículas ligadas fortemente entre si, relativamente simples de estudar porque a distância entre quaisquer pares de partículas que o formam é constante. Seu movimento é igualmente simples, essencialmente composto de translação e rotação.

Finalmente, vamos nos deter na Física dos Fluidos, que é o estudo de líquidos e gases. São sistemas de partículas que se ligam fracamente. Por ser de enorme complexidade, demandam grandes simplificações na sua descrição.

1.1 Isaac Newton

Kepler e Galileu pavimentaram o caminho para a chegada de Newton. Enquanto o primeiro postulou que deveria haver uma causa física para o movimento dos planetas, identificando-a com uma “virtude” ou força que emanava do Sol, o segundo mostrou que é possível os corpos estarem ou permanecerem em movimento sem que haja necessariamente uma força atuando sobre eles.



**Isaac Newton
(1642-1727)**

O gênio de Isaac Newton, nascido no ano da morte de Galileu (1642), unificou e generalizou essas descobertas, propondo um poderoso conjunto de leis matemáticas que reinou incólume por mais de duzentos anos. Embora venham a ser substituídas mais tarde por outras leis ainda mais gerais e precisas, como as descritas pelas Teorias da Relatividade e a Mecânica Quântica, as formulações de Newton tornaram-se o paradigma de todas as teorias destinadas a descrever e explicar os fenômenos naturais, incluindo estas últimas.

O vasto sistema de mundo newtoniano consiste em partículas movimentando-se no espaço vazio, que Newton chamava de “o sensório de Deus”. Esse sistema é muito parecido com aquele que os filósofos pré-socráticos Leucipo e Demócrito haviam imaginado na Grécia antiga. A propósito de o mundo material ser formado por essas partículas, leiamos as palavras do próprio Isaac Newton, extraídas de seu livro Óptica, escrito em 1704, Questão 31:

“Parece-me provável que Deus, no princípio, tenha formado a matéria em partículas sólidas, pesadas, duras, impenetráveis e móveis.”

Tais partículas estariam sujeitas à atração ou repulsão mútua, isto é, seriam impelidas umas para as outras ou então se repeliriam, afastando-se umas das outras. Essas ações que as partículas exercem entre si desviam-nas de sua tendência natural de moverem-se em linha reta e com velocidade constante. Assim, uma partícula, quando suficientemente afastada das outras, de tal modo que podemos considerá-la isolada, não deve sentir nenhum efeito provocado pela ação das demais partículas, e tende a seguir o movimento retilíneo uniforme, devido à homogeneidade do espaço, isto é, ao fato de o espaço ser o “mesmo” em toda a parte, de ter as mesmas propriedades físicas e geométricas em todos os pontos.

Antes de formular suas famosas três Leis da Mecânica, Newton procurou definir adequadamente alguns conceitos que entram no estudo do movimento e suas causas. O primeiro deles foi o de **massa** de um corpo, o qual, devido ao fato da matéria ser formada de partículas e, portanto, haver espaços vazios entre elas quando se agregam para formar corpos maiores, foi definida como

“**massa** é a quantidade de matéria (m) que surge da densidade (ρ) e volume (V) de um corpo, tomadas em conjunto”.

A densidade de um corpo é a medida da “concentração” de matéria que existe nesse corpo. Expressando matematicamente,

$$m = \rho V \quad (2.1)$$

Se expandirmos uma caixa vedada que contém gás triplicando suas medidas lineares, sem alterar a massa, a sua densidade aumentará ou diminuirá? Por qual fator?

Newton concebeu a massa como sendo uma das propriedades fundamentais da matéria. Está associada com as partículas que formam esta última, e, devido à suposta indestrutibilidade desses corpúsculos, **a massa é uma grandeza que se conserva**. Portanto, para um sistema isolado do resto do Universo, sua massa não deve se alterar com a passagem do tempo.

As unidades de medida normalmente empregadas na definição de massa é o grama (g) e o quilograma (kg), onde $1\text{kg} = 1000\text{g}$. Também usa-se a tonelada (t), que equivale a 1.000kg . Há inúmeras outras unidades usadas mundo afora, como a onça, a libra etc. de pouca relevância prática para a Física.

Com o desenvolvimento progressivo das balanças de precisão, essa lei de conservação da massa foi testada e explicitada pela primeira vez em 1760 no âmbito da Química, e ficou conhecida como Lei de Lavoisier, segundo a qual, em uma reação química, a massa dos reagentes é igual à dos produtos, ou seja, as partículas (átomos) formadoras das substâncias não são criadas nem destruídas, apenas se rearranjam.

Outro conceito importante desenvolvido por Newton foi o de **quantidade de movimento** (ou momento linear ou ainda momentum). Uma vez que o movimento de uma partícula deve caracterizar seu estado, tanto quanto sua posição, diferentemente do que pensou o filósofo Zenão dezenas de séculos antes, então a velocidade da partícula, característica mais simples de seu movimento, deve ser conjugada a uma propriedade geral e intrínseca às partículas – a massa. Então, segundo Newton

"A quantidade de movimento (p) de um corpo é dada pelas suas velocidade (v) e quantidade de matéria (m), tomadas em conjunto".

Em termos matemáticos, temos que

$$p = mv \quad (2.2)$$

p e **v** estão em negrito para assinalar que estamos lidando com grandezas **vetoriais**, ou seja, grandezas em que a **direção** (a linha reta seguida pela partícula) e o **sentido** (se está indo ou vindo) do movimento estão sendo levados em conta na sua definição. A grandeza m (massa) é dita **escalar**, ou seja, não depende de direção e sentido.

Situação-problema: A que velocidade deve se deslocar um automóvel de duas toneladas para que tenha a mesma quantidade de movimento de um caminhão de 10 toneladas trafegando a 40 km/h?

Após o surgimento da Teoria da Relatividade Especial, formulada por Albert Einstein em 1905, ficamos sabendo que a massa não é uma grandeza rigorosamente conservada e isso fica evidente a partir de processos ou reações nucleares, isto é, aquelas que envolvem os núcleos dos átomos, em que uma grande quantidade de energia é liberada, para o bem ou para o mal. Veremos, mais adiante, que o que se conserva, efetivamente, é a energia de um sistema isolado. E a massa é, tão somente, uma de suas diversas formas.

Para operarmos com esse problema, podemos considerar apenas o **módulo** do vetor quantidade de movimento, isto é, a intensidade ou o tamanho da grandeza, expresso por um número. Então, se a massa do caminhão (10 t) é cinco vezes maior que a do automóvel (2 t), este deve deslocar-se a uma velocidade cinco vezes maior que a do caminhão para que a quantidade de movimento dos dois veículos, formada pelo produto dessas duas grandezas, sejam equivalentes:

$$v_A = 5 \times 40 \text{ km/h} = 200 \text{ km/h}$$

O fato de termos dois corpos deslocando-se com a mesma quantidade de movimento significa que os efeitos físicos que provocam em outros corpos serão, em princípio, os mesmos, desde que os tempos envolvidos sejam iguais. Assim, os estragos gerados pela colisão de cada um dos veículos, na situação-problema acima colocada, com muros da mesma constituição e estrutura, por exemplo, deverão ser iguais, supondo que os tempos de colisão sejam os mesmos. Portanto, fundamentalmente, é a variação da quantidade de movimento que deve entrar na descrição matemática de como as forças atuam nos corpos, através da Segunda Lei.



Fig. 2.1 - Colisão entre duas galáxias

Vamos agora conhecer outra importante definição estabelecida por Newton:

"Força é uma ação exercida sobre um corpo para modificar seu estado de movimento, isto é, o estado de repouso ou o de movimento retílineo uniforme".

Vemos, mais uma vez, que há uma mudança radical ocorrida em relação à Física de Aristóteles. Como estudamos na unidade anterior, de acordo com aquele pensador grego, o movimento de um corpo só continuaria ocorrendo se a ação (força) permanecesse atuando sobre ele. Com Isaac Newton, e também com Galileu antes dele, só existe uma força atuando em um corpo se o seu estado original de movimento se altera. Assim, podemos ter movimento sem que haja qualquer força (movimento retilíneo uniforme). A modificação no estado de movimento de um corpo através da ação de uma força implica, portanto, uma **aceleração**. Esta relação ficará bem definida quando enunciarmos as três Leis do Movimento.

1.2 As Três Leis do Movimento

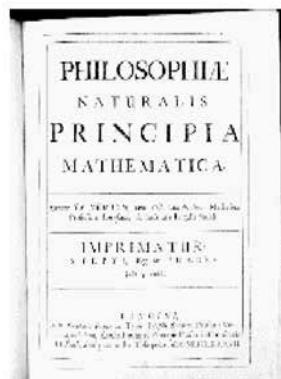
Com base nas definições expostas na seção anterior, Newton pôde enunciar as três Leis do Movimento, que, juntamente com aquelas, estão expressas na sua magnífica e complexa obra Princípios Matemáticos de Filosofia Natural, ou, simplesmente Principia, em latim, publicada pela primeira vez em 1687. Nela, ao enunciar a Primeira Lei do Movimento, conhecida como Princípio da Inércia, Newton estabelece que

“Todo corpo continua em seu estado de repouso, ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja compelido a mudar esse estado por forças aplicadas sobre ele.”

Ou, dito de outro modo, os corpos tendem a manter a sua quantidade de movimento enquanto não são perturbados por outros corpos. Assim, as esferas de metal usadas por Galileu em suas experiências, deslocando-se em uma superfície horizontal perfeitamente polida e na ausência da atmosfera (i.e., no vácuo), continuarão a fazê-lo em linha reta e com velocidade constante (movimento retilíneo uniforme), até que um segundo corpo (outra esfera, por exemplo) aja sobre o primeiro, como em uma colisão, mudando a direção, o sentido e/ou o módulo de sua velocidade.

Essa resistência ou “preguiça” (inertia, em latim) que os corpos têm de alterar o seu estado de movimento, a menos que seja pela “força”, é uma característica geral de toda a matéria, exatamente como a massa, de modo que nos sentimos tentados a unir esses dois conceitos e falar de uma **massa inercial**.

É importante assinalar que, se um corpo desloca-se sobre a superfície horizontal perfeitamente polida de uma plataforma móvel, e esta por sua vez se movimenta também em linha reta e com velocidade constante sobre o solo (igualmente horizontal e perfeitamente polido), aquele corpo continuará executando um movimento retilíneo uniforme (pode ser em outra direção que a



Frontispício dos Principia

Asnos e Inércia

A inércia dos corpos pode ser ilustrada com a parábola do asno, formulada por Jean Buridan, filósofo do século XIV. Se um asno sente a mesma intensidade de fome e de sede e é colocado exatamente à meia distância entre um feixe de feno e uma tina com água, provavelmente morrerá de sede e de fome, pois não se decidiria para qual dos dois mover-se primeiro. Assim se passa com os corpos na natureza: uma partícula em repouso no espaço distante não tem porque mover-se espontaneamente em uma determinada direção, sem que uma força lhe seja aplicada, pois todas as direções do espaço são equivalentes. Por que “escolheria” uma em detrimento das demais? Então ela “decide” permanecer em repouso.



Fig. 2.2 Quo Vadis, asnae?

da plataforma em relação ao solo) até sofrer a ação de outro corpo, tanto em relação a um observador sobre a plataforma em movimento, como para um segundo situado no solo.

Assim, o Princípio da Inércia assegura-nos que há uma classe de **referenciais** (observadores) em relação aos quais os corpos, quando não interagem com outros (isto é, quando não há nenhuma força atuando sobre eles), executam o mais simples dos movimentos, que é o retílineo uniforme, ou permanecem em repouso. Esses referenciais que se deslocam em linha reta com velocidade constante uns em relação aos outros, como a plataforma em relação ao solo, são chamados de **referenciais inerciais**.

O fato de termos corpos deslocando-se relativamente a outros corpos em movimento remete-nos às regras de **composição das velocidades**, estudadas pela primeira vez por Galileu. Tais regras existem em razão dos movimentos serem dependentes dos referenciais ou observadores. Assim, por exemplo, se andamos dentro de um trem que corre sobre os trilhos a uma velocidade de

$v_t = 50 \text{ km/h}$ e caminhamos em seu interior a uma velocidade de $v_p = 10 \text{ km/h}$ relativamente a um passageiro sentado, então nossa velocidade v_e será, para alguém que está em repouso na estação:

$$v_e = v_t + v_p = 50 \text{ km/h} + 10 \text{ km/h} = 60 \text{ km/h}, \text{ se o passageiro e o trem vão no mesmo sentido;}$$

$$v_e = v_t - v_p = 50 \text{ km/h} - 10 \text{ km/h} = 40 \text{ km/h}, \text{ se vão em sentidos contrários.}$$

Em outras palavras, intervalos de tempo e de espaço na Mecânica de Galileu e Newton (também chamada de **Clássica**) são grandezas **absolutas**, no sentido de que têm a mesma medida para todos os observadores, independentemente de como estes se movimentam. Assim, os deslocamentos espaciais do passageiro e do trem, por unidade de tempo e relativamente ao observador na estação, são somados ou subtraídos, de acordo com o sentido do movimento, porque tais deslocamentos ocorrem de forma independente um do outro. Esta é a razão pela qual também vemos os automóveis, em uma rodovia, passarem por nós a grandes velocidades quando vêm no sentido contrário ao nosso, ou devagar, quando vão no mesmo sentido. Ou seja, na mecânica de Galileu/Newton, embora espaço e tempo sejam entidades absolutas, a relação direta existente entre suas medidas – a velocidade – depende do movimento do observador e/ou referencial, ou seja, a velocidade é uma grandeza **relativa**.

O fato de a velocidade depender do referencial em que é medida implica não se tratar de uma grandeza que desempenhe um papel fundamental nas leis da dinâmica, pois estas devem ter uma forma que seja **independente do observador**. Veremos, a seguir, que a grandeza cinemática que é constitutiva daquelas leis é a aceleração.

A **Segunda Lei do Movimento** afirma que

"A mudança na quantidade de movimento é proporcional à força motriz aplicada, e ocorre na direção da linha reta em que essa força é aplicada."

Esta lei conecta a causa da mudança de movimento – a força, que pode ser de qualquer origem ou natureza – com a própria rapidez na mudança de movimento, que é a aceleração. Quando as primeiras atuam sobre as partículas formadoras da matéria, no sentido que Newton atribuiu a estas na questão 31 de seu livro Óptica, então a segunda lei pode ser matematicamente expressa como

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}, \quad (2.3)$$

pois, nessas partículas, a quantidade de movimento só se altera devido à mudança de velocidade, uma vez que são estruturas indestrutíveis e não há perdas ou ganhos de massa. Em geral, a Segunda Lei, na forma dada por (2.3), vale para corpos em que, durante a aplicação da força, não ocorre mudança na massa.

Mais uma vez estamos lidando com grandezas vetoriais, pois a mudança no movimento (aceleração) ocorre em uma direção, e é causada por uma força aplicada nessa direção. A constante de proporcionalidade m é a própria massa inercial, pois, se para uma mesma força aplicada sobre dois corpos distintos A e B, a aceleração produzida em A é menor que a produzida em B, então a massa de A é maior que a de B, uma vez que o corpo resiste mais a mudar o seu estado de movimento, isto é, possui uma inércia maior, e vice-versa.

No sistema de unidades em que a unidade de comprimento é o metro (m), a de tempo é o segundo (s) e a de massa é o quilograma (kg), conhecido também como Sistema Internacional (SI), então a força tem unidade de Newton (N). Assim, 1 N é a força necessária para produzir uma aceleração de 1m/s^2 em um corpo de 1kg de massa.

Se a mudança de movimento dos corpos na superfície terrestre é provocada pela gravidade, isto é, queda livre, mudança que se dá à mesma taxa ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$) para todos os corpos, independente de suas massas, formas ou constituições internas, então a força atuante sobre esses corpos é chamada de **peso (P)**, e seu módulo é dado por $P = mg$. Se um determinado corpo é transportado à superfície de outro planeta ou satélite natural em que a gravidade é diferente da terrestre, o seu peso muda, mas não a sua massa.

O paradigma newtoniano

"Conhecendo-se as forças e as massas envolvidas, conhecem-se os movimentos dos corpos, e vice-versa".

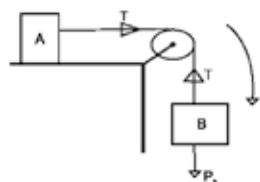


Fig. 2.3 Sistema de pesos e roldanas

Uma força de 30 N comprime a mola A em 10 cm e outra força de 40 N comprime a mola B em 20 cm. Qual mola é a mais “dura”? Explique.

Forças causam mudança de movimento, como já sabemos, mas podem provocar também deformação nos corpos, e esta particularidade permite-nos construir instrumentos, chamados **dinamômetros**, destinados a medir as forças. Este aparelho consiste basicamente em uma mola presa a um suporte, e está equipado com uma régua graduada.

Robert Hooke, contemporâneo e rival de Newton, descobriu a lei de deformação que leva o seu nome, segundo a qual a força que deforma uma mola é proporcional ao tamanho (comprimento) da deformação, isto é, $F = -kx$, onde x é o deslocamento (vetor) que caracteriza a deformação sofrida. O sinal menos ($-$) nos diz que a força é sempre contrária ao sentido da deformação, isto é, se a mola é esticada (sentido positivo) ou se é comprimida (sentido negativo) e k é uma constante de proporcionalidade que depende da mola empregada, chamada por isso de **constante da mola**, e que no SI tem unidades de newton/metro (N/m).

Esse tipo de força é uma das mais simples que existem, do ponto de vista matemático, pois consiste numa mera relação de proporcionalidade com a posição da partícula. Em geral, as forças existentes na natureza são mais complexas, sendo funções da posição, da velocidade e do tempo. Mas, ao mesmo tempo em que essa modalidade de força é bastante simples, também se revela como uma das mais fundamentais e universais, pois é responsável por uma forma de movimento que está presente em muitos fenômenos da natureza, do microcosmo ao macrocosmo: o **Oscilador Harmônico**. O nome advém do fato de que uma partícula sujeita a uma força proporcional ao deslocamento oscilará em torno de uma posição de equilíbrio, desde átomos em cristais até os pêndulos de relógios de parede da casa de nossos avós.

A Terceira Lei do Movimento é expressa como

“Para cada ação existe sempre uma reação igual e contrária, ou seja, as ações recíprocas de dois corpos, um sobre o outro, são sempre iguais e dirigidas para partes contrárias.”

Essa lei nos diz que forças atuantes em um corpo só podem ser produzidas por outros corpos, de tal forma que, se um corpo A age sobre outro B com uma força F (ação), o corpo B também age sobre A com uma força $-F$ (reação), isto é, com uma força de mesma intensidade e na mesma direção, mas em sentido contrário ao da primeira, daí o sinal negativo. Se tais corpos forem duas partículas, a direção na qual se dá a força de ação e reação (isto é, a interação) é fixada pelo segmento de reta que as une.

Portanto, o planeta Terra atrai-nos em direção ao seu centro (ação) enquanto nós também a atraímos em nossa direção (reação). Mas como a massa da Terra é imensa (cerca de $6,0 \times 10^{24}$ kg, ou seja, $6.000.000.000.000.000.000.000$ quilogramas), então ela “cai” em direção a nós com uma aceleração imperceptível.

As forças gravitacionais de ação e reação entre duas massas (como a Terra e a Lua) são do tipo “à distância” enquanto que as de ação e reação entre duas pessoas que se empurram em uma luta corporal são “de contato”.

Vejamos outro exemplo de ação e reação de forças de contato: um livro situado sobre a mesa na sala de estar empurra-a para baixo com seu peso e a mesa, por outro lado, empurra o livro para cima. Esta força de reação que a mesa exerce sobre o livro é chamada de **normal**. Ela equilibra exatamente a força peso, que a Terra exerce sobre o livro devido à gravidade, e por isso o livro mantém-se em repouso sobre a superfície da mesa, ou seja, a força resultante é nula.

Observemos que esses pares de forças (ação e reação) ocorrem sempre em corpos que são distintos um do outro (como no sistema Terra/Lua, mesa/livro). É importante notar que as chamadas **forças internas** em um mesmo corpo, isto é, aquelas que são exercidas entre as diversas partes (ou partículas) que o compõem, cancelam-se mutuamente, aos pares, independente da natureza dessas forças. Se assim não fosse, isto é, se houvesse uma resultante de tais forças, um corpo em repouso poderia repentinamente movimentar-se sem nenhuma ação externa, o que nunca é observado.

Situação-problema: achar a aceleração a experimentada pelos dois blocos da fig. 2.3, unidos por um fio inextensível e sem massa, supondo que as massas dos blocos sejam $m_A = 5\text{kg}$, $m_B = 3\text{kg}$ e que não haja outras forças além das representadas no desenho. Calcule também a tensão T no fio. Considerar que a aceleração da gravidade é $g = 10\text{m/s}^2$.

A força resultante atuando no sistema formado pelos dois blocos é tão somente a força peso P_B , de magnitude $m_A g = 5\text{kg} \cdot 10\text{m/s}^2 = 50\text{N}$, agindo sobre o bloco B. A tensão no fio T, que atua tanto em A e como em B, são forças internas e não interferem no movimento do conjunto. A força peso sobre o bloco A, P_A , está equilibrada pela força de reação da mesa sobre este bloco (a chamada força normal), e então não entra na dinâmica do sistema. Assim, pela segunda lei do movimento, temos que

$$F_{\text{sistema}} = P_B = 50\text{N} = (m_A + m_B) \cdot a = (8\text{kg}) \cdot a.$$

Nosso objetivo é calcular, inicialmente a aceleração a do sistema, formado pelos dois blocos. Então

Calcule a aceleração com a qual a Terra “cai” em direção a você.

$$a = \frac{50N}{8kg} = 6,25m/s^2$$

menor que a aceleração da gravidade, portanto. A tensão T existente no fio é calculada a partir da resultante das forças agindo sobre o bloco A ou também sobre o bloco B. Considerando que a aceleração de cada bloco isoladamente é a mesma da do conjunto, pois os blocos estão solidariamente ligados por um fio que não estica, então sobre o bloco B a força resultante será

$$F_B = P_B - T = m_B a = 3kg \cdot 6,25m/s^2 = 18,75N,$$

logo, a tensão T será $T = P_B - 18,75N = 50N - 18,75N = 31,25N$. Calculando-se essa mesma tensão a partir da força resultante sobre o bloco A, temos

$$F_A = T = m_A a = 5kg \cdot 6,25m/s^2 = 31,25N.$$

E por falar em tensão, vamos supor que amarramos um fio a uma pedra e, segurando pela extremidade livre do fio, começamos a girá-la em alta velocidade, fazendo-a descrever um círculo, como na funda de Davi que matou o gigante Golias. Desse modo, estaremos exercendo uma força que se transmite através do fio, impedindo que a pedra saia pela tangente e vá atingir a cabeça de algum infeliz. Essa força que, no final das contas, é a tensão no fio, é sempre dirigida ao centro do círculo, onde está a mão que impulsiona a pedra por meio do fio. Por essa razão, tal força é denominada de **centrípeta**.

Se o movimento da pedra é circular uniforme, isto é, se o número de voltas que a pedra descreve por unidade de tempo é constante, o módulo da sua velocidade tangencial v é também constante. Mas como sua direção está mudando continuamente, significa que existe uma aceleração, que multiplicada pela massa da pedra fornece numericamente a força centrípeta. Nosso objetivo agora é calcular o módulo dessa aceleração.

Observando a fig. 2.4 abaixo, notamos que o vetor velocidade também gira, descrevendo um círculo de raio igual a v . Quando a pedra completa meia volta, o vetor velocidade muda ao longo de meia circunferência. Isto é, o percurso da pedra é de πR e o “percurso” da sua velocidade é de πv . Este último representa o quanto variou a velocidade, em um intervalo de tempo dado por $\pi R/v$, pois estamos supondo um movimento circular uniforme. Logo, a aceleração centrípeta a_{cp} será dada por

$$a_{cp} = \frac{\pi v}{\pi R/v} = \frac{v^2}{R} \quad (2.4)$$

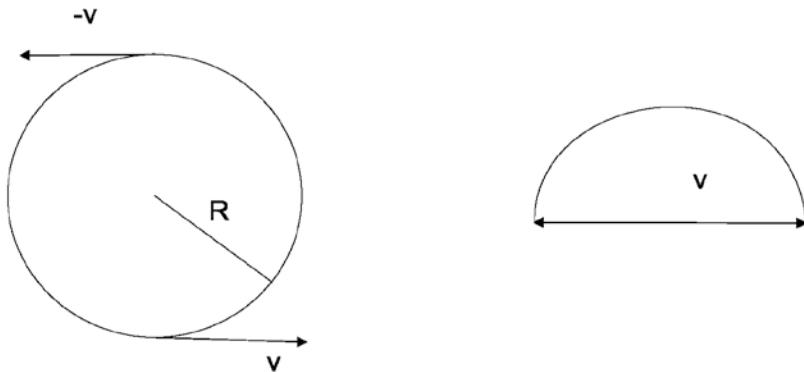


Fig. 2.4 - Esquema representando a funda de Davi

O Barão de Münchhausen foi um oficial militar alemão que viveu no século XVIII. Era um excêntrico e, em sua velhice, reunia-se com os amigos em volta da lareira acesa de sua casa, à noite, para contar as histórias de suas façanhas juvenis, deliciosamente inverossímeis. Em uma delas relata que, durante uma longa viagem a cavalo, os dois, homem e animal, caíram nas águas lamacentas de um pântano. Quando percebeu que ambos afundavam e que teriam morte certa se nada fosse feito, apertou os flancos do cavalo com suas botas e ergueu-se no ar puxando seus próprios cabelos, conseguindo salvar-se a si e à sua montaria, após o que prosseguiu tranquilamente a sua jornada. Com base no que você já aprendeu sobre as Leis de Newton, explique para os seus colegas porque isso não é possível.



Fig. 2.5 - Sr. Barão, algo não está certo...

Isaac Newton pareceu incomodar-se em não poder explicar a causa da gravitação universal, ou seja, o porque de os corpos se atraírem por meio de uma força diretamente proporcional ao produto das suas massas e inversamente ao quadrado da distância entre eles. Por fim, desistiu e afirmou “*hipotesis non fingo*” (não faço hipóteses). De qualquer forma, forneceu a primeira descrição moderna de uma interação fundamental da natureza. Apenas Einstein, mais de dois séculos depois, deu uma explicação satisfatória para o fenômeno da gravidade, mostrando que ela é o efeito de uma distorção na geometria espaço-temporal, provocada pela distribuição de matéria e energia.

1.3 A Lei da Gravitação Universal

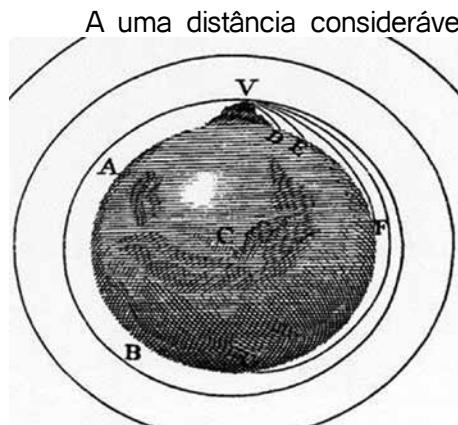
Falar sobre atração entre os corpos é discutir outra grande descoberta que Newton fez no estudo da Física (ou Filosofia Natural, como ele chamava): A Lei da Gravitação Universal.

Reza a lenda que, em certo dia ensolarado, dos raros que existem na Inglaterra, ele meditava tranquilamente sob uma macieira do pomar de sua casa, quando foi atingido na cabeça por uma maçã. E isso acentuou ainda

mais suas meditações, que viraram estudos sérios, até que, após um longo tempo (talvez anos), chegou à conclusão de que a força que fazia com que a maçã caísse era a mesma que mantinha a Lua em órbita em torno da Terra. Ora, por que então a Lua não desaba sobre a Terra, como a maçã? De fato ela o faz o tempo todo, mas como a Lua possui também um movimento tangencial (isto é, perpendicular ao raio da órbita), não cai diretamente sobre nós, é “desviada” continuamente - sorte a nossa.

Essa foi a primeira idéia de “unificação” da história da Física: as leis que regem os fenômenos celestes são as mesmas que regem os terrestres, refutando-se definitivamente Aristóteles.

Se subirmos ao topo de uma montanha bem alta e atirarmos horizontalmente um objeto com certa velocidade, ele cairá a uma determinada distância do pé da montanha. Se aumentarmos essa velocidade de lançamento, cairá a uma distância ainda maior, até que, ao ser arremessado com suficiente velocidade, o objeto não cairá mais (recordemos que a Terra é aproximadamente esférica), de modo que ele deverá ficar girando em torno do nosso planeta, “procurando” o solo sem nunca encontrá-lo. A bem da verdade, devido à resistência oferecida pela atmosfera, ele não orbitará indefinidamente a Terra (ver Fig.14). O objeto perderá altitude aos poucos até atingir o solo, após executar algumas voltas em torno do planeta.



da superfície terrestre ainda existem moléculas de ar, que, embora bastante rarefeito, ocorre em quantidade suficiente para provocar efeitos indesejáveis. De vez em quando (ainda bem que raramente) os jornais e revistas, impressos ou televisionados, informam-nos a respeito da queda de satélites artificiais em, felizmente, regiões remotas e despovoadas de nosso planeta.

Fig. 2.6 - O satélite de Newton: cair e orbitar é a mesma coisa

Newton mostrou que o movimento de queda livre dos objetos na superfície da Terra, bem como o dos diversos astros orbitando uns em torno dos outros, é compatível unicamente com (e produzido por) uma força de caráter universal, isto é, que afeta todos os corpos, qualquer que seja o seu tamanho e sua natureza, e que age à distância (sem que haja contato físico entre os corpos), proporcional às massas dos corpos envolvidos e cuja intensidade decresce com o quadrado da distância entre os mesmos. Para duas partículas interagindo gravitacionalmente, temos, em linguagem matemática,

$$\mathbf{F} = -G m_1 m_2 \mathbf{u}_r / r^2 \quad (2.5)$$

onde m_1 e m_2 são as massas das duas partículas, G é uma constante de proporcionalidade, que no Sistema Internacional tem o valor aproximado de $6,67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$. Em Física, é comum as constantes que entram nas expressões matemáticas possuírem unidades de medida. No caso de G , suas unidades garantem que tenhamos unidade de força, N, ao operarmos com (2.5). Vejamos:

$$(N \cdot m^2/kg^2) \cdot kg^2/m^2 = N \quad (2.6)$$

Ainda em (2.5), \mathbf{u}_r é um vetor unitário (isto é, que possui módulo igual a 1) o qual aponta na direção da reta que une as duas massas (consideradas puntiformes), no sentido da primeira para a segunda massa. O sinal negativo indica que a força é de atração – ou seja, a força gravitacional gerada pela massa m_1 impele a massa m_2 na sua direção, e, de acordo com a Terceira Lei, existe uma força de reação que, gerada por m_2 , impele m_1 na sua direção. Esse “vice-versa” está contido no produto das duas massas que entra em (2.5).

Calcule o valor da constante gravitacional no Sistema C.G.S (Centímetro, Grama, Segundo).

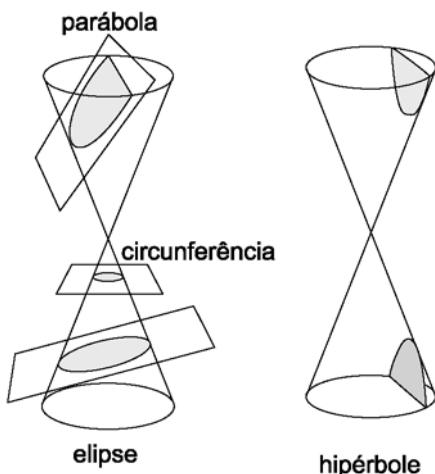
Newton pôde mostrar matematicamente que a órbita descrita por um astro, ao interagir gravitacionalmente com outro, forma no espaço uma curva denominada **cônica**. Essas curvas são assim chamadas devido ao fato de serem geradas a partir de cortes de cones feitos por planos, isto é, são formadas pela intersecção desses planos com a superfície dos cones. Tais curvas são conhecidas desde a Grécia Antiga (sempre os gregos!), tendo sido estudadas detalhadamente pelo famoso matemático Apolônio de Perga.

Recordemos que Galileu havia demonstrado que, na superfície de nosso planeta, os corpos descrevem parábolas quando são arremessados obliquamente em relação ao solo, devido à combinação de dois movimentos independentes:

- a) Retilíneo uniforme, na direção horizontal;
- b) Uniformemente variado, na direção vertical.

Tais corpos não poderiam seguir uma trajetória diferente, visto que o movimento na superfície terrestre é um caso particular daquele descrito pela lei da gravitação universal.

Existem astros, chamados **cometas**, que aparecem no céu de tempos em tempos, como o cometa Halley. Embora a aparição desse corpo celeste tenha sido registrada já na antiguidade, o astrônomo britânico Edmund Halley foi o primeiro a calcular a forma e o período de sua órbita, usando a lei da gravitação universal de Isaac Newton. Tal astro completa uma revolução em



torno do Sol a cada 76 anos, e, após aproximar-se bastante de nossa estrela, parte para regiões remotas, situadas além da órbita de Plutão. Possui, assim, uma órbita elíptica de grande excentricidade. Outros cometas aparecem no céu apenas uma vez, nunca mais retornando (descrevendo órbitas parabólicas ou hiperbólicas). Já a Lua executa uma órbita em torno da Terra praticamente circular. Os planetas, em geral, percorrem órbitas elípticas de baixa excentricidade, sendo Marte, de todos os planetas, o que descreve a elipse de maior excentricidade.

Situação-problema: Existem satélites artificiais que orbitam a Terra com o mesmo período da rotação diária que ela perfaz em torno de seu eixo, chamados de **geoestacionários**. Recebem esse nome por parecerem em repouso quando vistos da superfície de nosso planeta. Qual a distância que se encontram da Terra?

Se admitirmos que a órbita do satélite em questão é circular, então a força centrípeta será a própria força gravitacional, uma vez que é dirigida sempre para o centro de nosso planeta. Logo, designando por m e M as massas do satélite e da Terra, respectivamente, v a velocidade orbital do satélite e R a distância do satélite ao centro da Terra, teremos

$$F_{cp} = F_g \Rightarrow \frac{mv^2}{R} = G \frac{mM}{R^2} \Rightarrow R = \frac{GM}{v^2}$$

Percebemos que a massa do satélite não desempenha nenhum papel aqui, somente a massa da Terra, que é a fonte do campo gravitacional que afeta o movimento do satélite. A velocidade orbital deste será encontrada a partir da informação de que o período de rotação do satélite é o mesmo do de nosso planeta, que sabemos completar uma volta em aproximadamente 24h = 86.400s. Então a velocidade orbital do satélite será

$$v = \frac{2\pi R}{86400}$$

Substituindo na expressão anterior, após uma simples manipulação algébrica (faça-a!), e utilizando os valores numéricos conhecidos, encontramos

$$R = \sqrt[3]{\frac{GM(86400)^2}{4\pi^2}} \approx 42.000\text{km},$$

ou seja, pouco mais de 10% da distância da Terra à Lua.

O tipo de curva cônica que vai ser descrita por um astro sujeito à interação gravitacional devida a outro astro, isto é, se um círculo, elipse, parábola ou hipérbole vai depender da quantidade de **energia mecânica** que esse astro possui. Este importante conceito será explorado em nossa próxima seção.

1.4 Trabalho e Energia

A descrição do movimento de um sistema mecânico, como o de um conjunto de partículas interagindo gravitacionalmente, por exemplo, pode tornar-se muito complicada se tentarmos fazê-lo em termos das forças que essas partículas exercem entre si, as quais são grandezas de natureza vetorial. Assim, a equação (2.5) combinada com a segunda lei do movimento (2.3) implica que devemos descrever o movimento de cada partícula em cada uma das três direções independentes do espaço (como “norte-sul”, “leste-oeste” e “alto-baixo”), de acordo com as forças decompostas nessas direções. Teremos que trabalhar um conjunto de $3N$ equações, onde N é o número de partículas envolvidas.

Felizmente, há como definir uma grandeza física escalar (isto é, independente da direção espacial) que pode nos auxiliar imensamente no estudo do movimento das partículas, facilitando consideravelmente o nosso trabalho de calcular as variáveis dinâmicas a elas associadas em determinados problemas. Além disso, é uma grandeza que está vinculada a uma lei fundamental da Natureza, sobre a qual não se encontrou nenhum indício de violabilidade em qualquer processo físico que nela ocorre: referimo-nos ao conceito de **energia**.

Embora seja um conceito que esteja na ordem do dia, principalmente no que se refere às questões e debates travados em torno do meio-ambiente, questões do tipo “como gerar energia de forma eficiente e com um mínimo de agressão à natureza”, passando pelas discussões acerca do uso de energias renováveis ou não-renováveis, energia não é um conceito suficientemente compreendido pelas pessoas em geral, embora se tenha alguma intuição a respeito de seu significado. A própria expressão “geração de energia” revela-se bastante incorreta, pois energia não é gerada (criada), e nem destruída. Há uma poderosa lei de conservação, que já citamos mais acima, que expressa a impossibilidade disso.

A intuição maior que se tem de energia, além daquela que nos vem à mente quando recebemos a conta da luz em casa, relaciona-se com a de esforço físico. É óbvio que as lâmpadas de nossas residências ou locais de trabalho são acesas quando acionamos o interruptor (se a energia não estiver cortada...), mas também sabemos (ou deveríamos saber) que a eletricidade, responsável pela emissão da luz a partir dos filamentos de tungstênio encerrados nesses bulbos de vidro em que se fez vácuo, tem origem nas volumosas quedas d’água que movimentam as gigantescas turbinas de nossas hidrelétricas. Em outros países, a forma de produção predominante de eletricidade pode se dar por meio de usinas termelétricas e/ou nucleares.

Descrever de maneira exata sistemas de partículas que interagem mutuamente pode tornar-se uma tarefa difícil, ou mesmo impossível, qualquer que seja a abordagem utilizada. De fato, essa descrição exata só existe se estivermos lidando com, no máximo, duas partículas. Acima desse número, em geral, apenas cálculos aproximativos podem nos revelar o comportamento detalhado de tal sistema. Esse complicado problema de descrever sistemas físicos formados por três ou mais partículas sujeitas a ações mútuas é conhecido como o problema dos três corpos.

Pesquise e disserte sobre outras formas de produção de energia elétrica, além das citadas no texto.

Os noticiários de vez em quando externam a preocupação das autoridades governamentais quando o nível de água nos reservatórios dessas hidrelétricas está muito baixo, em épocas de estiagem. Isto se deve ao fato de que o volume das águas que caem é menor, fazendo-o também de uma menor altura, o que implica uma redução na produção de energia elétrica, de modo que a região abastecida pela usina corre o sério risco de enfrentar um colapso na distribuição dessa energia – o famoso “apagão”.



Fig. 2.8 - Bicicleta com lâmpada.

Assim, muitas formas de energia têm origem, direta ou indiretamente, na realização de esforço físico. Calor (e luz, mais uma vez), por exemplo, pode ser gerado pelo esforço de atritarmos duas superfícies abrasivas, o que já era conhecido pelos nossos distantes ancestrais na Pré-História. Na verdade, o que ocorre é a **transformação** de uma forma de energia (armazenada em nossos músculos, por exemplo) em outras (luz, calor e som).

A idéia de esforço físico, por sua vez, está estreitamente vinculada a outro conceito que, para muita gente, principalmente para aquelas pessoas que vivem em um regime de semi-escravidão, significa labuta, desgaste e mesmo sofrimento: **trabalho**. Coloquemos, entretanto, as coisas sob um ponto de vista não-humano, pois a natureza segue seu curso indiferente às nossas mazelas. No caso das quedas d'água acima descritas, por exemplo, podemos conceber trabalho a partir da percepção de que as hidrelétricas geram mais eletricidade quanto maior o volume da água e quanto maior a altura de sua queda até que atinja as pás das turbinas lá embaixo, movimentando-as e fornecendo a energia de que nossas cidades e campos tanto necessitam.

Uma relação mais direta e perceptível entre lâmpadas acesas e esforço físico surge, entretanto, daquelas que são instaladas em algumas bicicletas que vemos por aí, e que acendem ao serem pedaladas, devido à presença de um **dinamo**. E o brilho dessas lâmpadas é tanto mais intenso quanto mais velozmente se pedala. Também já vimos certos tipos de tênis ou sapatos infantis piscarem umas luzinhas à medida que com eles se caminha. Já foram desenvolvidas propostas de carregadores de telefones celulares embutidos em tênis – você caminha e ao mesmo tempo carrega a bateria do seu celular!

Em termos mais precisos, quanto maior o volume, e portanto, o peso dessas águas (força - F), bem como a altura de onde caem (deslocamento - d), maior a capacidade de geração das usinas hidrelétricas. Portanto, vamos definir trabalho (T), como sendo a combinação dessas duas grandezas físicas, a saber:

$$T = F.d. \quad (2.7)$$

No Sistema Internacional (S.I.), a unidade de medida do trabalho é o joule, nome que é devido ao cientista James Prescott Joule, que realizou, durante o século XIX, importantes pesquisas envolvendo energia e suas transformações.

Vimos que trabalho é o processo pelo qual uma forma de energia é transformada em outra. Então energia possui a mesma unidade de medida que trabalho, sendo expressa, portanto, no S.I., em joules.

Situação-problema: No sistema C.G.S (Centímetro Grama Segundo), a unidade de energia (e trabalho) é o erg. Quantos ergs valem um joule?

Ora, temos que $1 \text{ J} = 1 (\text{N.m}) = 1(\text{kg.m/s}^2).1\text{m} = (1000\text{g}.100\text{cm}/\text{s}^2).100\text{cm} = 10^7 (\text{g.cm/s}^2).\text{cm}$. Como, agora, todas as unidades de espaço, matéria e tempo estão expressas em cm, grama e segundo, respectivamente, temos, assim, que $1\text{J} = 10^7 \text{ erg}$, e, vice-versa, $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$.

Para sermos mais rigorosos em nossa definição de trabalho, como a força é uma grandeza vetorial, tanto quanto o deslocamento, suas direções e sentidos nem sempre são os mesmos, de modo que a equação (2.7) só é correta se ambas tiverem a mesma direção e sentido. No caso geral, em que o vetor força faz um ângulo θ com o vetor deslocamento, o trabalho será o produto da projeção da força na direção do deslocamento por este último, isto é

$$T = F.d.\cos \theta \quad (2.8)$$

Uma vez que a função cosseno ocorre em um intervalo que vai de -1 a 1, percebemos que o trabalho T pode assumir valores negativos, desde que o ângulo formado entre o vetor força e o vetor deslocamento seja maior que 90° . Nesse caso, dizemos que o trabalho é **resistente** ($T < 0$). Na situação contrária ($T > 0$), dizemos que o trabalho é **motor**.

Como exemplo de trabalho resistente, temos o que é causado por **forças de atrito**. A força de atrito que ocorre entre corpos sólidos é oriunda do contato que existe entre a superfície desses dois corpos, exatamente como a força normal (N), que já estudamos antes. Como essas forças têm uma mesma origem, é natural que elas guardem uma relação entre si. De fato, experimentalmente demonstra-se que a relação existente entre o módulo dessas forças é uma proporção simples:

$$F_{\text{atrito}} = \mu N. \quad (2.9)$$

Trabalho e Energia

Todo processo existente no mundo natural envolve a transformação de uma grandeza física. Mais precisamente, uma determinada forma assumida por esta grandeza muda qualitativamente para outras formas, sem que, no entanto, quantitativamente tal grandeza seja aumentada ou diminuída ao longo do tempo em que se dá a transformação. Dizemos, assim, que ela é conservada. Essa grandeza é Energia, e o processo em que ocorre sua transformação é Trabalho.



Fig. 2.9 - Usina hidrelétrica

A constante de proporcionalidade μ depende da natureza dos corpos em questão, e é chamado de **coeficiente de atrito**. Há também forças de atrito existentes entre corpos sólidos e líquidos e entre líquidos, de descrição mais complicada. Tais forças são denominadas genericamente de **viscosidade**.

É graças às forças de atrito que os corpos perdem energia à medida que prosseguem em seu movimento (pois o trabalho realizado é negativo), até atingirem o repouso, se não houver forças motoras atuando. Todos os movimentos que acontecem à nossa volta estão sujeitos a forças de atrito e tal aspecto dificultou o estudo do movimento por vários séculos (vide Aristóteles), de modo que só se chegou à Lei de Inércia no séc. XVII.

Potência (P) é um outro conceito útil subordinado à idéia de trabalho. Dizemos que, se um mesmo trabalho é executado por duas máquinas em intervalos de tempo diferentes, a que o realizou em menos tempo é mais potente do que a outra. Potência significa, portanto, trabalho realizado por unidade de tempo, ou, matematicamente

$$P = \frac{T}{\Delta t}, \quad (2.10)$$

onde Δt é o intervalo de tempo em que o trabalho foi realizado. No S.I. tem unidade de Watt, isto é, 1 Watt = 1 Joule/1 Segundo ($W=J/s$).

Situação-problema: um automóvel de corrida com massa de 1200 kg acelera uniformemente de 0 a 100 km/h em 10 s. Já um outro acelera de 0 a 100 km/h em 8 s, e tem massa de 1000 kg. Qual dos automóveis tem o motor com maior potência? Despreze a resistência do ar.

Esse é um problema bom de resolver, pois ele nos ajuda a resgatar uma série de conceitos aprendidos anteriormente. Para atacá-lo, vamos ter de, primeiramente, calcular a distância percorrida por cada automóvel. Em seguida, a aceleração (pois temos a variação da velocidade e o respectivo intervalo de tempo), depois a força desenvolvida pelo motor (massa vezes aceleração). Então devemos multiplicar essa força pelo deslocamento para achar o trabalho motor e, finalmente, dividi-lo pelo intervalo de tempo para encontrar a potência e comparar o valor encontrado para os dois automóveis.

Vamos inicialmente transformar as unidades das velocidades para o S.I. (km/h para m/s):

$$100\text{km/h} = 100 \times 1000\text{m}/3600\text{s} \sim 27,78\text{m/s}.$$

Então o primeiro automóvel (A) desenvolve uma aceleração de

$$a_A = \frac{27,78\text{m/s} - 0\text{m/s}}{10\text{s}} = 2,778\text{m/s}^2$$

Já o segundo automóvel (B) tem uma aceleração de

$$a_B = \frac{27,78m/s - 0m/s}{8s} = 3,473m/s^2$$

Uma vez que o enunciado do problema diz que a aceleração é uniforme, então estamos diante do Movimento Retilíneo Uniformemente Variado, que já estudamos na unidade anterior, e as distâncias percorridas por ambos os automóveis são, sabendo-se que ambos partem do repouso:

$$d_A = \frac{1}{2}a_A t_A^2 = \frac{1}{2}2,778m/s^2(10s)^2 = 138,9m$$

e

$$d_B = \frac{1}{2}a_B t_B^2 = \frac{1}{2}3,473m/s^2(8s)^2 = 111,1m$$

Calculemos, agora, o trabalho motor efetuado pelos dois automóveis. Considerando que a força e o deslocamento ocorrem na mesma direção e sentido, basta multiplicar essas duas grandezas:

$$T_A = F_A d_A = m_A a_A d_A = 1200kg 2,778m/s^2 138,9m = 463.037,04J$$

e

$$T_B = F_B d_B = m_B a_B d_B = 1000kg 3,473m/s^2 111,1m = 385.850,30J$$

Logo a potência desenvolvida pelos motores será

$$P_A = \frac{T_A}{t_A} = \frac{463.037,04J}{10s} = 46.303,704W \text{ ou aprox. } 46,3 \text{ kW (Kilowatt)}$$

e

$$P_B = \frac{T_B}{t_B} = \frac{385.850,30J}{8s} = 48.231,287W \text{ ou aprox. } 48,2 \text{ kW (Kilowatt)}$$

Vemos, assim, que o motor do automóvel B tem a maior potência.

Consideremos uma das formas mais simples de energia, que é a energia de movimento, também chamada de **cinética**. Vamos defini-la a partir do trabalho motor realizado por uma força constante agindo sobre uma partícula, na mesma direção em que esta se desloca, isto é, $T = Fd$. A força provocará uma aceleração a na partícula, o que fará sua velocidade aumentar de certo valor inicial v_i para v_f . Pela lei de Torricelli, o deslocamento é dado por

$$v_f^2 = v_i^2 + 2ad \Rightarrow d = \frac{1}{2a}(v_f^2 - v_i^2), \quad (2.11)$$

e pela Segunda Lei do movimento, temos $a = F/m$. Substituindo em (2.11), temos

$$d = \frac{1}{2F/m} (v_f^2 - v_i^2) \Rightarrow Fd = T = \frac{1}{2} mv_f^2 - \frac{1}{2} mv_i^2.$$

Se definirmos energia cinética EC (ou de movimento) como sendo $E_C = \frac{1}{2} mv^2$, então a equação (2.12) nos diz que o trabalho realizado é a diferença entre a energia cinética final e a inicial. Ou seja, se essa força for oriunda de um empurrão dado por nós, significa que o trabalho realizado converteu energia química acumulada em nossos músculos em energia de movimento, aumentando o valor desta.

Fica claro do exemplo acima que energia também pode ser definida como a grandeza física capaz de realizar trabalho. Se tentarmos cessar o movimento do objeto usando a força de nossos músculos, o trabalho será resistente e energia de movimento será convertida em energia muscular, pois os músculos ficam tensionados, ao determos o objeto (estamos desconsiderando aqui perdas de energia devido ao atrito).

Podemos definir, como fizemos em relação ao movimento, uma outra forma de energia, dessa vez baseada na **posição** que a partícula ocupa em certa região do espaço. Essa forma de energia é denominada de **potencial**. Por exemplo, o trabalho realizado pela força peso, durante a queda de um objeto, transfere energia potencial gravitacional armazenada no próprio campo gravitacional para a partícula, que ganha energia de movimento (cinética). Assim, o trabalho realizado pela força peso atuando sobre o objeto com massa m, ao deslocá-lo da altura inicial h_i até a altura final h_f (repare que $h_f < h_i$), será

$$T = Pd = -mg(h_f - h_i), \quad (2.13)$$

onde o sinal negativo é devido ao fato de que $h_f < h_i$. Se definirmos a energia potencial gravitacional U de um objeto posicionado a uma altura h como sendo dada por

$$U = mgh, \quad (2.14)$$

então $T = -(U_f - U_i) = U_i - U_f$. Da equação (2.12) sabemos também que o trabalho realizado é a diferença entre as energias cinéticas final e inicial, $T = E_{cf} - E_{ci}$. Igualando-se as duas expressões, temos

$$E_{cf} - E_{ci} = U_i - U_f \Rightarrow E_{cf} + U_f = E_{ci} + U_i. \quad (2.15)$$

A equação (2.15) expressa o Princípio de Conservação da Energia Mecânica, definida como a soma das energias cinética e potencial. Então, inicialmente o objeto, imediatamente antes de ser solto a partir do repouso de uma altura h, possui energia unicamente na forma de energia potencial. Não possui energia cinética, pois sua velocidade é nula. Quando ele é liberado, à medida que cai, o campo gravitacional terrestre vai convertendo energia potencial em energia cinética, enquanto o corpo adquire velocidade. Assim, a energia

potencial das águas que se precipitam do alto da represa de uma hidrelétrica converte-se em energia cinética, que será transferida para as pás da turbina, a partir de onde essa energia será convertida em eletricidade por outro mecanismo de transformação, a ser explorado na próxima unidade.

É verdade que parte da energia potencial do corpo também se transforma em som, calor, e, eventualmente, até eletricidade estática, durante sua queda. Entretanto, o princípio de conservação da energia não diz respeito somente à energia mecânica, como já afirmamos acima. Ele é muito mais geral e envolve todas as formas de energia conhecidas.

1.5 A Física dos Corpos Rígidos

Até agora temos estudado, essencialmente, a mecânica de uma ou, no máximo, duas partículas, entendidas como elementos materiais cuja extensão espacial é desprezível. Mencionamos que a descrição detalhada do movimento de três partículas ou mais, submetidas a forças de interação mútuas, torna-se, em geral, bastante complicada, e isso é conhecido como o problema dos três corpos. Tal problema foi formulado (e demonstrado) pelo brilhante matemático francês Henri Poincaré no início do séc. XX.

Felizmente, para algumas situações particulares, existe como estudarmos o comportamento de um conjunto muito grande de partículas, senão de forma individual e detalhada, pelo menos no seu todo. Consideremos um **corpo rígido** ideal, por exemplo. Este pode ser definido como um agregado coeso de muitas partículas em que a distância entre quaisquer pares delas é constante, independente do movimento seguido pelo corpo como um todo. Assim, o que uma dessas partículas fizer, todas as outras também o farão, e da mesma maneira, pois elas estão unidas rigidamente, de modo que os únicos movimentos permitidos aos corpos rígidos são o de **translação** e o de **rotação** em torno de um eixo (e sua combinação), pois, por definição, eles movimentam-se sem se deformar.

Na verdade, não existe corpo rígido ideal, como o acima descrito. Nesse sentido, um corpo que possuísse tais características sequer poderia transmitir som, pois as ondas sonoras são deslocamentos periódicos das partículas de um meio em torno da sua posição de equilíbrio, e o corpo rígido, por definição, não permite movimentos individuais das partículas que o formam. Mesmo a mais rígida de todas as substâncias conhecidas transmite som.

Assim, em princípio, todos os corpos são deformáveis. Observa-se que a escala de tempo em que se dá uma deformação apreciável de alguns deles é muito grande, como rochas, por exemplo, quando comparada com o tempo de vida de um ser humano, o que, para a maioria dos propósitos, permite-nos tratá-los como corpos rígidos. Vamos considerar o movimento de **translação**

Pesquise e disserte sobre a vida e a obra de Henri Poincaré.

Corpo Rígido

Embora seja formado por inúmeras partículas fortemente ligadas entre si, trata-se de um sistema simples de estudar, pois a distância entre quaisquer pares de partículas que o formam é constante. Seu movimento como um todo é igualmente simples, essencialmente composto de translação e rotação. Para todos os fins práticos, não existem movimentos internos.



Fig. 2.10 - Não tente fazer isso...

de um corpo rígido. Inicialmente imaginemos que ele está em repouso, no espaço, e é formado por N partículas, com massas m_1, m_2, \dots, m_N . Se, em um mesmo intervalo de tempo Δt , a partícula 1 se desloca, na direção x, de uma distância Δx_1 , a partícula 2 de uma distância Δx_2 e assim por diante, então a quantidade de movimento total do corpo será, nessa direção, a soma da quantidade de movimento das partículas que o constituem:

$$P_x = m_1 \frac{\Delta x_1}{\Delta t} + m_2 \frac{\Delta x_2}{\Delta t} + \dots + m_N \frac{\Delta x_N}{\Delta t}. \quad (2.16)$$

Embora a quantidade de movimento seja uma grandeza vetorial, estamos trabalhando apenas com uma direção do espaço (a direção x), de modo que suas componentes podem ser algebricamente adicionadas, como números simples.

Como estamos considerando um corpo rígido ideal, então os deslocamentos de todas as partículas, projetados na referida direção, devem ser rigorosamente iguais a um valor fixo, Δx , ou seja, $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \dots = \Delta x_N = \Delta x$, de modo que podemos fatorar (2.16):

$$P_x = (m_1 + m_2 + \dots + m_N) \frac{\Delta x}{\Delta t} = M v_x. \quad (2.17)$$

onde M é a massa total do corpo rígido e v_x é a componente x de sua velocidade. Portanto, igualando as expressões (2.16) e (2.17), ficamos com

$$M v_x = m_1 \frac{\Delta x_1}{\Delta t} + m_2 \frac{\Delta x_2}{\Delta t} + \dots + m_N \frac{\Delta x_N}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \Delta(m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_N x_N) \quad (2.18)$$

Na última igualdade, consideramos que a soma das variações é a variação da soma (as massas das partículas são invariáveis). Dividindo tudo por M ficamos com

$$v_x = \frac{1}{\Delta t} \frac{\Delta(m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_N x_N)}{M} = \frac{\Delta x_{CM}}{\Delta t}. \quad (2.19)$$

Ou seja, a velocidade do corpo rígido pode ser definida como a velocidade com que se desloca o ponto matemático (imaginário) cuja coordenada na direção x é dada por

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_N x_N}{M} \quad (2.20)$$

Esse ponto imaginário é chamado de **centro de massa**. Ele representa uma média ponderada pelas massas das coordenadas das partículas que formam o corpo rígido. Do mesmo modo, as coordenadas desse ponto nas direções y e z do espaço serão

$$y_{CM} = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + \dots + m_N y_N}{M}, \quad z_{CM} = \frac{m_1 z_1 + m_2 z_2 + \dots + m_N z_N}{M} \quad (2.21)$$

A multiplicação da velocidade v_x pela massa M , em (2.19), fornece-nos a quantidade de movimento total do corpo rígido na direção x (e, assim, para as outras direções do espaço). A aceleração do corpo como um todo pode ser vista também como a aceleração desse ponto matemático e, portanto, a resultante das forças que atuam sobre o mesmo pode ser estudada como se atuasse nessa partícula imaginária, situada no centro de massa.

Em resumo, ao se descrever a dinâmica de um corpo rígido, este pode ser tratado como se fosse uma única partícula, de massa M e situada nas coordenadas do centro de massa, dadas por (2.20) e (2.21). Assim, por exemplo, uma cadeira lançada obliquamente no campo gravitacional terrestre, por mais complexo que seja o seu movimento, terá o centro de massa descrevendo uma simples parábola, que é a trajetória de uma partícula voadora sujeita à aceleração da gravidade da Terra.

Agora vamos tratar da **rotação** de um corpo rígido. Precisamos antes definir alguns conceitos básicos. Quando vamos abrir (ou fechar) uma porta, por exemplo, se tentamos fazê-lo empurrando-a próximo às dobradiças, vamos ter dificuldades. É por essa razão que as maçanetas das portas são colocadas a maior distância possível das suas dobradiças, exatamente para facilitar o nosso trabalho de abri-las ou fechá-las. E esse trabalho também será facilitado se empurrarmos a porta lateralmente. Se tentarmos puxá-la ou empurrá-la numa direção paralela ao plano da porta, por exemplo, segurando pelas duas maçanetas, forçando-a para fora ou para dentro, seremos igualmente mal sucedidos. O máximo que conseguiremos é arrancar ou empenar a porta.

Essas simples observações permitem-nos definir o conceito de **torque**, τ , que é a capacidade que uma força aplicada a uma distância r de certo ponto possui de realizar rotação de um corpo em torno desse ponto:

$$\tau = F \cdot r \cdot \sin\theta \quad (2.22)$$

Aqui, $F \cdot \sin\theta$ é a componente da força na direção perpendicular ao raio r (situado no plano da porta e perpendicular ao eixo de rotação), uma vez que é ela que efetivamente realiza a rotação; θ é o ângulo entre o vetor força e o vetor raio. Percebemos também, de (2.22), para a mesma força aplicada, quanto menor o raio r , que é a distância do ponto de aplicação da força até o eixo de rotação (no exemplo da porta, a distância até a dobradiça), menor será o torque, ou seja, menor a capacidade de girar o corpo (vide figura 2.11). No S.I., torque tem unidade de N.m (note que é a mesma de trabalho, só que não indicamos como joule, por ter um caráter físico diferente).

O torque é uma grandeza vetorial, pois sua direção muda conforme muda a direção do eixo de rotação. Mas para efeito do estudo que fazemos aqui, basta que levemos em conta apenas o seu módulo.

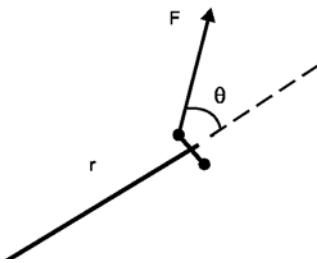


Fig. 2.11 - Força abrindo uma porta, vista de cima.

Mostre que os torques exercidos pelos pesos em relação ao eixo que passa pelo apoio, no problema anterior, se anulam, isto é, não há rotação no sistema.

Situação-problema: Uma fina e estreita tábua retangular, com 120 cm de comprimento e de massa desprezível, suporta sem se curvar, em suas extremidades, massas de 300g e 900g, respectivamente. Em que ponto da tábua deve-se colocar um apoio, de modo a equilibrar horizontalmente o sistema?

No ponto em que a tábua com as massas equilibra-se, há uma força normal que cancela a resultante das forças representadas pelos pesos dessas massas. Como já visto, a resultante das forças atuantes em um corpo rígido pode ser considerada como sendo aplicada diretamente no centro de massa do sistema. Então este deverá ser o ponto em que colocaremos o apoio a fim de equilibrá-lo. Vamos considerar o eixo x como estando ao longo do comprimento da tábua em equilíbrio, na horizontal. Se escolhermos a origem das coordenadas como sendo a posição ocupada por uma das massas, digamos, a de 900g, então a posição da outra massa estará a 120cm da primeira, no eixo x. Assim, o ponto que define o centro de massa estará, nesse eixo, de acordo com a expressão (29), em

$$x_{CM} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{M} = \frac{900g \cdot 0cm + 300g \cdot 120cm}{1200g} = 30cm$$

Portanto, o apoio deverá estar a 30cm da massa de 900g ou a 90cm da de 300g.

1.6 A Física dos Corpos Fluidos

Vimos na seção anterior que o sistema físico constituído de partículas que formam um corpo rígido é relativamente simples de ser descrito. Há, entretanto, outros sistemas igualmente formados de numerosas partículas que não se comportam como um corpo rígido, e, portanto, não são tão simples de se estudar. Nestes sistemas, as partículas não estão fortemente ligadas umas às outras, e os chamaremos genericamente de fluidos.

Dependendo do grau de coesão existente entre as partículas do fluido, se maior ou menor, podemos classificá-los como **líquidos** ou **gases**, respectivamente. Estes últimos são denominados **gases ideais**, se não há nenhuma força de coesão entre as partículas que os formam. Portanto, existe todo um espectro de corpos extensos (macroscópicos) na Natureza, desde aqueles cujas partículas podem ser vistas como tendo uma máxima coesão (corpos rígidos ideais) até os de coesão desprezível (gases ideais).

Os líquidos tendem a ocupar a forma do recipiente em que são despejados, uma vez que suas partículas constituintes deslizam com facilidade umas sobre as outras, até encontrarem uma situação de equilíbrio. Assim, é possível caracterizar os líquidos pela capacidade que têm de fluir. Se a superfície de um líquido em repouso for submetida a uma força tangencial, como o vento soprando rente às águas de um lago, observa-se que essa porção do

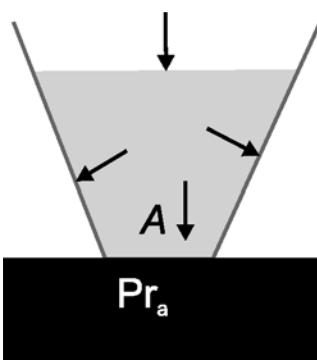


Fig. 2.12 - Como as setas indicam, em um líquido em repouso só podem existir forças perpendiculares às superfícies de contato.

líquido prontamente se põe a movimentar, com a formação de correntes e de ondas superficiais, por menor que seja a magnitude daquela força. Logo, para que um líquido esteja em repouso, é necessário que haja apenas forças perpendiculares às superfícies de contato que o delimitam. Seja qual for o líquido em repouso de que estivermos falando, então ele constitui objeto de estudo da hidrostática. É desta última que nos ocuparemos agora.

Antes, vamos definir uma grandeza associada com as forças que se dispõem perpendicularmente às superfícies de contato e nelas se distribuem uniformemente. Dizemos que, quando uma força de mesma magnitude é aplicada primeiramente sobre uma superfície A de extensão menor que outra B, e depois sobre esta, então a força uniforme sobre a superfície

A exerce uma pressão maior que sobre B. Esta é a razão de furarmos o pé quando pisamos em um prego e de podermos deitar sem nos ferir em camas de pregos, como os faquires do oriente.

Assim, vamos definir esta grandeza (pressão - p) como a razão entre o módulo da força F aplicada perpendicular e uniformemente a uma superfície e o valor de sua área A :

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.23)$$

A unidade de medida de pressão no S.I. é o N/m^2 , que recebe o nome de pascal, símbolo Pa .

Consideremos que uma película circular de um material qualquer flutuando horizontalmente no interior do líquido da fig. 2.12, que vamos supor ser água, a uma profundidade constante h . Então, uma superfície de contato entre a película e a água se formará e, sobre ela, haverá forças atuando perpendicularmente, exercendo uma pressão em todos os lados da película (estamos ignorando forças de caráter microscópico). Qual é o valor dessa pressão? Primeiramente, consideremos o peso da coluna d'água existente sobre a película, que vai desta até a superfície do líquido, formando um cilindro imaginário de água. Se a densidade do líquido é dada por ρ e ele é incompressível, então o peso da coluna d'água sobre a película será,

$$\text{Peso}_{\text{coluna}} = \rho V g = \rho A h g, \quad (2.24)$$

onde A é a área da película, h é a altura da coluna (cilindro). Dividindo-se a equação 2.24 pela área da película, que também vale A , então teremos quantificada a pressão exercida sobre a película, devida à água

$$p = \rho g h. \quad (2.25)$$

Esta é a Lei de Stevin: a pressão em um líquido varia linearmente com a profundidade.

Princípio de Pascal: para calcularmos a pressão que efetivamente é exercida sobre a película, entretanto, temos de levar em conta também o peso da massa de ar (atmosfera) que se faz sentir sobre todos os corpos situados

na superfície da Terra e o qual exerce sobre eles uma pressão de cerca de 10^5 Pa, no nível do mar. Blaise Pascal, no século XVII, descobriu que essa pressão (aliás, toda pressão externa) se transmite para todos os pontos situados no interior dos líquidos, de modo que, à equação 2.25, deveremos acrescentar a pressão p_0 existente na superfície do líquido em contato com o ar, ficando com

$$p = \rho gh + p_0 \quad (2.26)$$

Situação-problema: Calcule a pressão exercida sobre o que sobrou do casco do Titanic, situado a uma profundidade de 4.000 m, no fundo do Atlântico Norte. Considere a densidade da água aproximadamente 1kg/litro.

Este problema é uma aplicação direta da equação (2.26). Devemos apenas converter a densidade da água para kg/m³ (S.I.). Sabemos que 1litro = 1 dm³ (decímetro cúbico) = (1m/10)³. Portanto, 1 kg/litro = 1000 kg/m³. Considerando que no nível do mar a pressão atmosférica é de 10^5 Pa, então a pressão pedida será

$$p = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 4000\text{m} + 10^5 \text{Pa} = 4,01 \cdot 10^7 \text{Pa}$$

Ou seja, cerca de 400 vezes a pressão atmosférica medida no nível do mar! Seríamos prontamente esmagados sob tal pressão. É surpreendente que existam seres marinhos, habitantes dessas profundezas, que nadam tranquilamente sem serem molestados por tão formidável pressão...

Princípio de Arquimedes: Certamente algum de vocês já se indagou o porquê de balões de ar quente subirem aos céus quando tudo tende a cair, e o porquê de navios feitos de ferro, pesando toneladas, não afundarem. Arquimedes de Siracusa, no segundo século antes de Cristo, mostrou que tudo depende da densidade (recordemos que é massa por unidade de volume): se um corpo possui uma densidade menor que o meio que o circunda, ele tende a subir verticalmente. Surge uma força resultante chamada **empuxo**, contrária à força peso e maior que esta. Se o corpo tem a mesma densidade que o meio, então ele ficará apenas flutuando, nem descerá nem subirá. Se a densidade do corpo é maior que a do meio, o peso vence o empuxo e ele afunda. Esse princípio é enunciado como

“O empuxo sobre um corpo é o peso do volume de líquido deslocado quando tal corpo nele é imerso.”

Se, ao mergulharmos um corpo, este deslocar uma massa de líquido maior que sua própria massa, então ele flutuará, pois tem uma densidade menor que a do meio. Assim, esses grandes navios, apesar de muito pesados, são também bastante volumosos e cheios de ar, possuindo uma densidade média menor do que a da água e, portanto, não afundam.

3

Parte

Da Termodinâmica às Ondas Eletromagnéticas

Objetivos:

- Compreender as transformações envolvendo Calor e Trabalho, as Leis que delas decorrem e suas aplicações, assim como os conceitos fundamentais e as Leis da Eletricidade e do Magnetismo.

Capítulo

Termodinâmica

Introdução

Começaremos estudando a ciência da Termodinâmica, que cuida dos processos e transformações físicas envolvendo calor, que é uma forma de transferência de energia baseada no movimento aleatório e incessante dos átomos e moléculas que compõem a matéria. Suas duas principais leis são: a) energia não é criada nem destruída e b) calor não pode ser integralmente transformado em trabalho.

Em seguida, estudaremos os fenômenos da eletricidade e do magnetismo, que são essencialmente produzidos por cargas elétricas. Veremos que a carga elétrica é uma propriedade intrínseca da matéria, como a massa. Mas diferentemente desta, pode assumir valores negativos e positivos, e além disso é quantizada. Veremos que as cargas elétricas interagem entre si por meio de campos, que podem ser compreendidos como uma ação física que se estende no espaço, para além das cargas (puntiformes) que os geraram. Também procuraremos compreender como esses mesmos campos podem se “autogerar” e, assim, se propagar no espaço, dando origem às chamadas ondas eletromagnéticas, base da Óptica Física.

1.1 Conceitos básicos

É importante estar familiarizado com os conceitos e princípios básicos da Termodinâmica, pois o seu total domínio é fundamental para um bom entendimento do que é esta ciência.

Para melhor entendê-la, assim como se faz em outras ciências, a Termodinâmica estuda apenas a quantidade de matéria sobre a qual se tem interesse, isolando-a de tudo que seja externo e que não interfira física ou quimicamente com a referida quantidade. Daí vem a definição de **sistema termodinâmico** e **vizinhança**. Sistemas termodinâmicos podem ser sólidos e fluidos (gases ou líquidos) contidos num recipiente e separados do meio exterior. Evidentemente, deve haver uma separação, real ou não, entre o sistema termodinâmico e o meio exterior (ou vizinhança). A separação pode ser

A palavra Termodinâmica surgiu em 1840. De origem grega, *therme* significa calor, e *dinâmica* significa poder. Este ramo da física estuda o modo como a energia pode ser armazenada, como essa energia é transformada e como é dissipada. A Termodinâmica descreve em termos matemáticos relativamente simples as propriedades físicas dos sistemas, em função da quantidade de energia e de massa.

Nosso planeta recebe continuamente energia radiante do Sol e emite ondas de calor na forma de radiação infra-vermelha. Mas a Terra, com o passar do tempo, não ficará muito mais pesada nem muito mais leve do que está, de modo que não há transferência de massa para seu exterior. Em contrapartida, buracos negros são sistemas termo-dinâmicos abertos porque exercem uma forte atração gravitacional em suas proximidades. Assim, qualquer corpo é atraído para eles, mas nada sai dessa região, nem a luz. Neles há, portanto, transferência de massa.

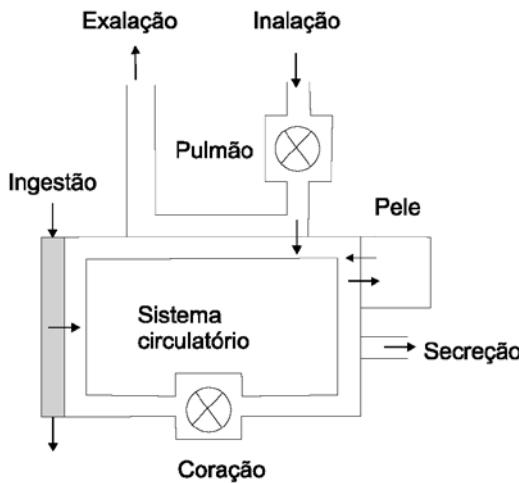


realizada introduzindo-se o conceito de **fronteira**. A parede que separa o recipiente, citado anteriormente, do ar atmosférico é um exemplo de fronteira real. Esta parede pode permitir ou não a passagem de calor, desde a vizinhança até o interior do sistema termodinâmico.

Ao longo deste estudo, veremos que podemos encontrar sistemas termodinâmicos fluidos em que a quantidade de matéria contida no sistema permanece constante e em repouso, e estes sistemas são chamados de **sistemas fechados**. Neles, a matéria nunca atravessa a fronteira da vizinhança para o interior do sistema, ou vice-versa. Caso contrário, quando o fluido escoa através das fronteiras, os sistemas são chamados **sistemas abertos**. A diferença entre esses tipos de sistemas pode ser vista com exemplos. Considere uma reação química realizada em solução aquosa em um tubo de ensaio. O sistema consiste em um solvente, a água, e outras substâncias químicas dissolvidas no tubo de ensaio. O sistema, neste exemplo, é definido como a parte escolhida a ser estudada. A vizinhança é simplesmente o que é excluído do sistema e sobre o qual não há interesse de se estudar. O sistema e sua vizinhança são separados por uma fronteira, que neste caso, é o tubo de ensaio.

Um sistema é dito fechado quando é permitido a trocar calor com a vizinhança, mas não massa, isto é, a fronteira de um sistema fechado é impermeável à massa. No exemplo do tubo de ensaio, enquanto não seja importante a evaporação do solvente nem seja adicionado outro componente, o sistema é fechado. Outro exemplo de um sistema fechado é a Terra.

Um exemplo cotidiano de sistema termodinâmico aberto é o homem. Ele inspira e expira ar continuamente, come, bebe, defeca e urina periodicamente. Os alimentos atravessam a fronteira do sistema desde o exterior. No decurso, a energia térmica é trocada entre ele e os arredores. Um diagrama esquemático da estrutura interna desse sistema aberto é mostrado na figura abaixo.



Por último, existem os **sistemas isolados**, ou seja, quando a fronteira não permite nem a passagem de massa nem a passagem de energia. O sistema é constante no que diz respeito à composição material e à energia. Um exemplo de sistema isolado é a garrafa térmica. Havendo vácuo entre as paredes do recipiente, evita-se tanto a perda quanto a entrada de calor ao sistema. Da mesma forma, enquanto a tampa da garrafa não for aberta, não entra nem sai líquido da garrafa. A quantidade e a temperatura do café permanecerão inalteradas.

A importância de definir um sistema termodinâmico esta em de descrever o seu comportamento para estudo de sua interação com a vizinhança. Isto pode ser realizado através de

propriedades ou variáveis de estado. As propriedades de estado, quando recebem um valor numérico a partir de medidas efetuadas, permitem definir o estado termodinâmico do sistema. Algumas propriedades de estado bem conhecidas são a **pressão**, o **volume**, a **massa**, a **temperatura**, dentre outras.

Em um sistema é possível determinar, a qualquer momento, seu estado ou condição termodinâmica. As propriedades de estado sempre definem o comportamento da fase (sólida, líquida ou gasosa) que se encontra dentro do sistema, quando existe o chamado **equilíbrio termodinâmico**, isto é, quando as propriedades de estado não mudam com o tempo. Todas as propriedades de estado, quando alteradas, definem um novo estado para o sistema termodinâmico.

Um diagrama muito útil e eficiente para a análise do estado termodinâmico das substâncias é o diagrama de fases, P-T. Ele é utilizado para entender e predizer muitos aspectos do comportamento e da composição das fases das substâncias presentes em um sistema termodinâmico a diferentes temperaturas e pressões.

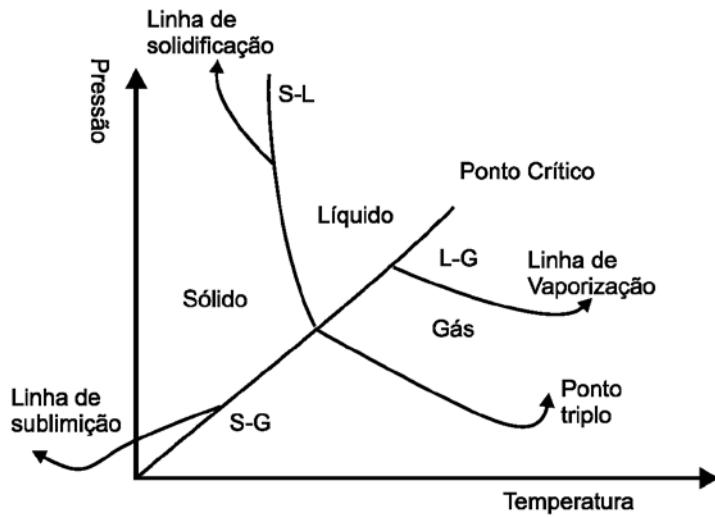


Fig. 3.2 - Diagrama de Fases da água pura.

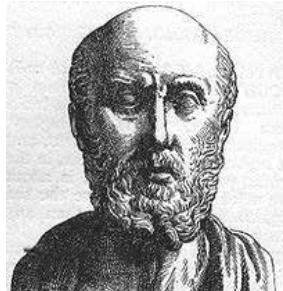
Assim, como pode ser observado no diagrama, o ponto triplo corresponde ao estado no qual as três fases (sólido, líquido e gasoso) coexistem em equilíbrio térmico. Uma substância na fase vapor, com pressão acima da pressão do ponto triplo, muda de fase (torna-se líquido) ao ser resfriada até a temperatura correspondente na curva de pressão de vapor. Resfriando o sistema ainda mais, será atingida uma temperatura na qual o líquido irá se solidificar.

Uma substância na fase sólida com pressão abaixo da pressão do ponto triplo, quando aquecida mantendo-se a pressão constante, atingirá uma temperatura na qual ela passa da fase sólida diretamente para a fase vapor,

- Descreva três exemplos de sistema fechado.
- Descreva três exemplos de sistema aberto.
- Descreva como funciona uma casa em termos de sistema aberto, sistema fechado e sistema isolado.

A água pode existir de forma homogênea em várias fases.

Quando existe homogeneousmente na fase líquida, pode se tornar vapor, após o aquecimento; ou a água pode se tornar sólida após o resfriamento. Então, em cada caso a dizemos que a água mudou de fase. Para cada fase, a substância pode existir a várias pressões e temperaturas ou, usando a terminologia da termodinâmica, em vários estados termodinâmicos.



Hipócrates (460-370 a.C.), um eminente médico grego que defendeu a tese que mostra a importância da boa mistura dos fluidos no organismo humano. Segundo ele, a causa das doenças é devida ao desequilíbrio na mistura dos fluidos corporais.

sem passar pela fase líquida, como mostrado na figura anterior. A vaporização é a passagem da fase líquida para a gasosa. A condensação é a passagem de uma substância da fase gasosa para a líquida. Ela pode ocorrer, também, à temperatura ambiente. Por exemplo, colocando-se água gelada num copo, observa-se a condensação do vapor de água do ar na sua parede externa. A sublimação ocorre para temperaturas abaixo do ponto triplo; nessas condições, uma substância qualquer pode passar diretamente da fase sólida para fase gasosa, ou vice-versa, sem se transformar em líquido.

A passagem de um estado termodinâmico a outro é realizada por um caminho que determina o tipo de processo entre um estado e outro. Alguns processos muitos usados são:

- **Processo Isobárico**, no qual a passagem de um estado a outro acontece mantendo a pressão constante.
- **Processo Isotérmico**, no qual a passagem de um estado a outro acontece mantendo a temperatura constante.
- **Processo Isocórico ou Isométrico**, no qual a passagem de um estado a outro acontece mantendo o volume constante.

Atividades de avaliação



1. Durante uma mudança de estado isobárico:

- () a pressão aumenta,
() a pressão diminui
() a pressão permanece constante

2. Em dias muito frios, ao falarmos, expelimos pela boca uma fumaça. Explique este fenômeno.

Como a agitação das moléculas não pode ser medida diretamente, mede-se a temperatura, através de outras propriedades.

No interior do termômetro de mercúrio há um bulbo, que é um tubo bem estreito chamado de capilar onde a substância termométrica (mercúrio) sobe e desce, conforme a temperatura que está sendo medida. A altura que o mercúrio marca no capilar é chamada de grandeza termométrica.

1.2 Temperatura. Lei Zero da Termodinâmica. Escala de Temperatura

Por muito tempo, no lugar da palavra temperatura, foi usada a palavra temperamento, do latim *temperare*, que significa misturar líquidos que não podem ser separados, como a água e o vinho. Cláudios Galenos, um ilustre médico grego, desenvolveu a idéia de Hipócrates e estudou a influência do clima sobre as misturas dos fluidos corporais, a ponto de determinar o caráter ou temperamento de uma pessoa. Assim, segundo ele, na região Norte, onde o clima era frio e úmido, os seus habitantes possuíam um temperamento selvagem, enquanto que o temperamento das pessoas que habitavam na região

Sul, onde o clima era quente e seco, era manso e fleumático. Em regiões onde o clima era bem misturado, isto é, temperado, as pessoas possuíam o caráter equilibrado, o melhor senso e a inteligência superior. Naturalmente, essas pessoas eram os gregos e os romanos. Hoje em dia, é bem conhecido que a temperatura corporal independe da região onde vivem os seres humanos.

A temperatura é uma propriedade física que descreve o estado termodinâmico de um sistema. Seu conceito intuitivo está associado à capacidade de distinguir qualitativamente se os corpos estão quentes e/ou frios. Os nossos estímulos sensoriais nem sempre são confiáveis para quantificar a temperatura de um corpo. Muitas vezes, materiais que se encontram num local à mesma temperatura, aparentam possuir temperaturas diferentes: o mármore e a madeira são dois bons exemplos quando localizados numa mesma sala. As sensações intuitivas, muito usadas para definir quando os objetos podiam ser considerados quentes ou frios, para medir temperatura, foram eliminados lentamente durante o século XVII.

A temperatura é uma grandeza que está associada ao grau de agitação das moléculas. A única forma certa de quantificar a temperatura de um corpo é através de medidas indiretas, isto é, usando o fato de que, quando a temperatura de um corpo varia, outras propriedades, chamadas propriedades termométricas, também variam. Algumas propriedades termométricas que variam com a temperatura são: as expansões volumétricas, lineares ou superficiais, a pressão de um gás que se encontra a volume constante, a resistência elétrica, a voltagem, dentre outras. Tomando como base uma relação linear entre a temperatura e a propriedade termométrica X, podemos escrever:

$$\frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = \frac{X - X_0}{X_1 - X_0} \quad (3.1)$$

Nesse caso, T é o valor da temperatura quando a propriedade termométrica toma o valor de X, T1 é o valor da temperatura quando a propriedade termométrica toma o valor de X1 e T2 é o valor da temperatura quando a propriedade termométrica toma o valor de X2.

É bem conhecido o fato de que, quando dois sistemas com diferentes temperaturas são colocados em contato direto, o sistema com temperatura maior esfria, enquanto que o sistema com temperatura menor aquece. Chegando ao ponto em que não ocorrem mais variações térmicas, esta situação é chamada de equilíbrio térmico, que é a forma ideal para introduzir formalmente o conceito de temperatura dos sistemas, isto é, quando atingido o equilíbrio térmico, a propriedade térmica que não varia é chamada de Temperatura. Agora, estamos prontos para enunciar a Lei Zero da Termodinâmica, a qual envolve o conceito de equilíbrio térmico.

A Lei Zero foi enunciada depois das outras duas, a Primeira e a Segunda Lei, por volta de 1930. Mas, por ser muito básica na época, não foi considerada como uma lei.

Uma ampla variedade de escalas foi anunciada em épocas diferentes, em lugares diferentes e por pessoas diferentes. Algumas deixaram de existir por serem totalmente subjetivas e arbitrárias, embora pudesse ser utilizáveis todas. Hoje em dia, as escalas de temperatura mais conhecidas são: a escala Celsius e a escala Fahrenheit.

Termômetro universal

Depois de mais de duzentos anos de pesquisa experimental com vários tipos de substâncias, chegou-se à conclusão de que todos os gases, quando se encontram a baixas pressões, apresentam o mesmo comportamento. Nestas condições, a pressão e o volume do gás apresentam o mesmo comportamento linear com a temperatura.

Quando dois sistemas se encontram separados, mas em equilíbrio térmico com um terceiro, então os três sistemas se encontram em equilíbrio térmico entre si.

A Lei Zero é a base física do funcionamento do instrumento chamado termômetro. Um termômetro, que atinge o equilíbrio térmico com um sistema, mede através de uma escala térmica predeterminada a temperatura do sistema. O instrumento foi desenvolvido no início do século XVII, provavelmente por Galileu Galilei.

Quando a expansão volumétrica, do álcool ou do mercúrio, é usada como propriedade termométrica para medir a temperatura de um corpo, o valor numérico real que define a temperatura é aquele obtido ao atingir-se o equilíbrio térmico. Para realizar essas medidas é necessário definir uma escala.

Uma das primeiras escalas termométricas conhecidas foi definida por Galenos; para isto ele misturou iguais quantidades de gelo e água fervendo, considerados, na época, os corpos mais frios e mais quentes. A essa mistura ele chamou de mistura neutra. A partir daí definiu quatro graus de temperatura inferiores a esse ponto neutro e quatro graus de temperatura acima do ponto neutro. Na verdade, a idéia de nove graus está relacionada com os 90 graus de latitude entre o equador e os pólos. Essa primeira aproximação de escala de temperaturas sobreviveu, de forma errada, sob os cuidados dos médicos árabes. Existem outras escalas, mas o princípio fundamental para criá-las é considerar que a temperatura, dentro de certo intervalo, varia linearmente com a variação da propriedade termométrica que será usada. Para isto, é necessário estabelecer uma equação reta que passa por dois pontos fixos e conhecidos. Esses pontos, preferencialmente, devem ser de fácil e fiel reprodução, de maneira que permitam fazer leituras comparativas com outros termômetros. Desde o início, para calibrar os termômetros, foram usadas a temperatura em que se descongela a água e a temperatura em que ela ferve como pontos fixos. Estabeleceu-se, dessa forma, a escala de temperatura Celsius. Celsius repetiu experimentos em vários climas com variações da pressão, encontrando o mesmo valor de temperatura em que o gelo se funde.

No entanto, alternativas de pontos fixos foram propostas durante muito tempo, sem sucesso; entre eles, durante algum tempo, foram usadas a temperatura de fusão da manteiga e a temperatura da axila do homem saudável.

A escala Celsius (símbolo °C) sobreviveu e usada até nossos dias. Ela concebe o ponto de solidificação (congelamento) da água, que corresponde a 0 grau, e o ponto de evaporação da água, que corresponde a 100 graus medidos a uma pressão atmosférica padrão. Esses dois pontos fixos foram divididos em cem passos. Tomando uma variável termométrica X, a relação linear com a temperatura pode ser escrita como:

$$\frac{T^0C - 0^0C}{100^0C - 0^0C} = \frac{X - X_0}{X_1 - X_0} \quad (3.2)$$

$$T^0C = \frac{X - X_0}{X_1 - X_0} 100^0C$$

Fahrenheit decidiu aperfeiçoar as técnicas de fabricação dos termômetros, com o objetivo de obter leituras mais precisas, no lugar de trabalhar com dois pontos fixos, considerou três pontos. Daí surge o grau Fahrenheit, cujo símbolo é °F. Os pontos escolhidos foram o de congelamento de uma mistura de água e de sal do mar como 0°F, gelo fundente sozinho na água 32°F, e a temperatura do corpo humano 96°F. Nessa escala o ponto de fusão da água é de 32 °F e o ponto de ebulição, de 212 °F. O ponto de ebulição da água se encontra a 180 graus acima da temperatura do gelo fundente. Tomando uma variável termométrica X, a relação linear com a temperatura pode ser escrita como:

$$\frac{T^0F - 32^0F}{212^0F - 32^0F} = \frac{X - X_0}{X_1 - X_0} \quad (3.3)$$

$$T^0F = \frac{X - X_0}{X_1 - X_0} 180^0F + 35^0F$$

Independente da escolha da escala, a propriedade termométrica sempre sofre a mesma alteração em função da variação da temperatura. Portanto, é possível igualar os lados direitos da expressão (2) e (3), resultando em:

$$\frac{T^0C - 0^0C}{100^0C - 0^0C} = \frac{T^0F - 32^0F}{212^0F - 32^0F} \quad (3.4)$$

$$T^0C = \frac{5^0C}{9^0F} (T^0F - 35^0F)$$

Quando dois termômetros são calibrados com substâncias líquidas diferentes (álcool e água), usando-se a mesma propriedade termométrica, por exemplo, a expansão volumétrica, podem surgir discrepâncias nos valores medidos das temperaturas. Isto não significa que haja erros na leitura da temperatura. A não coincidência nos valores medidos deve-se ao fato de que a relação linear da temperatura com a propriedade termométrica varia com o tipo de substância. Daí surgiu a necessidade de se criar um termômetro padrão ou universal cujas medidas não dependessem do tipo de substância empregada. Os gases a baixas pressões são chamados gases ideais, e a

Sendo a temperatura uma medida da agitação térmica molecular, a menor temperatura corresponde a situação em que não há movimento molecular. Este estado corresponde ao zero absoluto na escala Kelvin, que corresponde a -273,15 °C.

Um termômetro, de líquido em vidro, indica uma temperatura de 40° C numa pessoa que arde em febre. Determine a respectiva temperatura nas seguintes escalas: a) em graus Fahrenheit (°F); b) em Kelvin (K). Pesquise e disserte sobre o grau Rankine (°R) como unidade de medida da temperatura. Converta 100 °C para grau Rankine (°R).

Ainda hoje não se conhece o limite superior de temperatura existente no Universo, mas sabe-se, com grande certeza, a mínima. A menor temperatura, obtida em laboratório em 2004 pela equipe do físico Wolfgang Katterie, através de um condensado de Bose-Einstein, foi de 0.00000000450K. As maiores temperaturas acontecem quando ocorre a morte e a explosão das estrelas Supernovas. Na explosão podem ser atingidas temperaturas até 70 vezes maiores do que a temperatura do núcleo do Sol, que é de aproximadamente 14 milhões de graus °C.

temperatura mínima atingida por eles é de -273,15 °C. Lord Kelvin sugeriu a correspondência entre a temperatura mais baixa atingida pelos gases ideais (-273,15 °C) com o chamado zero absoluto; surgindo dessa forma a escala absoluta ou escala Kelvin. Nessa escala os dois pontos fixos determinados à pressão atmosférica com valores para o gelo fundido, de 273,15 K, e para a vaporização da água, de 373,15 K.

A solução encontrada para se criar o termômetro universal ou absoluto foi empregar gases a baixa pressão. A escala Kelvin foi rapidamente adotada por cientistas do mundo inteiro, mas sofreu uma mudança sutil ao reconsiderar os pontos fixos, 273,15 K e 373,15 K, por um único ponto, o ponto triplo da água, a temperatura onde coexistem em equilíbrio térmico as três fases: líquido, sólido e gasoso da água; e cujo valor é 273,16 K que corresponde a 0,01 °C. A temperatura é uma grandeza mensurável através de instrumentos cujo valor numérico não depende da extensão nem da quantidade de massa do sistema.

1.3 Calor. Trabalho. Primeira Lei da Termodinâmica

A definição de calor foi objeto de diferentes hipóteses. Cada uma delas teve seus defensores, movidos por convicções científicas ou filosóficas e até por razões políticas ou patrióticas. Durante muito tempo, a natureza do calor permaneceu obscura. Alguns cientistas admitiam que o calor estava relacionado a uma substância que estaria presente nos corpos que queimam. Tal substância hipotética era chamada de flogístico. No final do século XVIII, existia uma teoria que tentava explicar a origem do calor como se fosse uma substância fluida indestrutível, invisível e sem massa, que preenchia os poros dos corpos, chamada de fluido calórico. Depois de alguns anos, a palavra foi simplificada para calor. O fluido calórico saía e escoava de um corpo quente e penetrava num corpo frio. Esta teoria, baseada na intuição, foi apoiada por Lavoisier, um grande químico, que estudou, pela primeira vez, o processo de combustão.

A idéia do fluido calórico e da sua conservação, embora errada, era interessante, sendo responsável pelo progresso no estudo do calor. As experiências e as observações indicavam que essa teoria não era suficiente para explicar a natureza do calor. Benjamin Thompson ficou muito impressionado com a grande quantidade de calor liberada na fabricação de um canhão por ação de uma broca. A quantidade de calor liberada superava a expectativa e era capaz de vaporizar a água. Usando uma balança bastante precisa, ele tentou medir o peso do fluido calórico, mas, não detectou nenhuma diferença. Convenceu-se, assim, de que trabalho podia ser convertido em calor e que a natureza do calor era de fato movimento. Ele argumentou, comparando a uma esponja que não pode liberar indefinidamente água se comprimida, que a taxa de produção de calor poderia ser mantida indefinidamente, mas somente

enquanto o trabalho de usinagem fosse realizado. A idéia de calórico finalmente foi abandonada e o calor passou a ser identificado como energia, com as experiências realizadas por Joule. Contudo, os adeptos do calórico eram difíceis de ser convencidos.

Por outro lado, outros cientistas tentaram explicar a natureza do calor relacionando-o com movimento. Durante muito tempo, o trabalho realizado pelo cientista Bernoulli foi ignorado em defesa da existência do fluido calórico. Ele propôs um modelo microscópico que explicava o comportamento dos gases. Bernoulli supôs que os gases eram formados de inúmeras moléculas em rápido movimento aleatório (energia cinética) e mostrou que a pressão que um gás exerce sobre as paredes de um recipiente é devida às colisões das moléculas com as paredes do vaso. Quando os gases se encontram em um conjunto formado por um cilindro com pistão, se o volume ocupado pelo gás é reduzido pela metade, a pressão exercida pelo gás dobra de intensidade. O aumento da pressão é causado pela diminuição do volume do recipiente; sendo assim, as colisões das moléculas com as paredes do recipiente também aumentavam. Isto explicava o aumento da pressão, o aumento da energia cinética das moléculas e, portanto, da temperatura do recipiente. Dessa forma, o aumento da energia cinética das moléculas está associado ao aumento da temperatura do recipiente. Fora do recipiente, a vizinhança se encontra a uma temperatura inferior e o movimento das moléculas é transmitido às moléculas mais próximas das paredes. Concluindo, podemos dizer que calor é a energia térmica que se transfere entre corpos que estão a diferentes temperaturas. Para designar a energia que se encontra armazenada no sistema, em decorrência do movimento de suas partículas, usamos o termo energia interna. Não tem sentido, então, dizer que um corpo possui calor.

O calor flui de uma região de temperatura mais alta, onde a velocidade média molecular do movimento é maior, a uma das temperaturas mais baixas. Quando uma lata de refrigerante quente é colocada na geladeira, o calor flui continuamente da lata e é transferido para o interior da geladeira até que é atingido o equilíbrio térmico, ou seja, até atingir a temperatura média de todos os outros objetos no interior do freezer, incluindo o ar.

Por convenção, o calor é considerado com sinal positivo se estiver fluindo do sistema para a vizinhança e negativo, no caso contrário. Neste caso,

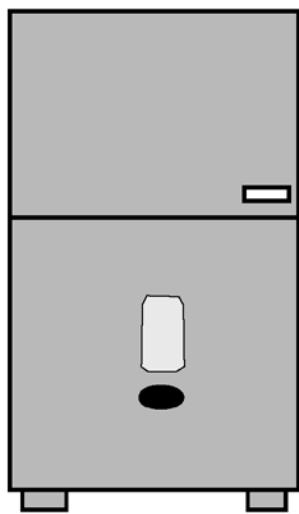


Fig. 3.3 - Lata de refrigerante na geladeira

O exemplo mais simples de que não pode existir um fluido calórico é mostrado quando esfregamos duas mãos e geramos calor. Como as duas mãos se encontram à mesma temperatura, é impossível explicar que sai fluido calórico de uma mão para a outra. O aumento observado na temperatura é explicado pelo calor produzido pelo atrito entre os corpos envolvidos.

Um processo é irreversível quando o sistema e sua vizinhança não conseguem voltar ao estado inicial espontaneamente. Alguns efeitos que tornam os processos irreversíveis são:

Transferência de calor com diferença brusca de temperatura.

Reações químicas espontâneas.

o sistema é considerado como a lata de refrigerante e o interior da geladeira, como a vizinhança; portanto, o calor flui do interior da lata para o interior da geladeira.

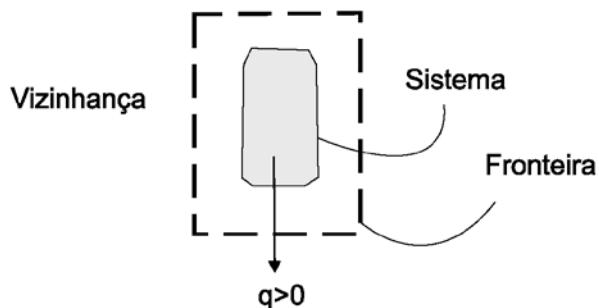


Fig. 3.4 - Convenção de sinal para o calor

Uma vez que calor é uma forma de energia, a unidade de medida do calor é o Joule (J). No entanto a unidade mais utilizada é a caloria (cal), cuja relação é:

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

Emprega-se também, com frequência, a unidade múltipla quilocaloria (kcal).

$$1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ cal} = 4,18 \text{ kJ}$$

Outra grandeza muito usada é o trabalho, conceito chave para o entendimento da Termodinâmica. Em Física, o conceito de trabalho é associado ao deslocamento de um corpo quando uma força é aplicada, por exemplo, quando uma caixa é levantada verticalmente. A definição técnica de trabalho é semelhante ao que estamos familiarizados com a vida cotidiana. Se alguém “trabalha duro”, então põe um grande esforço para realizar uma tarefa. Sabemos que a força causa o movimento de um corpo. De acordo com a Segunda Lei de Newton:

$$F=ma \quad (3.5)$$

onde F é a força, α é a aceleração e m é a massa.

O trabalho é semelhante ao calor. Quando o calor é adicionado a um sistema, a energia interna aumenta. Por exemplo, ao comprimir o volume de um gás, a energia interna do sistema também aumenta. Uma vez que trabalho também é uma forma de energia, a unidade de medida é o Joule (J). Por convenção, o trabalho é considerado com sinal positivo se estiver fluindo do siste-

ma para a vizinhança e negativo, no caso contrário. Na expansão de um gás dentro de um cilindro com embolo, o trabalho é negativo. Tanto calor como trabalho são formas de transferência de energia que atravessam a fronteira de um sistema, por isto são consideradas grandezas transitórias, ao contrário da energia interna, a qual permanece armazenada no sistema.

Embora semelhantes, ambas as grandezas apresentam diferenças: o trabalho é a transferência de energia devido à aplicação de uma força que produz deslocamento de um corpo; já o calor é a transferência de energia devido à existência de uma diferença de temperatura entre o sistema e a vizinhança.

Estamos prontos para enunciar o Princípio de Conservação da Energia. O enunciado da primeira lei é:

A energia de um sistema pode ser transformada de uma forma a outra e está distribuída em várias formas, mas não pode ser criada ou destruída. A energia de um sistema mais a da vizinhança é sempre constante no tempo.

A energia pode ser distribuída em uma grande variedade de formas. Algumas das diferentes formas que pode tomar são: a energia química, a elástica, a potencial, a cinética, a elétrica, a gravitacional, térmica, a energia nuclear, a radiante, e a energia de interação intermolecular, a massa. Independente da forma, a quantidade total num sistema termodinâmico é sempre constante, como mencionado anteriormente. Embora existam várias formas de energia, o seu estudo detalhado dependerá do interesse de quem as avalia, já que algumas formas são claramente mais importantes do que outras, ou relevantes apenas em situações muito específicas.

A Primeira Lei da Termodinâmica tem uma natureza totalmente empírica, isto é, não há prova matemática de que ela seja correta, ao contrário do teorema de Pitágoras, que foi obtido a partir dos princípios mais elementares da Geometria Euclidiana. A Primeira Lei é baseada no princípio de conservação da energia, quando são considerados o calor e o trabalho como formas de energia. A Primeira Lei é aceita pela comunidade científica sobre um número de diferentes bases, porém, a mais importante e necessária é a experiência de muitos pesquisadores.

Sendo um balanço energético, a aplicação da Primeira Lei a sistemas fechados, pode ser formulada como:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (3.6)$$

Nesse caso, ΔU é a variação da energia interna que foi armazenada no sistema. $\Delta Q = Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sai}}$ é o calor líquido que atravessa a fronteira do sistema e, $\Delta W = W_{\text{entra}} - W_{\text{sai}}$ é o trabalho líquido que atravessa a fronteira do sistema.

A tabela 1 mostra o conteúdo energético de vários alimentos.

Alimento	Cal
Refrigerante	137
Fatia de bolo de chocolate	171
Sanduíche	340

Segue abaixo uma tabela simplificada de gasto calórico por atividade física calculado em uma hora de atividade física.

Atividade	Cal
Andar	280
Assistir aula	126
Assistir TV	70
Basquete	560
Sexo	105
Dançar	315
Dormir	63

A primeira Lei é um balanço energético de todas as formas de energia que entram e saem do sistema através das fronteiras (ΔQ , ΔW) e a quantidade de energia que é armazenada no sistema (ΔU). Como resultado do balanço energético na fronteira do sistema, a energia interna pode aumentar, diminuir ou permanecer constante. Quando fornecemos a um sistema certa quantidade de calor Q , esta energia pode ser usada para o sistema realizar um trabalho W , de expansão ou de contração. Parte do calor fornecido pode ser, ainda, absorvida pelo sistema na forma de energia interna. Podemos fazer uma analogia com o funcionamento de uma instituição de crédito, como um banco. No final do dia, depois de todas as retiradas, depósitos, empréstimos e outras movimentações financeiras dos contribuintes em dinheiro e cheques, permanece armazenada no banco uma quantidade determinada de dinheiro, que é conhecida somente ao fechamento do caixa.

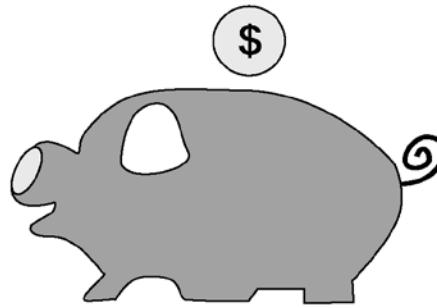


Fig. 3.5 - Balanço financeiro da poupança é semelhante ao balanço de energia.

Existe uma estreita semelhança entre a Primeira Lei da Termodinâmica e o Princípio de Conservação da Massa. Se o sistema for aberto, o balanço da quantidade de massa que permanece dentro do sistema depende das quantidades em massa que entram e saem dele através da fronteira. Analogamente com o exemplo do banco anteriormente explicado. Uma forma

simples de ilustrar a conservação da massa num sistema fechado pode ser realizada exemplificando que a quantidade de refrigerante que permanece dentro da lata não se modifica enquanto ela se mantiver fechada.

Atividades de avaliação



- Um termômetro, de líquido em vidro, indica uma temperatura de 40 °C numa pessoa que arde em febre. Determine a respectiva temperatura nas seguintes escalas: a) em graus Fahrenheit (°F); b) em Kelvin (K).
- Uma pessoa consome 538 joules de calor de uma fonte de alimentos. Expressa essa quantidade de calor em calorias.
- O calor propaga-se do Sol para a Terra por:
 - () Convenção.
 - () Irradiação.
 - () Condução.
 - () Convecção e irradiação

1.4 Entropia. Segunda Lei da Termodinâmica

Enquanto a Primeira Lei da termodinâmica estabelece a conservação de energia em qualquer transformação, a Segunda Lei estabelece restrições para que as transformações termodinâmicas possam ocorrer. Por exemplo, se colocarmos um sistema “quente” em contato com um sistema “frio” e permitirmos que seja atingido o equilíbrio térmico, acharemos que a temperatura final dos dois sistemas permanecerá em torno de um valor intermediário de ambos. Depois de atingido o equilíbrio, o sistema que inicialmente estava quente não se tornará mais quente, nem o sistema que inicialmente estava frio ficará mais frio, pelo menos sem o uso de refrigerador.

A grandeza termodinâmica que quantifica a possibilidade de que uma determinada transformação ocorra espontaneamente é chamada de entropia. Essa grandeza, que também é uma propriedade de estado, surgiu pela primeira vez no contexto da engenharia, onde a questão era melhorar a eficiência das máquinas térmicas.

Para entender o conceito físico dessa grandeza será feita uma analogia que exemplifica como a entropia está relacionada com a Segunda Lei da Termodinâmica e esta, por sua vez, está relacionada com o sentido em que ocorrem os processos espontaneamente, isto é, com a irreversibilidade dos processos reais. Analisamos, então, o comportamento das moléculas voláteis do perfume. Os componentes químicos orgânicos, tais como aldeídos aromáticos, que inicialmente se encontram “organizados ou controlados no frasco”, quando expostos ao ar, fazem com que as moléculas sejam difundidas no ambiente. As moléculas aromáticas possuem um movimento aleatório e se chocam constantemente com as moléculas dos gases que formam o ar. Depois de algum tempo, a concentração de moléculas de perfume será aproximadamente, uniforme em toda a sala e longe da condição inicial, ou seja, terão atingido a máxima desorganização. A experiência mostra que é extremamente improvável que os aldeídos aromáticos voltem espontaneamente para o frasco de colônia, o que torna a volta um processo irreversível devido ao aumento da entropia, durante o processo de difusão.

A segunda Lei mostra a tendência das partículas de passar de uma alta concentração (organização ou ordem) a uma baixa concentração (desorganização ou desordem) espontaneamente. Portanto, com esta lei é definido se um determinado processo é reversível ou irreversível. As moléculas de perfume não voltarão espontaneamente ao frasco, uma vez que este processo é irreversível; o que significa dizer que houve um aumento de entropia.

Nem todos os processos que satisfazem a Primeira Lei podem ocorrer. Em geral, um balanço de energia não indica a direção em que o processo irá ocorrer, nem permite distinguir um processo possível de um impossível. A Pri-

Discuta com seus colegas a seguinte questão: os físicos argumentam que a energia total do Universo tende a se tornar cada vez mais desordenada e, por consequência, podemos afirmar que a entropia do Universo cresce continuamente. Que consequências isto trará para a humanidade?

meira Lei apenas contabiliza as energias que entram e saem do sistema. Uma analogia que exemplifica de forma simples estes conceitos pode ser realizada quando analisamos as famosas dietas de emagrecimento. Como explicar o fato de pessoas que comem muito e não engordam? Segundo a Primeira Lei da Termodinâmica, quanto mais se come e menos se exercita, mais se engorda. Entretanto, sabemos que existem pessoas que contradizem a primeira lei: não engordam nunca e comem muito. A Primeira Lei orienta é necessário praticar exportes e comer pouco. A Segunda Lei limita e orienta: é necessário comer com qualidade para emagrecer.. A qualidade da alimentação é o que faz o organismo ser mais ou menos eficiente e produtivo. Para perder peso, para deixar de acumular massa e energia, não basta limitar a entrada e saída de alimentos e energia. É necessário verificar que tipo de calorias se está ingerindo (isto é, a qualidade das calorias dos alimentos ingeridos). Alimentos gordurosos são de baixa qualidade, altamente entrópicos; vegetais e cereais são de alta qualidade, e de baixa entropia. A excelência da dieta se consegue com a combinação da primeira e da segunda lei em conjunto, cuidando que o aumento da entropia seja o suficiente para tornar o processo de emagrecimento o menos irreversível possível.

Hipócrates, nascido em 460 a.C., já dizia: "Se pudermos dar a cada indivíduo a quantidade exata de nutrientes e de exercício, que não seja insuficiente, nem excessiva, teremos encontrado o caminho mais seguro para a saúde". Isto mostra, desde a antiguidade, a importância do balanço energético e a aplicabilidade das Leis da Termodinâmica para a vida.

1.5 Equações de Estado de um Gás Ideal

O aparecimento do termômetro e dos instrumentos de medição de pressão, junto com as balanças mais sensíveis, permitiu, depois de extensas pesquisas, a descoberta de propriedades interessantes do estado gasoso, quando as pressões são relativamente baixas. As relações observadas entre as variações na pressão, na temperatura e no volume pareciam ser as mesmas para todos os gases. Na Termodinâmica, uma equação de estado de uma substância pura é uma relação matemática que relaciona estas três propriedades de estado para um sistema termodinâmico que se encontra em equilíbrio. Essa equação é útil porque permite calcular uma propriedade de estado a partir de outras duas; por exemplo, podemos predizer qual será o volume a uma pressão e temperatura conhecida.

Uma das equações de estado mais conhecidas e mais simples é aquela que relaciona as propriedades termodinâmicas de pressão, volume e temperatura absoluta para um gás ideal, qual seja:

$$PV=nRT$$

onde:

P - representa a pressão do gás;

V - é o volume ocupado pelo gás;

n - a quantidade química (número de moles) de gás presente;

R - a constante universal dos gases ideais; T - a temperatura absoluta.

A constante dos gases ideais, R, pode ter dois valores:

$R = 8,31451 \text{ J.mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, quando:

P, estiver expressa em Pascal;

V, em m³;

n, em mol;

T, em Kelvin.

Um gás pode iniciar um processo termodinâmico com determinadas condições iniciais, e, por meio de transformações, chegar a outro estado termodinâmico. As transformações mais conhecidas e usadas são as isotérmicas, isobáricas e isocóricas. Em todas elas o ISO é um prefixo que significa igual. Para um gás que parte de um estado termodinâmico 1 até um estado termodinâmico 2, usando um processo isotérmico é válida a seguinte relação no estado 1 e no estado 2:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = nR \quad (3.8)$$

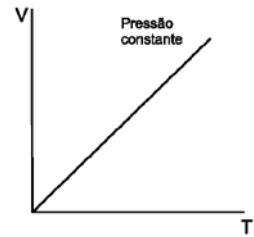
$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = nR$$

Igualando ambos os lados, temos:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (3.9)$$

Como o processo é isotérmico, então $T_1 = T_2$, e daí obtém-se:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (3.10)$$



Segundo a Lei de Charles, na qual , o volume é proporcional à temperatura quando se mantém o valor da pressão constante.

Esta relação, também conhecida como Lei de Boyle, é amplamente usada no nosso cotidiano, sem que percebemos. O nosso corpo permanece a uma temperatura constante de aproximadamente 36 °C; portanto, o processo de respiração é isotérmico. O ar atmosférico sofre mudanças de pressão ao entrar nos pulmões ou ao sair deles. Na etapa da inalação, o diafragma se expande deixando o volume do pulmão maior. Como o produto pressão-volume deve ser constante, a pressão interna do pulmão diminui com este aumento de volume. Como a pressão atmosférica é maior, o ar entra no pulmão até igualar as pressões. O processo inverso ocorre na exalação.

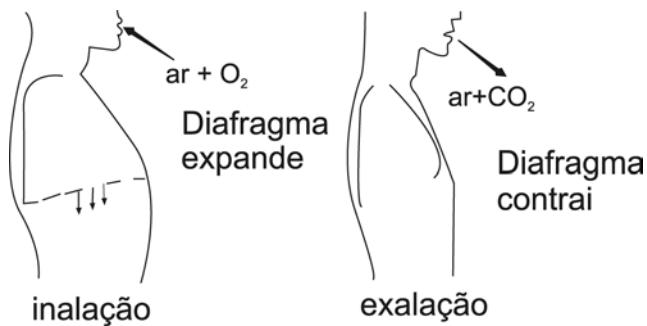


Fig. 3.6 - Lei de Boyle e a respiração

Para um gás que parte de um estado termodinâmico 1 até um estado termodinâmico 2, usando um processo isobárico, é válida a seguinte relação:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = nR \quad (3.11)$$

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = nR$$

Igualando ambos os lados, tem-se:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (3.12)$$

Como o processo é isobárico, então $P_1 = P_2$, e daí tem-se:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (3.13)$$

Esta relação também é conhecida como lei de Gay-Lussac. O volume da massa fixa de um gás, mantida a pressão constante, é diretamente proporcional à temperatura absoluta, isto é, $T \propto V$. Para que a pressão se mantenha constante durante o processo, um aumento da temperatura acarreta um aumento do volume. Um gás, ao ser aquecido, expande-se e, ao ser resfriado, contrai-se.



Câmara isobárica
É qualquer equipamento que permita manter a pressão constante ou controlada. O interior do avião funciona como uma câmara isobárica.

As cafeteiras atuam como câmaras isobáricas que funcionam à pressão atmosférica, a qual é constante. Quando se coloca água fria na cafeteira e a aquecemos, depois de algum tempo, a água começa a ferver; quando a água ferve, as bolhas de vapor se formam. Como o tubo é pequeno e as bolhas grandes, uma coluna de água é empurrada para cima pelas bolhas, atravessando o compartimento onde se encontra o pó de café. Finalmente, na saída, o café está pronto para beber.

Para um gás que parte de um estado termodinâmico 1 até um estado termodinâmico 2, usando um processo isocórico, é válida a seguinte relação:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = nR \quad (3.14)$$

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = nR$$

Igualando ambos os lados, temos:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (3.15)$$

Como o processo é isocórico, então $V_1 = V_2$, e daí tem-se:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (3.16)$$



Fig. 3.8 - Processo isocórico no pneu.



Fig. 3.7 - Cafeteira italiana: processo isocórico

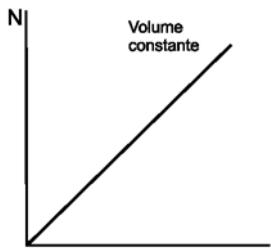
Atividades de avaliação



1. Considere o ar atmosférico como um gás ideal e determine o volume específico e a densidade para a pressão atmosférica padrão na temperatura de 20°C. (Adote a massa molecular do ar = 28,97 kg/kmol; R = 8 314 J/kmol·K).
2. Se a temperatura absoluta de dada massa de um gás ideal for reduzida à metade sob pressão constante, o volume do gás irá:

Câmara isobárica

É qualquer equipamento que permita manter a pressão constante ou controlada. O interior do avião funciona como uma câmara isobárica.



Segundo a Lei de Gay-Lussac, na qual a pressão é proporcional à temperatura, mantendo-se o valor do volume constante.

duplicar.

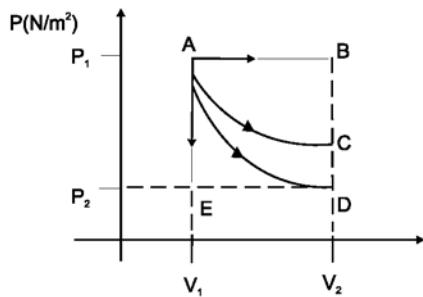
reduzir a quarta parte.

permanecer constante.

reduzir pela metade

quadruplicar.

3. Um gás ideal é submetido aos seguintes processos como mostrados no diagrama a seguir. Assinale a alternativa correta.



a expansão AB é isobárica.

a expansão AC é isotérmica.

a expansão AE é isocórica.

a expansão AE é adiabática.

Eletricidade e Magnetismo

2.1 Carga Elétrica

As primeiras descobertas relacionadas com os fenômenos elétricos foram realizadas pelos gregos antigos. Tales de Mileto, por volta de 600 a.C., esfregou lã de carneiro com resinas fósseis vegetais, chamadas de âmbar, e observou que, quando aproximava este âmbar a pequenos pedaços de palha, ambos eram atraídos. Já quando aproximava duas resinas de âmbar uma da outra, estas se repeliam. A partir daí, várias teorias foram criadas para justificar de forma coerente este fenômeno. Como em grego elektron significa âmbar, daí surgiu o nome eletricidade.

Dezenas de séculos depois, o médico inglês Gilbert resolveu escrever um tratado chamado *De magneti*, publicado em 1600, para divulgar os resultados das suas pesquisas experimentais que foram realizadas usando um aparelho denominado *Vesorião*, desenvolvido por ele. O Vesorião era uma espécie de bússola que tinha uma seta suspensa que girava na presença de um corpo. Quando a seta girava, era dito que tal corpo apresentava o efeito do âmbar (eletrizado). Era importante na época mostrar para a sociedade que não havia mistérios mirabolantes no âmbar atritado. Gilbert testou o seu aparelho com muitas substâncias eletrizadas, como diamante, cristais, ametista, metais, pedras, terra, água, azeite etc. Gilbert verificou que a agulha sempre girava, concluindo que todos os corpos apresentavam cargas elétricas.

Muitos anos de intensas pesquisas se passaram e, atualmente, é muito bem aceita por toda a comunidade científica a teoria que explica a atração e repulsão dos corpos, a qual parte do conceito de que a matéria é constituída por átomos e estes, por sua vez, são constituídos por um núcleo onde coexistem

partículas denominadas de prótons e nêutrons, ao redor do qual orbitam os elétrons.

Os prótons e os elétrons são partículas dotadas de uma importante propriedade física que permite explicar a eletricidade: carga elétrica. Da mesma forma que a palha e a lã de carneiro se atraem quando colocadas próximas, um próton atraí um elétron. Já um

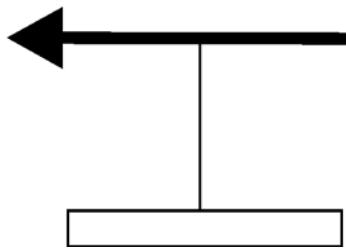


Fig. 3.9 - Vesorião de Gilbert

A matéria é constituída por átomos que possuem diferentes arranjos entre prótons, nêutrons e elétrons.

Os nêutrons dividem com os prótons o espaço do núcleo atômico.

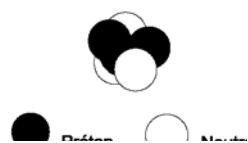
Em função do arranjo, os átomos adquirem propriedades físico-químicas bem definidas que identificam cada elemento. Em média, temos:

Tamanho do núcleo 10^{-12} cm.

Tamanho do átomo: 10^{-8} cm.

Massa: 10^{-12} g.

Volume: 10^{-24} cm³.





Michael Faraday nasceu perto de Londres. Aos 14 anos deixou a escola e começou a trabalhar. Durante oito anos foi aprendiz num encadernador, beneficiando-se da tolerância de seu patrão que lhe permitia ler os livros que encadernava. São muitas as contribuições de Faraday para a Física e para a Química sendo provavelmente o maior físico experimental de todos os tempos. Faraday introduziu os conceitos de campo e de linhas de campo e descobriu a indução eletromagnética e o diamagnetismo. Construiu o primeiro gerador de corrente. Estudou a eletrólise estabelecendo as bases da eletroquímica.

próton na presença de outro próton é repelido; um elétron na presença de outro elétron ocorre o mesmo. Estas situações permitiram associar convencionalmente um sinal a cada partícula. Para distingui-las foi atribuída uma carga elétrica positiva aos prótons e uma carga elétrica negativa aos elétrons. Os nêutrons seriam partículas eletricamente neutras, isto é, sem carga elétrica. A convenção de carga positiva e negativa é bastante adequada, já que cargas com sinais opostos exibem comportamentos opostos. Portanto, assim como a massa, as partículas que formam a matéria têm a elas associada a propriedade de carga elétrica.

Sendo assim, na figura a seguir é apresentado o Princípio de Atração e Repulsão: isto é, cargas com sinais opostos se atraem e cargas com sinais iguais se repelem.

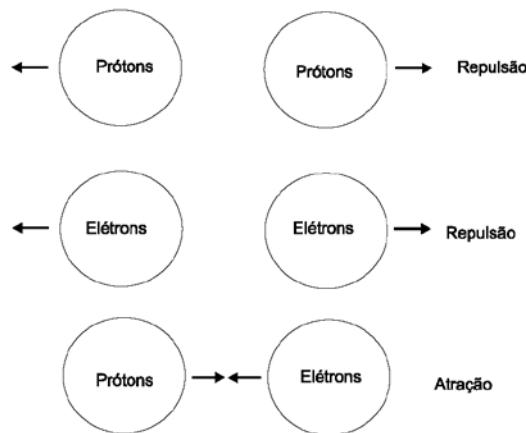


Fig. 3.10 - Atração e repulsão das cargas elétricas

Os físicos, através de várias experiências, mostraram que o valor da carga elétrica de um próton é a mesma de um elétron, havendo apenas diferença no sinal do valor da carga elétrica entre o próton e o elétron. Todos os corpos macroscópicos possuem carga elétrica; no entanto, é impossível perceber-las devido à presença em quantidades iguais dos dois tipos de cargas nos objetos que nos rodeiam, sendo, portanto, eletricamente neutros. Uma pessoa de 70 kg possui aproximadamente 2×10^{29} prótons em equilíbrio com a mesma quantidade de elétrons. Quando há um desequilíbrio elétrico em alguns corpos, por exemplo, com excesso de elétrons, esses corpos podem interagir com outros também com excesso de prótons ou de elétrons.

Quando o âmbar é esfregado com lã de carneiro, o primeiro recebe as cargas elétricas que provêm da lã. Nessa transferência de cargas, o âmbar ficou com cargas elétricas negativas a mais e a lã ficou com falta de elétrons. Quando os corpos ficam eletrizados, apresentam excesso de elétrons (são

ditos com carga negativa) ou falta de elétrons (são ditos com carga positiva). A experiência de Tales de Mileto pode ainda ser reproduzida se você atritar uma caneta de acrílico com uma flanela.

2.2 Quantização da Carga Elétrica

Durante muito tempo, os cientistas acreditaram que a carga elétrica era uma espécie de fluido macroscópicamente contínuo. Só no início do século XX, uma engenhosa experiência realizada por Robert Millikan mostrou que a eletricidade não era contínua e sim que existia um valor mínimo de carga elétrica (e). Sendo assim, todos os corpos, quando eletrizados, possuem uma carga elétrica cujo valor é um múltiplo inteiro de e . Logo, a carga total Q de um corpo é dada por:

$$Q = ne \quad \text{com } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.17)$$

A carga elétrica existe em pacotes discretos ou, dito de outro modo, é “quantizada”, não podendo assumir qualquer valor. A unidade de medida das cargas elétricas no S.I. é o Coulomb. Um Coulomb possui uma carga equivalente a de $6,25 \times 10^{18}$ elétrons (e). Desse modo, a carga elétrica fundamental (e) possui o valor de $1,60 \times 10^{-19}$ Coulomb. O elétron recebeu o valor da carga fundamental, isto é, de $-1,60 \times 10^{-19}$ Coulomb de carga elétrica. O próton recebeu o valor da carga fundamental, ou seja, de $1,60 \times 10^{-19}$ Coulomb de carga elétrica. Se uma pessoa levasse um choque elétrico e ganhasse 10^{20} elétrons, o corpo da pessoa ficaria carregado com -16 C.

2.3 Princípio da Conservação da Carga Elétrica

A massa é uma propriedade intrínseca da matéria, isto é, ela já existe com o corpo. Dizer que a massa se conserva significa que não pode ser destruída nem criada (pelo menos na mecânica de Galileu e Newton, pois na Teoria da Relatividade de Einstein a massa não se conserva em alguns processos envolvendo grandes quantidades de energia), de maneira que a massa total sempre permanece constante. Quando um corpo perde massa, na realidade esta mesma quantidade perdida é transferida para outro corpo. Similarmente, é o que acontece com as cargas elétricas, elas já existem nos corpos, são, portanto, uma propriedade intrínseca da matéria. Quando os corpos são atritados, apenas há uma transferência de carga de um corpo a outro; o âmbar inicialmente neutro perde cargas elétricas para a lã, ficando ambos eletrizados. No entanto, a soma total das cargas permanece constante, isto é, no processo de eletrização as cargas não são criadas nem destruídas. Portanto, se um dos objetos cede certa carga negativa ao outro, ele ficará carregado positivamente, com a mesma quantidade de carga cedida.

Não existe uma justificativa teórica para que a carga se conserve; os resultados experimentais são a única demonstração eficaz que valida este princípio, uma vez que até hoje nunca foi violado. Se houvesse na natureza algum processo físico que violasse continuamente essa lei, mesmo que minimamente, as cargas elétricas criadas em excesso já teriam se manifestado e afetado a evolução do Universo como um todo, visto que as forças elétricas são imensamente maiores que as gravitacionais (cerca de 10⁴⁰ vezes mais intensas!). Isso não parece acontecer, pois observamos que o Universo ainda é controlado em larga escala pela força gravitacional, e, portanto, deve ter sido criado com um mesmo número de cargas positivas e negativas (ou seja, é eletricamente neutro), equilíbrio que permanece ainda hoje.

2.4 O Campo Elétrico

As cargas elétricas alteram fisicamente o seu entorno espacial. A essa alteração dá-se o nome de **campo elétrico**, cujo efeito pode ser observado quando outra carga, chamada de carga de prova, é colocada próxima da primeira. O campo elétrico se assemelha ao campo gravitacional que existe entre os corpos materiais. A principal diferença é que o campo gravitacional é somente atrativo, enquanto que o campo elétrico pode ser repulsivo ou atrativo, em função das cargas se atraírem ou se repelirem. Com o objetivo de indicar a presença de um campo elétrico na região onde se situa a carga, o cientista M. Faraday criou uma representação geométrica denominada **linha de força**. A proposta de Faraday para representar imaginariamente o campo elétrico de uma carga puntiforme isolada foi a de usar linhas radiais. Se a carga criadora do campo elétrico for uma carga negativa, então as linhas de força do campo elétrico são linhas radiais dirigidas para o centro dessa carga, isto é, são linhas convergentes, pois é ao longo dessa direção e com esse sentido que uma carga positiva é atraída. Caso contrário, as linhas de força são linhas radiais saindo da mesma, isto é, são linhas divergentes, como mostrado na figura seguinte.

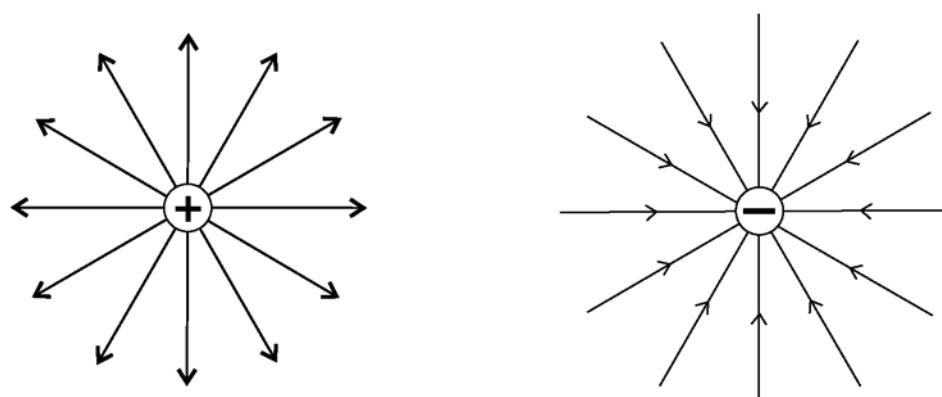


Fig. 3.11 - Linhas de campo elétrico

Observa-se que cargas elétricas funcionam como “fonte” ou “sumidouro” de linhas de campo elétrico, conforme sejam positivas ou negativas, respectivamente, o que vale dizer que as referidas linhas são “abertas”, começando em uma carga positiva e terminando em uma negativa. Isto fica claro de se ver no dipolo elétrico, formado por duas cargas de mesmo módulo e sinais opostos:

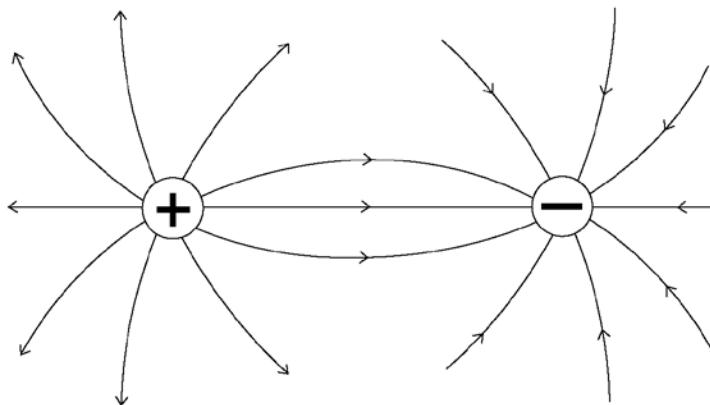


Fig. 3.12 - Linhas de campo elétrico em dipolo elétrico

Para duas placas eletricamente carregadas, uma com distribuição de cargas positivas e outra com distribuição de cargas negativas, as linhas de força de campo elétrico são uniformes.

Onde existe campo elétrico, há um potencial elétrico, que é uma propriedade ligada à capacidade do campo realizar trabalho sobre as cargas, analogamente como ocorre ao potencial do campo gravitacional. A energia potencial gravitacional está associada com a posição que o corpo ocupa e com sua massa. O potencial eletrostático está associado com a quantidade de carga elétrica, assim como a posição da mesma.

2.5 Processos de Eletrização.

Os processos de eletrização ocorrem no nosso cotidiano constantemente sem que percebemos. Eletrização significa transferir cargas entre dois corpos. A terra se comporta como um reservatório de tamanho virtualmente infinito de cargas elétricas; muitas vezes a usamos para transferir o excesso de cargas elétricas que se acumulam nos dispositivos e equipamentos elétricos como: computadores, chuveiros elétricos, lavadoras entre outros. Hoje é bem conhecido e usado este fato nos nossos eletrodomésticos, mas muitos cientistas se preocuparam em fazer diversas experiências, durante muito tempo, em vários tipos de corpos para se chegar à melhor forma de se eletrização corpos.

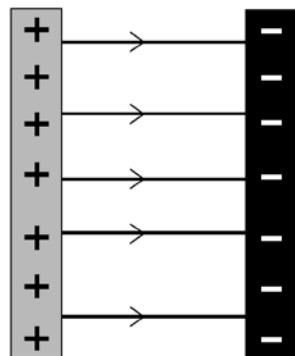


Fig. 3.13 - Linhas de campo elétrico uniforme em placas condutoras carregadas e paralelas

Já vimos que um corpo neutro pode ser eletrizado quando o número de cargas positivas se torna diferente do número de cargas negativas, isto é, quando houver um desequilíbrio de cargas elétricas. Se o número de elétrons é maior que o número de prótons, o corpo ficará eletrizado negativamente; se o número de prótons é maior que o número de elétrons, o corpo ficará eletrizado positivamente. Atualmente, são conhecidas três formas em que se podem eletrizar os corpos.

- **Por atrito:** Esse tipo de eletrização se consegue quando se atritam dois corpos, como fez primeiramente Tales de Mileto. É fácil verificar como acontece este tipo de eletrização: pegue um canudo de refrigerante e atrite com papel higiênico. Os dois corpos ficam carregados com a mesma quantidade de carga, porém com sinais contrários, o que causa a atração entre ambos.
- **Por contato:** Este tipo de eletrização se consegue quando dois ou mais corpos condutores entram em contato, estando pelo menos um deles carregado e os outros neutros. Nesse tipo de eletrização, os corpos ficam carregados com cargas de mesmo sinal havendo uma redistribuição das cargas elétricas na superfície externa dos condutores. Os corpos, inicialmente neutros, adquirem cargas de mesmo sinal do corpo carregado. Pegue uma régua inicialmente carregada e outra régua inicialmente neutra, quando colocadas em contato verifica-se, que a régua neutra adquire a carga de mesmo sinal daquela presente na régua carregada.

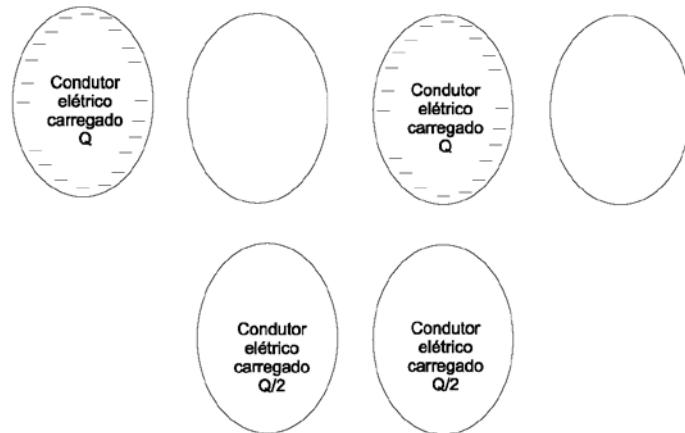


Fig. 3.13 - Eletrização por contato

- **Por indução:** Esse tipo de eletrização se consegue aproximando um corpo que esteja inicialmente eletrizado de um corpo neutro (mesma quantidade de cargas positivas e negativas). Com isso, a configuração das cargas do corpo neutro se modifica de forma que há uma redistribuição das cargas

existentes no seu interior, de forma a restabelecer-se o equilíbrio que havia antes. Ocorre a separação das cargas positivas e negativas do corpo inicialmente neutro. Nele, as cargas de sinal contrário tendem a se aproximar do mesmo lado do corpo que inicialmente se encontrava eletrizado. Porém, as cargas elétricas de sinais contrários tendem a ficar afastadas.

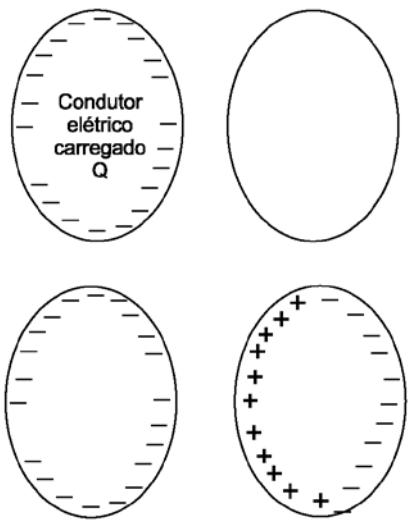


Fig. 3.14 - Eletrização por indução

2.6 Condutores e isolantes

Em alguns corpos, podemos encontrar portadores de cargas elétricas com grande liberdade de movimentação. É o caso dos metais, onde os elétrons das órbitas mais externas dos átomos, chamados de elétrons livres, não permanecem ligados e são facilmente transportados pelo interior do material. Esse tipo de corpo é denominado **condutor elétrico**. Além dos metais, são condutores de eletricidade: a água (contendo íons de H⁺ e OH⁻), o corpo humano, a terra.

Com propriedades contrárias às dos condutores, existem corpos nos quais a movimentação das cargas praticamente não ocorre. Esses corpos são denominados **isolantes** ou **dieletricos**. São isolantes: o vidro, o ar, a borracha, os plásticos, o quartzo.

Condutores e isolantes podem se encontrar na fase sólida, líquida ou gasosa. Tanto os condutores quanto os isolantes podem ser eletrizados; a diferença é que, nos materiais condutores, as cargas elétricas em excesso ficam distribuídas na superfície externa do corpo, pois, como têm grande facilidade de se movimentar nesse tipo de material, tendem a se afastar o máximo que podem uma das outras por repulsão mútua. Já nos corpos isolantes, a carga elétrica em excesso fica exclusivamente distribuída no local onde houve a eletrização, como mostrada na figura ao lado.

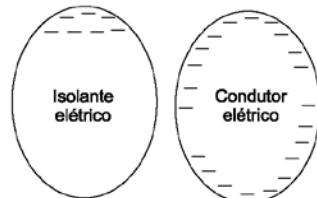


Fig. 3.15 - Distribuição das cargas em excesso num isolante e num condutor.



Atividades de avaliação

1. Sabemos que a carga de um elétron é de $-1,6 \times 10^{-19}$ C. Se uma caneta acrílica foi atritada e perdeu elétrons, ficando carregada $6,0 \times 10^{-5}$ C de cargas positivas, quantos elétrons foram retirados da caneta?
2. O átomo de certo elemento é composto por 4 prótons, 4 nêutrons e 4 elétrons. Determine a carga elétrica total do núcleo deste átomo.
3. Represente as linhas de força do campo elétrico para duas cargas elétricas negativas.

2.7 Lei de Coulomb

O homem sempre teve curiosidade e interesse em tentar dar respostas aos fenômenos elétricos; especificamente houve uma grande preocupação em quantificar a intensidade das forças que aproximavam ou repeliam as cargas elétricas. Muitos defendiam qualitativamente as explicações filosóficas, religiosas e psíquicas. Alguns atribuíam a atração a uma “simpatia” entre os corpos que se atraíam e outros acreditavam que os corpos atraídos serviam de alimentos para o âmbar. Com apenas aspectos qualitativos, os cientistas sabiam que não era possível avançar nos estudos da eletricidade. Todas essas hipóteses foram frustradas porque não conseguiam explicar fenômenos elétricos mais complexos. Alguns físicos perceberam que existiam semelhanças entre a atração elétrica e a atração gravitacional, de modo que muitos deles lançaram hipóteses de que a força elétrica podia variar com o quadrado da distância que separa as cargas.

De todos os trabalhos apresentados na época, o do físico francês Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) foi o que mais se destacou. Ele realizou experiências muito detalhadas e precisas para verificar a hipótese anterior e mediu as forças de atração e repulsão elétrica entre dois corpos carregados eletricamente com o aparelho construído por ele. Com esse aparelho, denominado balança de torção, mediu as forças de atração e de repulsão entre duas esferas carregadas. Após realizar as medidas, Coulomb deduziu a equação matemática que governa esse fenômeno e relaciona as grandezas envolvidas da seguinte forma: a força elétrica de atração ou de repulsão, existente entre duas cargas que interagem eletricamente, é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. Além disso, ele concluiu também que essa força era proporcional ao produto das cargas elétricas que possuem os corpos. A expressão final ficaria:

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (3.18)$$

Nesse caso, k é a constante de proporcionalidade, denominada constante eletrostática, e depende do meio em que as cargas se encontram. No vácuo, essa constante tem o valor de $8,98 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$

Q_1 , Q_2 são as cargas elétricas dos corpos;

r é a distância que separa as cargas.

Atividades de avaliação



- Uma carga de $+3,0 \times 10^{-6} \text{ C}$ se encontra a uma distância de 8 cm de uma segunda carga de $-2,3 \times 10^{-6} \text{ C}$. Calcular a força elétrica que atua sobre cada carga.
- Qual deve ser a distância entre duas cargas $Q_1 = 26 \text{ C}$ e $Q_2 = -47 \text{ C}$ para que a força elétrica entre elas seja de 9,0 N?

2.8 Corrente Elétrica e Diferença de potencial

Já vimos que a carga elétrica é uma grandeza conservada. Se ela “desaparece” de um lugar, é porque ela simplesmente foi para um outro local. A esse deslocamento, ou migração de cargas elétricas, dá-se o nome de **corrente elétrica**. O conceito de corrente é provavelmente familiar. Todos os aparelhos eletrodomésticos funcionam graças à corrente elétrica que circula neles.

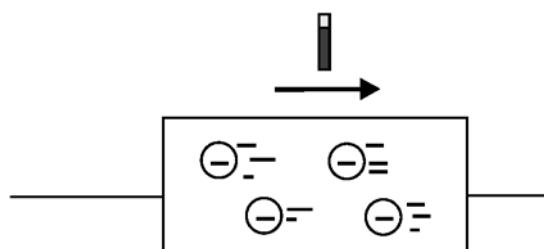


Fig. 3.16 - Corrente elétrica de elétrons

A quantidade de carga elétrica ΔQ , que se movimenta ordenadamente, com sentido preferencial, pela seção reta de um fio condutor e num intervalo de tempo especificado Δt , determina o valor da corrente elétrica. Matematicamente isto pode ser escrito como:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (3.19)$$

A unidade de medida no Sistema Internacional para a corrente elétrica é o Coulomb/segundo e recebe o nome de ampère (A). Contudo muitas vezes, é mais conveniente utilizar os submúltiplos do ampère.

A tabela abaixo descreve os efeitos sobre o corpo humano produzido por diversos valores de corrente.

Corrente (A)	Efeito
1 mA	Pode ser sentida
5 mA	Dor
10 mA	Causa a contração muscular involuntária
70 mA	Pode causar a morte, devido ao coração

Determine o valor da corrente elétrica que atravessa um condutor quando a quantidade de carga elétrica é de 4 C no intervalo de 20 segundos.

Miliampere Ma	10^{-3} A
Microampere Ua	10^{-6} A
Nanoampere Na	10^{-9} A

Um fio de metal, a água e o sangue são exemplos de condutores onde as cargas elétricas se movimentam. O corpo humano é composto por 70 % de água. Portanto, a falta de aterramento nos equipamentos eletrodomésticos permite que as cargas em excesso escoem por nosso corpo até o chão, que funciona como um grande reservatório de cargas elétricas. Como medida de segurança, todas as caixas metálicas dos equipamentos devem estar em contato com o fio terra; desta forma, as cargas escoam pelo caminho que oferece menor resistência, evitando que fluam por nosso corpo.

Quando se dispõe de um condutor eletrizado positivamente, cria-se ao redor deste um campo elétrico. Posicionando-se uma carga positiva perto desse condutor, a carga ganhará velocidade e consequentemente energia cinética, afastando-se do condutor. Do Princípio de Conservação da Energia, se a carga ganhou energia cinética é porque havia armazenada uma energia potencial denominada energia potencial elétrica. A energia potencial elétrica da carga positiva se transformou em energia cinética ao ser repelida pelo condutor. Assim, o condutor produz um campo elétrico. Este é um vetor que pode ser calculado a partir de uma outra grandeza, desta vez escalar, denominada potencial elétrico. No Sistema Internacional a unidade de medida do potencial elétrico recebeu o nome de Volt. O potencial elétrico é a energia potencial armazenada por unidade de carga posicionada no local. Num ponto do campo elétrico, o potencial elétrico é igual a 1 Volt, quando a carga ao ser colocada neste ponto adquire uma energia potencial elétrica de 1 Joule.

O principal fator que provoca o movimento das cargas entre dois pontos é a diferença de potencial existente entre eles. As cargas elétricas se deslocam do potencial elétrico menor ao maior, gerando o movimento ordenado das cargas elétricas e, portanto, uma corrente elétrica.

2.9 Magnetismo

Na mesma época em que se verificou que o âmbar atraía pedaços de palha, observou-se que certas rochas atraíam pedaços de ferro. Durante muito tempo pensou-se que estes dois fenômenos eram similares; entretanto, essas pedras só atraíam pedaços de ferro. Assim, chegou-se à conclusão de que a natureza dessas eram diferentes. Magnetismo foi o termo usado para estudar os fenômenos que estas rochas produziam, provavelmente devido à região da Grécia onde elas se encontravam com maior facilidade, chamada Magnésia.

Determine o valor da corrente elétrica que atravessa um condutor quando a quantidade de carga elétrica é de 4 C no intervalo de 20 segundos.

Foi o físico Hans Christian Oersted que mostrou experimentalmente, já no século XIX, que os fenômenos elétricos e magnéticos têm, na verdade, uma estreita relação. Ele construiu um circuito, como mostrado na figura seguinte, próximo ao qual posicionou uma agulha imantada ou, simplesmente, bússola:

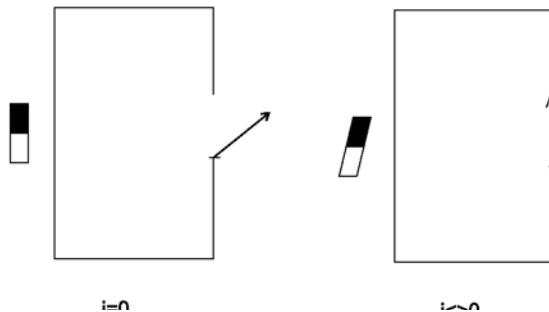


Fig. 3.17 - Experiência de Oersted

Quando a chave do circuito permanece aberta e, portanto, não há cargas elétricas circulando ($i = 0$), a agulha da bússola, que é um ímã, permanece estática e alinhada. Fechando a chave, as cargas começam a circular e a bússola sofre um desvio. Oersted concluiu com esta experiência que a corrente elétrica gera um campo magnético na região do espaço que circunda o fio por onde passa a corrente, campo que interage com a bússola e a desloca de sua posição original.

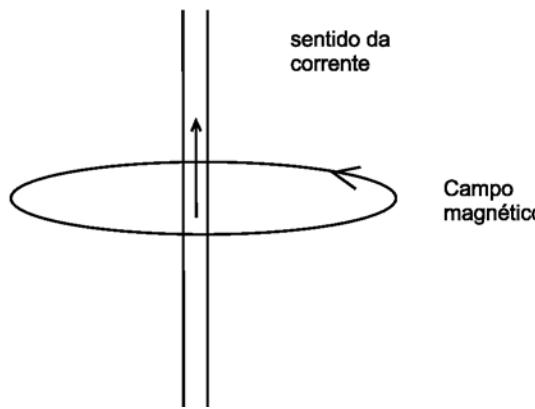


Fig. 3.18 - A corrente elétrica cria um campo magnético ao seu redor

Utilizando-se a linguagem de linhas de força ou de campo criada por Faraday, podemos afirmar que as linhas de campo magnético, diferentemente das linhas de campo elétrico, são linhas fechadas sobre si mesmas, circulando o fio condutor por onde passa a corrente que as gera.

A experiência de Oersted permite explicar como se origina o campo magnético em um ímã. Partindo do modelo clássico do átomo, cada elétron em órbita circular em torno do núcleo comporta-se como uma espira circular

A Terra é um ímã?
Ainda hoje, é discutida a origem do campo magnético da Terra. No interior da Terra existe um núcleo líquido de ferro e de níquel fundido que se encontra em movimento de rotação. O movimento desses metais fundidos origina um campo magnético terrestre.

de corrente que gera um diminuto campo magnético. Se os elétrons do material giram em sentidos diferentes, um movimento compensa o outro e não se visualiza o efeito magnético total, o que acontece com a maioria dos materiais. Os imãs naturais são constituídos basicamente de ferro, e a maioria dos elétrons deste átomo gira no mesmo sentido, gerando um efeito cumulativo que resulta em um campo magnético intenso. Se esses imãs são aquecidos, perdem sua força magnética, porque os átomos se desorganizam, desalinhando a órbita dos elétrons. Um aspecto importante é que os imãs, naturais ou artificiais, apresentam duas polaridades denominadas polo magnético norte e polo magnético sul, que nunca podem ser separados. Se você tentar partir um imã ao meio, vai obter dois imãs com seus dois pólos íntegros.

Os pólos magnéticos se encontram localizados nas extremidades de uma barra magnética. Esses pólos são regiões onde as ações magnéticas são muito intensas. Tais ações são facilmente visualizadas quando limalhas de ferro são distribuídas ao redor de um imã com formato de barra.

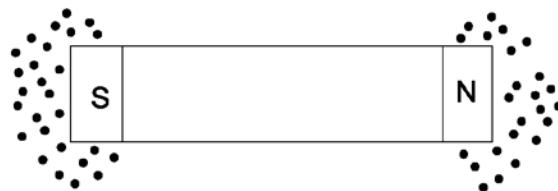


Fig. 3.19 - Representação de imã com limalhas de ferro

É fato conhecido que, quando dois pólos de mesmo nome se aproximam, estes se repelem e, quando dois pólos de nomes diferentes se aproximam, estes se atraem. As linhas do campo magnético têm função semelhante à das linhas de forças do campo elétrico. São usadas para visualizar geometricamente o campo magnético.

Outra importante conexão entre magnetismo e eletricidade foi descoberta por Faraday. Ele pensou em termos de simetria na natureza: se corrente elétrica gera campo magnético, como observou Oersted, então, de algum modo, campo magnético deve gerar corrente elétrica. Ele verificou, de fato, que isto acontece quando imãs são postos em movimento oscilatório em um circuito próximo que esteja desligado. O amperímetro registra uma corrente enquanto o imã é movimentado, a qual é tanto mais intensa quanto mais rapidamente se movimenta o imã.

Faraday também mostrou que, quando um circuito é ligado próximo a outro que esteja desligado, subitamente surge neste último uma corrente que desaparece assim que a corrente se estabiliza no primeiro circuito. Do mesmo

modo, ao se desligar aquele circuito, uma nova e breve corrente, dessa vez invertida, surge no segundo circuito. Assim, Faraday descobriu a sua famosa Lei da Indução:

“Campos magnéticos, variando no tempo em uma região do espaço induzem correntes elétricas em circuitos situados nessa região”.

Esse é o princípio de funcionamento de um gerador elétrico. Qualquer força que movimente o seu rotor, onde estão presos ímãs, fará surgir uma corrente elétrica no circuito que lhe está associado.

Não apenas cargas (estáticas ou em movimento) são fontes dos campos, mas eles próprios também geram campos quando variam no tempo - campo magnético variando gera campo elétrico, e este variando gera o magnético. Isto dá origem às chamadas ondas eletromagnéticas.

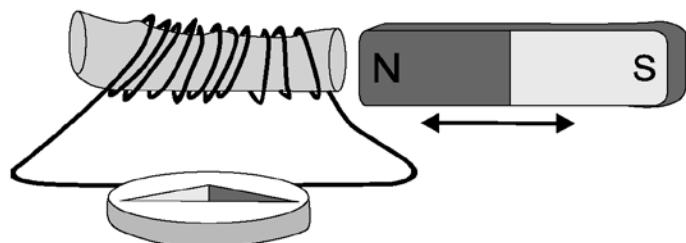


Fig. 3.20 - Experiência de Oersted e de Faraday, combinadas.

2.10 Ondas Eletromagnéticas, Espectro Eletromagnético e a Óptica

Quando as cargas elétricas são aceleradas ou oscilam, os campos elétrico e magnético gerados em suas proximidades passam a variar no tempo. Estes, por sua vez, geram outros campos variáveis em sua vizinhança e assim por diante, de modo que o processo todo é auto-sustentado, formando uma perturbação que se propaga no espaço para longe das cargas à velocidade de aproximadamente 300.000 km/s (no vácuo). Uma vez afastadas da fonte que as gerou, os vetores campo elétrico e magnético tornam-se perpendiculares entre si e oscilam perpendicularmente à direção de propagação da onda formada (vide figura a seguir). A onda eletromagnética também transmite energia e quantidade de movimento. Além disso, ela exerce pressão, embora não tenha massa.

As fontes de ondas eletromagnéticas podem ser naturais, como as provenientes do Sol e da Terra e/ou devidas a processos de desintegrações radioativas. Podem ser também artificiais, como as do radar e do laser, ou da lâmpada que ilumina o seu quarto. Em geral, toda substância com temperatura superior à do zero absoluto, isto é, 0 K ou 273,15°C abaixo de zero, emitem ondas eletromagnéticas (vide unidade 4).

A primeira previsão da existência de ondas eletromagnéticas foi feita em 1864 pelo físico escocês James Clerk Maxwell. Ele conseguiu provar teoricamente que uma perturbação eletromagnética devia se propagar no vácuo com uma velocidade igual à da luz.

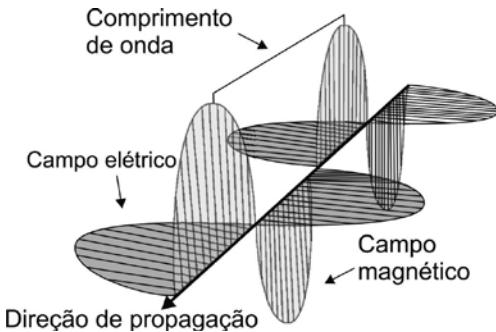


Fig. 3.21 - Onda eletromagnética

A onda eletromagnética, como qualquer outra onda, é caracterizada por diversos parâmetros físicos, tais como:

Comprimento de onda (λ)

Frequência de oscilação (f)

Velocidade de propagação da onda (v)

Uma onda periódica consiste em uma sequência contínua de vales e cristas. Chama-se comprimento da onda (λ) a distância entre dois vales (ou cristas) consecutivos. Frequência da oscilação é a taxa de oscilação da onda, é medida em ciclos por segundo ou hertz. A relação entre estas duas grandezas determina a velocidade da onda.

$$v = \lambda \cdot f \quad (3.20)$$

Uma estação de rádio emite ondas eletromagnéticas com frequência de 100.000 ciclos por segundo. Calcule o comprimento das ondas.

Todas as ondas eletromagnéticas são idênticas, ou seja, formadas por campos elétricos e magnéticos oscilantes e apresentam comportamento similar quando refletidas, transmitidas, absorvidas, refratadas e difratadas pelas superfícies. A seguir é apresentada na tabela a distribuição da intensidade da radiação eletromagnética com relação ao seu comprimento de onda ou a frequência cuja representação é denominada **espectro eletromagnético**.

Região do espectro	Intervalo de frequências (Hz)
Radio-micro-ondas	0-3,0x10 ¹²
Infravermelho	3,0x10 ¹² -4,6x10 ¹⁴
Luz visível	4,6x10 ¹⁴ -7,5x10 ¹⁴
Ultravioleta	7,5x10 ¹⁴ -6,0x10 ¹⁶
Raios X	6,0x10 ¹⁶ -1,0x10 ²⁰
Radiação gama	1,0x10 ²⁰ -....

A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo assume o mesmo valor constante, independente do tipo de onda. Ela é invariavelmente representada pela letra c (do latim celeras, veloz): $c = 300.000 \text{ km/s}$.

O Eletromagnetismo propiciou uma grande unificação entre áreas de estudo aparentemente desvinculadas entre si, daí o seu grande poder explicativo: a Eletricidade, o Magnetismo e a Óptica. Esta nada mais é do que o estudo dos fenômenos envolvendo a propagação da luz, que é uma onda eletromagnética, e sua interação com a matéria (como nos fenômenos de reflexão, refração e difração).

Pesquise e dissente sobre a experiência da dupla fenda realizada por Thomas Young, no início do séc. XIX, que demonstrou o caráter ondulatório da luz. Cite três exemplos de ondas eletromagnéticas.

4

Parte

Da Relatividade Einsteiniana à Mecânica Quântica

Objetivos:

- Compreender os Postulados da Teoria da Relatividade Especial de Einstein e seu impacto no nosso entendimento a respeito de espaço, tempo matéria e energia. Compreender algumas das idéias subjacentes à Teoria da Relatividade Geral e a reformulação que ela trouxe para o conceito da interação gravitacional. Finalmente, compreender fatos e idéias que revolucionaram a Física do Século XX referentes ao nosso entendimento do mundo microscópico.

I

Capítulo

As Teorias da Relatividade de Einstein

Introdução

Começaremos estudando neste capítulo as Teorias da Relatividade de Albert Einstein, onde os conceitos de espaço, tempo, matéria e energia, bem como as leis mecânicas que os interrelacionam, são revistos e modificados para que o princípio da Relatividade de Galileu, pelo qual a descrição física dos fenômenos não deve depender do referencial, seja ampliado para acomodar os fenômenos eletromagnéticos. Essas teorias são divididas em: Relatividade Restrita, que envolve somente Sistemas Iniciais de Coordenadas e Relatividade Geral, que envolve Sistemas Gerais de Coordenadas. Nesta última, a gravitação é compreendida como deformações na geometria do espaço-tempo. Em seguida, estudaremos a Teoria Quântica da Matéria, que representa uma novíssima formulação das leis da natureza para descrever adequadamente os fenômenos na escala molecular, atômica e subatômica.

1.1 O Princípio da Relatividade de Galileu

Galileu foi, talvez, o primeiro a investigar por meio de experimentos controlados, a partir da realização de medidas tão precisas quanto a tosca tecnologia da época permitia fazê-lo, o movimento dos corpos sobre a superfície da Terra, de modo a sistematizar o seu estudo matematicamente e chegar a resultados inequívocos a respeito do comportamento cinemático dos corpos terrestres, tal como já fora feito por Johannes Kepler acerca do movimento dos planetas no céu.

Um dos resultados encontrados pelo cientista italiano foi a possibilidade de se fazer a composição de movimentos independentes em diferentes direções do espaço, incluindo-se aí o movimento do próprio observador. Assim, o piloto de um avião voando horizontalmente (em movimento retilíneo uniforme), ao olhar diretamente para baixo, verá uma bomba deixada cair de dentro da aeronave seguir uma trajetória vertical (em movimento retilíneo uniformemente variado), enquanto que alguém em repouso no solo verá o artefato bélico

O movimento circular uniforme, em que uma partícula gira com velocidade angular constante em torno de um centro, é um outro exemplo de composição de movimentos. Tal movimento pode ser visto como a superposição de dois movimentos harmônicos simples (oscilatórios) ao longo de duas retas perpendiculares entre si.

Referenciais inerciais são sistemas geométricos que permitem a localização de pontos materiais no espaço por meio de medidas de distâncias, ao longo de eixos coordenados, em relação a uma origem fixa, prévia e arbitrariamente estabelecida. A esses sistemas também se associa um relógio para a cronometragem de instantes de tempo. Tais sistemas podem se deslocar ao longo de uma reta e com velocidade constante uns em relação aos outros. Enfim, são referenciais onde é válido o Princípio da Inércia.

Forças de Coriolis
Uma das consequências de vivermos em um referencial não-inercial, isto é, nosso próprio planeta que gira em torno do eixo que passa pelos seus pólos, são as chamadas (pseudo) forças de Coriolis, em homenagem ao cientista que as estudou primeiramente. Essas forças fazem com que grandes massas de ar, movimentando-se em direção ao pólo sul, por exemplo, sejam desviadas para o leste, e as que se dirigem ao pólo norte, desviadas para o oeste. Assim, os furacões no hemisfério norte giram em um sentido, e no hemisfério sul, no sentido oposto.

descrever uma curva em forma de parábola, resultante da composição do movimento horizontal retilíneo e uniforme do avião com o movimento vertical retilíneo uniformemente variado decorrente da aceleração que a gravidade terrestre impõe ao objeto.

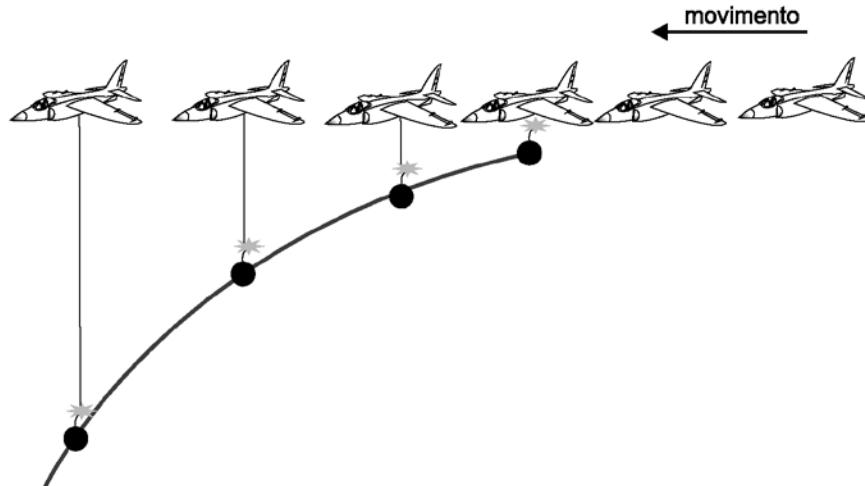


Fig. 4.1 - Trajetória de uma bomba lançada por um avião

Dessa forma, verificamos que a trajetória de uma partícula muda conforme o referencial, uma vez que ela é traçada a partir da posição e da velocidade que a partícula possui em cada instante de tempo, e essas grandezas se alteram de acordo com o ponto de vista assumido pelo observador. Entretanto, as causas físicas das trajetórias – as forças – não devem depender desse observador. No exemplo acima, tanto o piloto do avião quanto o homem no solo sentem da mesma maneira o peso dos corpos, ou seja, percebem igualmente a Terra puxando-os para seu centro. A força da gravidade é a mesma que faz cair a bomba, não importando se retilineamente, como observado pelo piloto, ou de forma parabólica, como percebido pelo observador terrestre.

Cabe assinalar que a afirmação acima não é inteiramente precisa. Os observadores só perceberão a mesma força se cada um estiver posicionado em um referencial dito inercial.

Se o mencionado piloto estiver acelerando a aeronave, ele vai sentir um empurrão contra o encosto da cadeira onde está sentado, isto é, sentirá uma **força não-inercial** ou **pseudo-força** nele agindo, a qual não é sentida pelo observador em terra. Esses efeitos são assim chamados porque não estão associados com interações devidas a outros corpos materiais, que são as “fontes” legítimas das forças. Assim, o piloto verá a bomba seguir uma trajetória que poderá interpretar como sendo causada pela ação de duas forças atuando conjuntamente, observação totalmente discrepante da outra feita a partir do solo.

Portanto, para efetuarmos comparações entre os diversos referenciais existentes e estabelecermos leis físicas válidas para todos eles, temos de restringir o tipo de movimento que esses referenciais podem seguir, de modo que estamos aptos a enunciar o Princípio de Relatividade de Galileu:

“As leis da mecânica são as mesmas, isto é, têm a mesma forma em todos os referenciais inerciais.”

Dito de outro modo, não é possível montar experimentos mecânicos que nos permitam distinguir se permanecemos em repouso ou em movimento retilíneo uniforme. Se você está dormindo em um avião estacionado no aeroporto (já com os motores acionados) e só acordar quando ele estiver voando suavemente em velocidade e altitude de cruzeiro, não haverá nenhum modo de saber se ainda está em terra, a menos que olhe pela janela. Um pêndulo oscilará da mesma maneira nas duas situações, o que é compatível com o fato de que o tempo é uma entidade que flui de igual modo nesses referenciais, uma vez que tal objeto é comumente usado para marcações de tempo.

1.2 O Princípio da Relatividade de Einstein

Tudo estaria resolvido se as únicas leis naturais que existissem fossem mecânicas, isto é, alusivas à relação entre o movimento e suas causas físicas. Sabemos, entretanto, que, além das leis do movimento, existem aquelas que definem essas próprias causas – as forças atuantes entre as partículas. Por exemplo, a Lei da Gravitação Universal, que estudamos na unidade 2, descreve uma grande classe de interações que ocorrem entre todos os pares de partículas materiais existentes no Universo, de natureza exclusivamente atrativa. Como a forma matemática dessa interação depende unicamente das massas das partículas e da distância entre elas, tal forma não deve ser modificada, caso passemos de um referencial em repouso para outro animado com velocidade constante em relação ao primeiro, uma vez que a massa e os intervalos de tempo e espaço não são afetados na Relatividade Galileana. Ou seja, o tempo e o espaço, como Newton colocou de forma explícita em seus Principia, são entes **absolutos**.

Também estudamos na unidade 3 que existem as interações de natureza eletromagnética, devidas à atuação das partículas com carga elétrica umas sobre as outras. Desde quando James C. Maxwell demonstrou, a partir das leis da eletricidade e do magnetismo, que a luz pode ser vista como uma perturbação oscilatória eletromagnética propagando-se no espaço vazio com uma velocidade de aproximadamente 300.000 km/s, cientistas começaram a

Os referenciais inerciais e as leis de Newton:
Como consequência do Princípio da Relatividade de Galileu, os referenciais inerciais são aqueles em que as leis do movimento assumem a sua forma mais simples, forma essa que corresponde exatamente às três leis formuladas por Isaac Newton.

se perguntar em relação a que referencial essa velocidade era válida. A idéia de que existia um sutil meio material – o **éter** – sustentando essas perturbações, exatamente como o ar atmosférico sustenta as ondas sonoras, tinha muitos adeptos.

Esse suposto e estranho meio material que encheria todo o Universo estaria identificado com o espaço absoluto newtoniano, e constituiria o referencial privilegiado em relação ao qual a velocidade da luz seria medida. Apesar do éter não ser percebido por nossos sentidos, vários experimentos foram realizados para detectá-lo, com resultados negativos.

O mais famoso é o experimento de Michelson-Morley, em que esses dois cientistas tentaram medir alterações na velocidade da luz usando a recém inventada técnica de interferometria óptica. Sobre uma mesa que podia ser girada, dois raios luminosos foram enviados em sentidos opostos ao do movimento de translação da Terra em torno do Sol, e depois recombinados por meio de reflexões em espelhos. Analisava-se, então, o padrão de interferência gerado. Imaginava-se que deveria acontecer o mesmo que ocorre com as ondas sonoras. Neste caso, se uma fonte (o motor de um carro, por exemplo) emite-as estando em movimento com velocidade v_f em relação ao ar, a velocidade do som que se propaga adiante do emissor, medida por este como sendo v_s' , é menor do que a do som (aproximadamente 340 m/s) medida pelo observador no solo v_s :

$$v_s' = v_s - v_f, \quad (4.1)$$

enquanto que a onda que se propaga para a sua retaguarda, terá velocidade medida pelo emissor como sendo

$$v_s' = v_s + v_f,$$

exatamente porque, no primeiro caso, ele “persegue” a onda sonora, e no segundo, afasta-se da mesma. Como resultado, as frentes de onda que vão adiante do automóvel são comprimidasumas contra as outras, de modo que a distância entre elas (comprimento da onda sonora) diminui e a sua freqüência aumenta. Um observador em repouso que vê o carro se aproximando escutará o som do motor mais agudo, e, vice-versa, ao ver o carro se afastando, ouvirá um som mais grave, pois as ondas são alongadas à medida que o veículo se afasta. Nas corridas de fórmula 1 exibidas pela TV, essas mudanças nos sons emitidos pelos motores são bem característicos e fáceis de perceber, devido à alta velocidade dos carros. Tal efeito, representado pela alteração da freqüência do som emitido por fontes em movimento, é chamado de **efeito Doppler**, em homenagem ao cientista que o estudou.

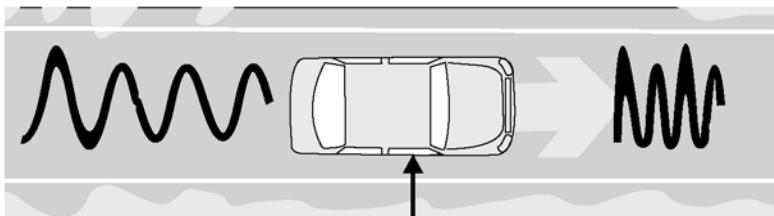
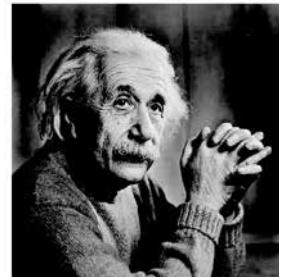


Fig. 4.2 - Carro em movimento emitindo ondas sonoras



Albert Einstein
(1876-1955)

Comportamento semelhante se esperaria das ondas luminosas. O experimento mencionado deveria registrar velocidades diferentes para os dois sentidos de propagação dos raios de luz. Não foi o que aconteceu. As velocidades obtidas foram rigorosamente as mesmas. Era como se a Terra não estivesse em movimento em relação ao éter. Sabemos, evidentemente, que nosso planeta executa um movimento de translação em torno do Sol. Outras explicações para esse resultado negativo foram dadas, do tipo que a Terra arrastava o éter consigo no seu movimento de translação, mais ou menos como um automóvel fechado correndo na estrada leva consigo o ar que está no seu interior. Nenhuma dessas explicações pareceu satisfatória.

No ano de 1905, um jovem de 26 anos e funcionário de um escritório de registro de patentes localizado na cidade suíça de Berna, em suas horas vagas dedicadas aos estudos de Física, resolveu adotar uma atitude aparentemente mais cômoda em relação à idéia do éter: simplesmente considerar que ele não existia. O nome do jovem? Albert Einstein. Ele questionou que, se ninguém havia conseguido detectar o éter, apesar dos inúmeros esforços, para quê insistir em sua busca? Bastava ignorá-lo. Solução simples, mas de consequências avassaladoras para a Física.

No artigo científico escrito naquele ano miraculoso (quando ele redigiu e publicou outros quatro artigos revolucionários, incluindo aquele que lhe daria o prêmio Nobel em 1921 sobre o efeito fotoelétrico), intitulado “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento”, Einstein considerou que se uma onda eletromagnética propaga-se no vácuo com a velocidade da luz - e essa é uma consequência direta das leis da Eletricidade e do Magnetismo, tal como formuladas por Maxwell - então tais leis devem ter um caráter absoluto, isto é, não devem depender do referencial inercial escolhido para sua observação, no mesmo sentido em que, para Galileu, as Leis da Mecânica também eram **invariantes**.

Einstein via nas leis do eletromagnetismo aspectos fundamentais, mais ainda do que nas leis da Mecânica, pois aquelas eram capazes de explicar uma quantidade expressiva de fenômenos, inclusive ópticos, por meio de poucos princípios e leis estabelecidas experimentalmente, codificadas em uma

Pesquise e disserte sobre as outras contribuições de Albert Einstein, além das teorias da relatividade e da teoria do efeito fotoelétrico, para a Física. Promova uma discussão com seus colegas a respeito de qual de suas descobertas teria sido a mais importante.

poderosa linguagem matemática por James C. Maxwell, quando elaborou suas famosas quatro equações. Portanto esse conjunto de leis, para Einstein, era dotado de uma sólida consistência teórico-experimental que o fez acreditar no seu caráter absoluto, isto é, na independência de sua forma com relação aos diversos referenciais inerciais.

O parâmetro “velocidade da luz”, que emerge naturalmente das equações que representam as leis do Eletromagnetismo, deve ser, portanto, independente do observador que o mede, não havendo um referencial “privilegiado” em relação ao qual a mencionada velocidade é avaliada (ligado ao éter ou ao espaço absoluto newtoniano). Assim, Einstein alargou o Princípio da Relatividade de Galileu, de modo a incluir as leis que descrevem os fenômenos eletromagnéticos. A invariância da velocidade da luz parece ser uma consequência lógica desse princípio, mas Einstein preferiu enunciá-la como um postulado à parte, e o grandioso edifício da **Teoria da Relatividade Restrita** foi então erigido. É curioso que, no início, Einstein não concordava muito com o nome dessa teoria, preferindo referir-se a ela como Teoria dos Absolutos, mas esse nome não “pegou”. Enfim, seus postulados são:

- 1) **As leis da Física (Eletromagnetismo e Mecânica) são as mesmas, isto é, têm a mesma forma para observadores que se desloquem em linha reta com velocidade constante uns em relação aos outros.**
- 2) **A velocidade da luz medida no vácuo tem o mesmo valor para qualquer um desses observadores.**

Cabe frisar que a invariância da velocidade da luz, como afirmada no segundo postulado da Relatividade Restrita, implica necessariamente que ela é a **máxima velocidade permitida na natureza**, isto é, nenhuma partícula ou informação pode se deslocar com uma velocidade superior à velocidade da luz medida no vácuo. Assinalamos aqui mais uma diferença em relação aos preceitos da Mecânica de Galileu e Newton, na qual todas as velocidades são permitidas, inclusive as de valor infinito, responsáveis em última análise pela interação instantânea existente na teoria de ação à distância da força gravitacional, por exemplo.

1.3 A Cinemática Relativística

Com o objetivo de abrigar o Eletromagnetismo no Princípio da Relatividade, entretanto, drásticas mudanças tiveram de ser introduzidas na estrutura conceitual e formal da Ciência Mecânica. O fato de existir uma velocidade absoluta na natureza (a velocidade da luz) já é um indicador de que a Cinemática, por exemplo, deve ser profundamente reformulada. A fim de que aquela velocidade seja considerada independente do referencial escolhido, intervalos

Radiação de Cherenkov
Sabemos que a velocidade da luz no vácuo é a máxima velocidade permitida na natureza. Mas em meios materiais isolantes, partículas carregadas podem eventualmente ultrapassar a velocidade da luz medida naquele meio, e quando o fazem, emitem uma intensa radiação eletromagnética, chamada de radiação Cherenkov, em homenagem ao físico russo que a caracterizou, fenômeno análogo ao que ocorre com um avião supersônico ao ultrapassar a barreira do som, quando se ouve uma forte explosão.

de espaço e de tempo têm de se modificar de tal modo que sua razão permaneça constante, ao se passar de um referencial inercial para outro. Isto é totalmente inconcebível no âmbito da Cinemática de Galileu-Newton, uma vez que nela o tempo e o espaço são absolutos, e, portanto, seus intervalos não podem mudar de acordo com o referencial.

A **relatividade do tempo**, por exemplo, fica patente quando se analisa em detalhe o conceito de **simultaneidade**. Dois eventos A e B são considerados simultâneos quando ocorrem em pontos diferentes do espaço e em um mesmo instante de tempo, quando este é medido em relação a um dado referencial. Um observador situado em outro referencial inercial poderá, contudo, verificar que o evento A, por exemplo, ocorre **antes** do evento B. Isso se passa devido ao fato de a velocidade da luz ser a mesma para ambos os referenciais, de acordo com o segundo postulado, de modo que o registro desses eventos por parte do segundo observador se dará em instantes de tempo diferentes. Com efeito, este observador se desloca com determinada velocidade em relação ao primeiro, e, assim, os raios de luz que partem de cada um dos eventos levarão tempos diferentes para chegar aos seus olhos ou detectores. Evidentemente que essa relatividade da simultaneidade não existe na Mecânica de Galileu-Newton.

Outra consequência do caráter não absoluto do tempo para as leis da Cinemática relativística é que dois eventos ocorridos em um mesmo ponto do espaço e em instantes de tempo diferentes, relativamente a um referencial, ocorrerão em pontos distintos, conforme assinalados em outros referenciais inerciais. Até aí, tudo bem, isso também se dá na Mecânica de Galileu-Newton. Iniciamos e terminamos nosso almoço no mesmo lugar do vagão-restaurante de um trem em movimento, mas, para alguém do lado de fora, situado na plataforma da estação, esses momentos ocorrerão em lugares diferentes, uma vez que estamos nos deslocando com determinada velocidade.

A questão é que a **duração** do almoço terá medidas diferentes de acordo com cada observador, situados no trem e na plataforma. O observador na estação medirá um tempo de refeição **maior** do que aquele marcado em nossos relógios, tempo este designado por intervalo de **tempo próprio**. Esse é o chamado fenômeno da **dilatação temporal**, e não há análogo na teoria clássica da Mecânica formulada a partir de Galileu e Newton. Ou seja, na Relatividade de Einstein o tempo flui de forma diferente para distintos observadores que se desloquem relativamente uns aos outros com velocidade constante. Podemos dizer, assim, que não existe um tempo universal, que seja válido para todos os referenciais inerciais e seus observadores.



Fig. 4.3 - A relatividade do tempo e o quadro “A Persistência da Memória”, de Salvador Dalí

Algo semelhante se dá com as medidas de comprimento, que passam a ter valores diferentes de acordo com o referencial inercial em que se fazem essas medidas. Uma barra de metal, por exemplo, terá um comprimento **máximo** em relação a um observador para o qual o objeto está em repouso, chamado de **comprimento próprio**. Outros observadores, deslocando-se sempre retilíneamente com velocidade constante, verificarão que a barra em movimento apresenta um comprimento **reduzido** quando comparado ao seu comprimento próprio. Esse fenômeno é genericamente designado por **contração espacial**.

É importante assinalar que, tanto o efeito da dilatação temporal, como o da contração espacial, só são relevantes quando as velocidades envolvidas são altas, comparáveis à velocidade da luz. Para o mundo de baixas velocidades onde vivemos, a Mecânica de Galileu-Newton constitui uma excelente aproximação.

Como vimos, espaço e tempo deixam de ser estruturas absolutas para dependerem do ponto de vista do observador, compartilhando de uma mesma natureza relativa. Uma vez que a velocidade da luz é um parâmetro cuja medida independe do referencial, podemos usá-la como fator para transformar intervalos de tempo em distâncias espaciais. Nesse sentido, o tempo pode ser interpretado como a quarta dimensão do espaço. Sabemos de nossa experiência cotidiana que o espaço em que nos locomovemos possui comprimento, altura e largura. Agregando-se o tempo (multiplicado pela velocidade da luz), teremos uma estrutura quadridimensional denominada de **continuo espaço-tempo**, descrito pela primeira vez em 1906 por Hermann Minkowski, ex-professor de Einstein. Tal estrutura evidentemente não pode ser visualizada, apenas intuída e descrita matematicamente. Nesse novo e mais amplo espa-

ço, as distâncias são redefinidas, de modo a não dependerem mais do observador e seu referencial. As trajetórias seguidas pelas partículas materiais em tal espaço abstrato são chamadas de **linhas-mundo**, e suas formas também **não dependem** do referencial inercial em que são traçadas. E esse aspecto diverge bastante daquele estudado na Cinemática de Galileu-Newton, em que as trajetórias das partículas no espaço tridimensional ordinário dependem consideravelmente do referencial em que são analisadas.

Podemos, pelas razões acima expostas, afirmar que o conceito de espaço-tempo resgata a qualidade de absoluto invocado por Newton para o espaço ordinário.

A Relatividade Restrita e os Corpos Rígidos: É interessante verificar que o conceito de corpo rígido desaparece completamente do âmbito da Relatividade Restrita. Nem mesmo em princípio ele pode existir. Com efeito, imaginemos uma gigantesca nave estelar, medindo um ano-luz de comprimento, formada do metal mais duro que se possa imaginar, deslocando-se com grande velocidade (em relação à Terra), e que, de repente, colide sua dianteira com um asteróide massivo e de enormes proporções. Os passageiros e tripulantes da parte de trás da nave não sentirão absolutamente nada, e continuarão se deslocando tranquilamente com a mesma velocidade de antes até o sinal da colisão (e a trágica deformação correspondente) atingi-los, pelo menos um ano depois, pois sabemos que nada, nem objeto material nem informação, pode se deslocar com velocidade superior à da luz. É como se a nave fosse, paradoxalmente, feita do material mais flexível existente no Universo...

1.4 A Dinâmica Relativística

A profunda mudança introduzida pela Relatividade de Einstein nas idéias de espaço e de tempo trouxe naturalmente a necessidade de se modificar os conceitos a partir dos quais se estabelecem as leis da dinâmica. Assim, por exemplo, o conceito de quantidade de movimento, cuja taxa de variação com o tempo nos fornece o conceito de força, também teve de se ajustar ao fato de que nada pode se deslocar com velocidades superiores à da luz no vácuo. Assim, à medida que uma partícula aproxima-se da velocidade da luz, mais difícil se torna imprimir aceleração à mesma, isto é, mais problemático torna-se aumentar a sua quantidade de movimento, uma vez que ela está chegando cada vez mais próximo daquela “barreira” natural de velocidades. Isso significa simplesmente que sua quantidade de movimento cresce com a velocidade a uma taxa menor do que ocorre na Mecânica de Galileu-Newton, já que a partícula oferece uma “resistência” cada vez maior em ser acelerada.

Em outros termos, se fornecermos energia à partícula a fim de que ela ganhe velocidade ou “energia cinética”, nem toda essa energia será convertida em energia de movimento, e menos ainda quanto mais próximo ela estiver da velocidade da luz. O que acontece, então, supondo que não há perdas, com essa diferença de energia, isto é, a diferença entre a energia fornecida e a energia cinética efetivamente ganha pela partícula? Einstein pôde mostrar que de alguma forma essa energia é convertida em **massa inercial**. Nada mais lógico, pois se a “resistência” da partícula em modificar a sua velocidade aumenta quando se aproxima da velocidade da luz, é natural pensar que há um ganho de massa correspondente. Foi assim que Einstein mostrou que existe equivalência entre massa (m) e energia (E), a partir da sua famosa relação

$$E = mc^2, \quad (4.3)$$

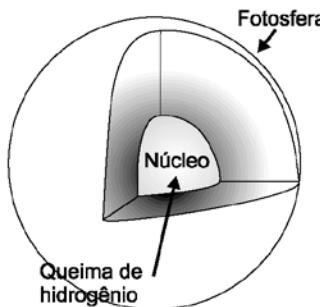
onde a velocidade da luz ao quadrado (c^2) funciona como um fator de conversão entre essas duas grandezas físicas.

Mesmo uma partícula em repouso, em um dado referencial, terá um conteúdo energético associado à sua massa, e poderíamos afirmar que a relação acima expressa a energia E de que devemos dispor para “criar” uma partícula de massa m , e vice-versa, representa também a quantidade de energia que ganhariam os ao “aniquilar” essa partícula. Processos de criação e aniquilação de partículas subatômicas acontecem a todo o momento na Natureza. A nossa estrela, o Sol, por exemplo, é um fantástico reator no qual massa é convertida em energia o tempo inteiro - cerca de 4 milhões e meia de toneladas de matéria se transformam em energia pura por segundo! - permitindo que a Terra seja banhada permanentemente com luz e calor, propiciando a manutenção, por centenas de milhões de anos, da extrema e complexa variedade de vida existente em nosso planeta.

As estrelas, em geral, brilham pelo mecanismo denominado **fusão termonuclear**. Núcleos de átomos leves, de espécies diferentes, devido às altas temperaturas reinantes nos interiores estelares, fundem-se para formar núcleos de átomos de uma nova espécie e de maior peso atômico.

No caso do Sol, a reação de fusão predominante é, de forma resumida, a de dois núcleos de hidrogênio (prótons) – substância que forma 70% da matéria solar – juntando-se a dois nêutrons para formar um núcleo de hélio (vide figura abaixo). Quando o Sol atingir outra etapa de sua vida estelar, daqui a alguns bilhões de anos, na qual começará a haver escassez de hidrogênio, dar-se-á início à fusão de núcleos de hélio para a formação de núcleos de car-

Calcule o conteúdo energético em um grama de massa



bono. Podemos afirmar que o carbono que existe em nossos corpos, bem como no de outros seres vivos, foi “cozinhado” no interior das estrelas.

De um modo geral, constata-se que a soma das massas das partículas e/ou núcleos antes da reação de fusão é sempre **maior** que a massa do novo núcleo formado. Assim, a massa que falta é totalmente convertida em energia (na forma de radiação eletromagnética, por exemplo,

que é liberada através da fotosfera estelar).

1.5 A Teoria da Relatividade Geral

Para compreender como as estrelas de grande massa brilham, é necessário entender a dinâmica dos processos de conversão de massa em energia, como nos ensina a Teoria da Relatividade Restrita. Para compreender, entretanto, como a estrela mantém-se coesa e não “explode” (pelo menos durante a maior parte de sua vida estelar) devido às vastas quantidades de energia violentamente geradas em tais processos, necessitamos recorrer a outra teoria formulada por Einstein, publicada cerca de dez anos depois da primeira: a **Teoria da Relatividade Geral**.

Essa teoria lida essencialmente com a interação gravitacional, que é o mecanismo pelo qual as referidas estrelas mantêm a coesão de sua estrutura física, impedindo que se despedacem em consequência da enorme pressão da radiação gerada em seus interiores. Einstein já havia conciliado o eletromagnetismo com o Princípio da Relatividade, e procurou fazer o mesmo com a gravitação. Inicialmente, deparou-se com sérias dificuldades, uma vez que, segundo a física de Newton, a força gravitacional entre dois corpos massivos parecia ser instantânea, isto é, se um dos corpos “desaparecesse”, o outro deixaria de sentir a força atrativa no mesmo momento. E isso é incompatível com o fato de que toda e qualquer informação na Natureza viaja com velocidade inferior à da luz, conforme afirma o segundo postulado.

O pensamento de Einstein a respeito da gravitação começou com a análise de um fato que havia sido percebido e testado, já no século XVII, por Galileu Galilei, no seu legendário experimento da Torre de Pisa, do alto da qual abandonou simultaneamente dois objetos de pesos diferentes que chegaram ao solo no mesmo instante. Esse experimento foi repetido sucessivamente em outros locais e por outros cientistas, com níveis crescentes de precisão, durante os quase trezentos anos seguintes, invariavelmente confirmando que os corpos caem com a mesma aceleração, independente de suas massas e constituições internas. Esse aspecto sempre foi encarado como um fato pura-

Temperaturas estelares: as temperaturas existentes nos interiores das estrelas são da ordem de alguns milhões de graus Celsius, podendo chegar até centenas de milhões de graus, dependendo da massa da estrela. Essas temperaturas elevadas fazem com que os átomos fiquem completamente ionizados, isto é, elétrons, prótons e nêutrons estão misturados sem se combinar eletricamente, formando uma espécie de “sopa” de partículas chamada de plasma, que é considerado o quarto estado da matéria. Essas altas temperaturas também fornecem a energia cinética necessária para que tais partículas ou núcleos, durante as reações de fusão, vençam a forte repulsão eletrostática que existe entre eles, quando se aproximam um do outro, para então formarem uma estrutura estável, um novo núcleo, mantido coeso pelas interações nucleares.

Princípio da Equivalência:

Se um foguete no espaço distante, longe de qualquer influência física externa, estiver acelerado exatamente à taxa de $9,8 \text{ m/s}^2$, os tripulantes se sentirão empurrados contra o piso do foguete e os objetos abandonados em seu interior, devido à sua inércia, irão ao encontro desse piso com a referida aceleração. Se os ocupantes não souberem que estão dentro de um foguete, pensarão que estão na superfície de nosso planeta (vide figura). O referido princípio nos diz, portanto, que não há como realizar nenhum experimento físico que nos permita distinguir se estamos em um campo gravitacional real ou em um referencial acelerado. Dito de outra maneira, todos os fenômenos que ocorrem numa situação, necessariamente ocorrerão na outra.

mente experimental, um dado da Natureza, mas Einstein não se conformava com isso – ele queria entender o porquê de tal fato – e algo lhe dizia que era a chave para a compreensão plena dos fenômenos gravitacionais, a fuga do hypothesis non fingo, de Newton.

Se a queda ou o movimento orbital dos objetos materiais, isto é, a ação que sofrem devido ao campo gravitacional, não depende das propriedades físico-químicas desses objetos, ou mais geralmente, de suas características intrínsecas, então de alguma forma o espaço, o local onde se situam, “guia” os objetos em suas trajetórias. O problema é que o espaço é um conceito abstrato e puramente relativo, como já vimos ao estudarmos a Teoria da Relatividade Restrita, isto é, não existe um espaço absoluto como pensava Newton. Como atribuir, então, efeitos físicos – o movimento dos corpos sujeitos à gravidade – a uma entidade que aparentemente não é real?

Na relatividade Restrita, o espaço vazio é substituído pelo conceito de referenciais inerciais, nos quais todas as leis físicas devem ter a mesma forma. Para incluirmos os fenômenos gravitacionais, teremos de abandonar tal restrição de considerar apenas esses referenciais e levar em conta **todos** os outros, acelerados ou não. Principalmente os referenciais acelerados, que podem “imitar” o campo gravitacional – o chamado **Princípio da Equivalência** (vide quadro abaixo). Da mesma forma, o campo gravitacional pode ser “eliminado” por uma adequada mudança de referencial – um elevador em queda livre, por exemplo, produz a sensação de ausência de gravidade. Os astronautas que flutuam no interior das estações espaciais orbitando a Terra, não sofrem a influência da gravidade terrestre, exatamente porque estão “caindo” constantemente, embora não seja em direção ao centro de nosso planeta.

O Princípio de Equivalência, entretanto, só é válido se for examinado localmente, isto é, em pequenas regiões do espaço. Se o elevador em queda livre, por exemplo, tiver grandes dimensões espaciais, outros fenômenos entrarão em ação: as marés gravitacionais, que não podem ser “imitadas” por nenhum tipo de referencial acelerado, e também nenhuma transformação entre referenciais de qualquer natureza pode eliminá-las, sendo consideradas, portanto, a verdadeira “assinatura” da interação gravitacional. Este seria o aspecto absoluto da gravidade, que independe do referencial analisado, permitindo que ela também participe do Princípio da Relatividade einsteiniana.

Como conectar esse último aspecto com o fato que discutimos anteriormente de que os corpos parecem cair ou orbitar como se dependessem de alguma forma do lugar, do espaço onde se encontram, já que seu movimento não está relacionado às suas propriedades intrínsecas? Que caracteres absolutos poderiam ser atribuídos ao próprio espaço para responderem pelos efei-

tos gravitacionais? A resposta a essas perguntas é fornecida pela **Geometria**. Entretanto, teremos que considerar aqui o espaço-tempo quadridimensional, no qual o conceito de distância é reformulado de modo a não depender mais do referencial em que é medido. E distância é um conceito estreitamente ligado à Geometria. Outras grandezas geométricas, além da distância no espaço-tempo, mantêm a mesma estrutura formal quando se vai de um referencial para outro. A principal delas é a **curvatura**, que é a propriedade do espaço que revela o quanto ele se “afasta” do estado de planura (ou estado **euclidiano**), a exemplo do espaço representado pela superfície da esfera (bidimensional), que apresenta propriedades geométricas bem diferentes daquelas que caracterizam uma superfície plana.

Assim, do mesmo modo que temos de abandonar a restrição relativamente aos referenciais inerciais e aceitar também como válidos os referenciais acelerados a fim de descrevermos a gravitação, temos de admitir a possibilidade de vivermos em espaços quadridimensionais cuja geometria não seja mais euclideana – isto é, onde não seja mais verdadeiro que a soma dos ângulos internos de um triângulo seja 180° , por exemplo, ou que por um ponto fora de uma reta só passa uma única reta paralela à primeira (quinto postulado de Euclides).

Einstein demonstrou que a referida modificação (ou distorção) da geometria de uma região do espaço-tempo – a curvatura – é causada pela distribuição de matéria e energia (a energia também interage gravitacionalmente) aí existente, e é tanto mais acentuada quanto maior a quantidade e/ou concentração (densidade) destas últimas na referida região. A teoria prevê também que podem existir regiões do espaço em que as concentrações de matéria e energia são tão grandes que a curvatura torna-se virtualmente infinita, e nenhum corpo pode escapar de tais regiões, nem mesmo a luz. São os famosos buracos negros, termo cunhado no fim da década de 60 do século passado pelo não menos famoso físico norte-americano John Archibald Wheeler, que resumiu a Teoria da Relatividade Geral nos seguintes termos:

“A matéria diz ao espaço como ele deve se encurvar e o espaço diz à matéria como ela deve se mover”

Einstein fez também as primeiras aplicações da Relatividade Geral no sentido de entender a estrutura e a evolução do Universo como um todo, inaugurando a chamada era científica da **Cosmologia**, que até então era alvo apenas de especulações e misticismos. O cientista chegou a mostrar que o Universo poderia estar em expansão, mas preferiu a descrição tradicional de um Universo estático, modificando suas equações, ao introduzir arbitra-

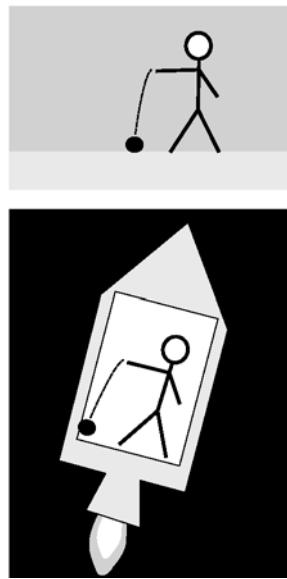


Fig. 4.5 - Ilustração do Princípio da Equivalência

riamente um termo chamado **constante cosmológica**, que seria um termo matemático que descreveria uma força repulsiva atuante em larga escala e que contrabalançaria a atração gravitacional, deixando o Universo “imóvel”. Em 1929, Edwin Hubble mostrou por meio do mais poderoso telescópio que havia na época (localizado no observatório de Monte Palomar, na Califórnia) que o Universo de fato se expandia, com as galáxias distantes se afastandoumas das outras, o que levou Einstein a exclamar que havia cometido o maior erro de sua vida.

Curiosamente, em 1998, cosmólogos verificaram que o Universo está se expandindo a uma taxa maior do que o fazia no passado, isto é, sua expansão está ocorrendo de forma acelerada, e alguns modelos teóricos construídos para explicar o fenômeno resgatam o conceito einsteiniano de constante cosmológica. Ou seja, parece que Einstein acertava até mesmo quando errava.

Capítulo

A Teoria Quântica da Matéria

2.1 A Luz e o Espectro do Corpo Negro

Do mundo das altas velocidades e das grandes massas descrito pelas teorias da relatividade de Einstein, passaremos ao mundo do muito pequeno e do extremamente leve, representado pelas moléculas, átomos e partículas subatômicas, isto é, pelos objetos que medem menos de um nanômetro (ou seja, que preenchem distâncias menores que 10^{-9} m). Tal mundo, inacessível para a humanidade por dezenas de séculos desde que foi imaginado pela primeira vez pelos filósofos atomistas da Grécia Antiga – principalmente Leucipo e Demócrito – para em seguida ser esquecido por todos esses anos, foi ganhando lentamente, a partir do início do século XIX com o estabelecimento da química moderna, o “status” de realidade, enfrentando obstinada resistência e oposição ferrenha de muitos cientistas renomados, influenciados pela filosofia positivista vigente naquele século. Essa filosofia apregoava que o que não pode ser visto ou testado diretamente não é objetivo e real.

Foi quando veio à tona a invenção da técnica de **espectroscopia**. A palavra vem de espectro, que, em Física, refere-se à decomposição em faixas coloridas de um feixe de luz, seguindo certa ordem, após atravessar um prisma, como acontece ao arco-íris, gerado pelas gotas de água suspensas no ar após a chuva, as quais funcionam como pequenos prismas. Esse fato era conhecido desde a antiguidade, mas foi no tratado Optics, de 1675, escrito por Isaac Newton, que o fenômeno foi estudadometiculosamente.

A partir do início do século XIX, com o aprimoramento das técnicas de construção de prismas, a espectroscopia, isto é, o estudo sistemático dos espectros luminosos, ganhou um forte impulso. J. von Fraunhofer descobriu a existência de tênues linhas escuras no espectro proveniente da luz solar, fazendo-a passar por um anteparo com uma fenda vertical antes de atingir o prisma. Kirchoff mostrou que cada espectro observado era característico do elemento químico que emitia a luz ou por ela era atravessado. Isto é, a forma como se distribuíam aquelas linhas escuras representava a “impressão digital” do elemento químico estudado ou um código de barras. Os elementos Césio

e Rubídio, por exemplo, foram descobertos inteiramente devido às novas técnicas espectroscópicas. Hoje, muito das propriedades da matéria é conhecido através de tais técnicas.

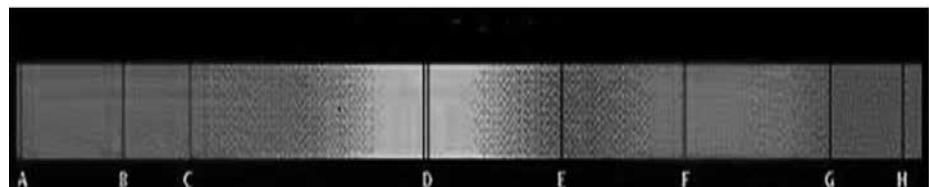


Fig. 4.6 - Espectro de Fraunhofer

Mas antes de tratarmos das mencionadas linhas escuras verticais, que nos revelarão muitos aspectos e propriedades importantes dos átomos explicados pela chamada **Física Quântica**, vamos nos deter sobre como se deu o nascimento desta ciência, bem no início do século XX. Primeiramente enfocaremos o fundo colorido e contínuo contra o qual aquelas linhas escuras se destacam (vide figura acima), o qual vai do vermelho ao violeta, isto é, dos maiores comprimentos de onda (menores frequências) aos menores comprimentos de onda (maiores frequências). Na verdade, esse fundo abrange todo o espectro eletromagnético, mas, como se sabe, somente aquela faixa é visível.

Já se tinham acumulado evidências, durante o último quartel do século XIX, de que tal espectro contínuo de cores modificava-se de acordo com a temperatura da amostra do material aquecido. O mesmo Kirchoff demonstrou que existe um corpo emissor ideal, cujo espectro de cores depende unicamente da sua temperatura e não da composição química, da estrutura ou da forma geométrica desse corpo, que ele denominou **corpo negro**. Da mesma maneira que este é um emissor ideal de radiação eletromagnética, absorve-a igualmente bem. Na verdade, toda radiação que incidir sobre tal corpo será pronta e inteiramente absorvida. Um objeto oco, aquecido e mantido a uma temperatura constante, dotado de um pequeno orifício por onde entra a radiação eletromagnética – luz, por exemplo – e formado por paredes internas espelhadas (de superfície metálica, portanto), representa bem o corpo negro. Com efeito, a radiação que penetrar pelo orifício sofrerá inúmeras reflexões internas e ficará “presa” na cavidade do corpo. Apenas uma desprezível fração escapará ao meio exterior pelo mesmo orifício, para ser devidamente decomposta espectralmente e, assim, analisada.

A análise espectral da radiação que escapa revela que a energia radiente distribui-se nos vários comprimentos de onda do espectro eletromagnético, sendo máxima para determinado comprimento (ou freqüência), dependendo da temperatura em que se encontra o corpo. A superfície solar, por exemplo,

pode ser aproximada por um corpo negro, e a maior parte da energia emitida pelo Sol concentra-se na região do amarelo, correspondente a uma temperatura superficial de cerca de 5.500 K. Observa-se também que esse astro emite radiação eletromagnética em quantidades significativas na forma de ondas ultravioleta, altamente ionizantes, daí o cuidado que temos de tomar com a pele em dias ensolarados. Também há emissão de ondas que vão desde a faixa do rádio e microondas até os raios X e gama, mas em diminutas quantidades.

O gráfico abaixo mostra o comportamento da radiação emitida por um corpo negro. No eixo vertical temos a intensidade espectral (potência irradiada por m^2 por micrômetro de comprimento de onda) e no eixo horizontal, o comprimento de onda correspondente, em micrômetros, cuja unidade equivale a 10^{-6} m. Para cada temperatura existe uma curva diferente. Note que à medida que a temperatura aumenta, o máximo de radiação incide sobre comprimentos de onda mais curtos.

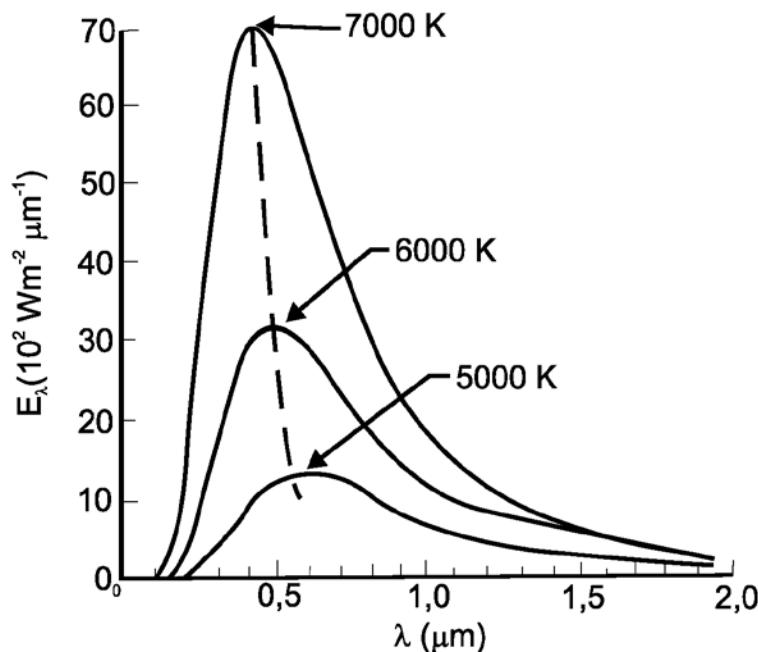
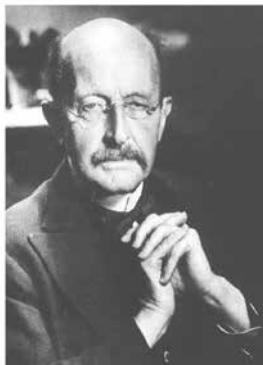


Fig. 4.7 - Gráfico da radiação eletromagnética emitida por corpos negros a diferentes temperaturas

Assim, no final do século XIX, tinham-se acumulado informações suficientes, colhidas experimentalmente através de vários laboratórios europeus, a respeito de como o corpo negro emite radiação eletromagnética, e os gráficos acima eram bem conhecidos. O problema era explicar teoricamente as curvas obtidas. Juntar a ciência da Termodinâmica com a do Eletromagnetismo era importante para esse propósito, e cada uma dessas áreas de pesquisa estava bastante desenvolvida, ambas bem assentadas em seus respectivos



Max Planck (1858-1947)

domínios de estudo. Essa interrelação entre duas disciplinas muito diferentes uma da outra era necessária, uma vez que se estava lidando com a radiação eletromagnética proveniente de fontes aquecidas, e muitas tentativas foram feitas nesse sentido. Algumas delas explicavam razoavelmente bem a parte do gráfico correspondente aos pequenos comprimentos de onda (ou altas freqüências), isto é, os cálculos fornecidos pelo modelo teórico proposto e os resultados experimentais concordavam significativamente ali, mas divergiam completamente dos dados experimentais no setor dos grandes comprimentos de onda. E vice-versa, outras tentativas foram bem sucedidas em explicar a distribuição espectral do corpo negro para a região dos grandes comprimentos de onda, e falhavam grosseiramente na região oposta. A parte “central” da curva, onde se situa o máximo de irradiação, não se ajustava a nenhuma dessas propostas teóricas.

Até que interveio Max Planck. Em um “ato de desespero”, como ele mesmo afirmou ao anunciar o resultado de suas descobertas no ano de 1900, resolveu o problema tendo de supor que a interação da radiação eletromagnética com as cargas elétricas presentes na superfície metálica das paredes internas do corpo negro, cargas que tanto absorviam a radiação como a reemitiam de volta para a cavidade, se dava por trocas descontínuas de energia. Isto é, a energia envolvida nesse processo de interação não podia ser “infinitamente” repartida entre as cargas e a própria radiação.

Havia um limite mínimo para essa quantidade de energia E intercambiada, um “pacote” energético fundamental que Planck denominou de **quantum** (plural *quanta*), e que ele supôs depender da freqüência f da radiação segundo a fórmula

$$E = hf \quad (4.4)$$

Onde h é a constante de Planck, cuja medida é, no S.I., $6,63 \times 10^{-34}$ J.s, um valor considerado extremamente pequeno, o que justifica o porquê de não observarmos esse fenômeno da “quantização” da energia nos eventos ordinários descritos pela Mecânica Clássica. Esta ciência revela-nos, contrariamente ao que foi postulado por Planck, que o módulo da energia envolvida nos processos físicos pode assumir qualquer valor, numa escala contínua que vai do zero ao infinito.

A hipótese utilizada por Planck para explicar a radiação emitida pelo corpo negro propiciou, finalmente, o ajuste perfeito da teoria com os resultados fornecidos pela experiência, em todos os comprimentos de onda e para todas as temperaturas, permitindo inclusive confirmar a chamada Lei de Stephan-Boltzmann, que afirma que a densidade de energia (energia por metro cúbico) total emitida pelo corpo negro é proporcional à quarta potência da temperatura. Com esse triunfo, o início do século XX, mais precisamente 1900, foi considerado o ano de nascimento da Física Quântica.

2.2 O Efeito Fotoelétrico

Desde que Hertz fez suas primeiras experiências no final da década de 80 do século XIX para demonstrar com sucesso a existência das ondas eletromagnéticas, tal como Maxwell as havia previsto em teoria, verificou-se que algumas chapas metálicas atingidas por ondas eletromagnéticas curtas (na faixa do visível e do ultravioleta), emitiam faíscas, que algum tempo depois se verificou tratarem-se de partículas de carga negativa – os elétrons. Esse fato foi depois explorado de uma forma mais sistemática em laboratório, instalando-se em um tubo de vidro, no qual se fez vácuo, duas placas metálicas a certa distância uma da outra, conectadas aos terminais de uma bateria. Quando uma luz monocromática (isto é, de mesmo comprimento de onda) incidia sobre a placa de carga negativa, prontamente se verificava uma corrente no circuito, medida por um amperímetro a ele acoplado. Os elétrons eram ejetados da primeira placa e atraídos para a placa positivamente carregada. A corrente elétrica então se estabelecia.

O inusitado é que se observou de tal experimento que a energia dos elétrons ejetados não dependia da intensidade ou do brilho da luz incidente, e sim da sua freqüência. Quanto maior era esta, maior a energia cinética dos elétrons que saltavam da placa, dependência que se mostrou ser numa razão direta. Havia também uma freqüência limiar, abaixo da qual nenhum elétron era ejetado. Já o aumento da intensidade luminosa repercutia apenas no número de partículas ejetadas, incrementando o valor da corrente elétrica no circuito. Outro aspecto observado era o curto espaço de tempo que havia entre a incidência da onda eletromagnética e a ejeção dos elétrons, que se dava de forma praticamente instantânea. O uso das leis clássicas do eletromagnetismo para o cálculo do tempo de ejeção previa um lapso temporal muito mais longo, quando comparado com o efetivamente medido, já que, segundo aquelas leis, a absorção de energia por parte do elétron deveria acontecer de forma contínua, até essa partícula adquirir o suficiente para se desprender das forças que o atrelavam ao metal e assim saltar para a outra placa. Portanto, havia uma discrepância entre a descrição fornecida pelo eletromagnetismo clássico para o **efeito fotoelétrico** – como foi chamado o referido fenômeno – e o que se constatava experimentalmente.

Então chegou o annus mirabilis de Albert Einstein (1905), que se debruçou sobre o efeito fotoelétrico a fim de compreendê-lo a fundo, chegando à conclusão de que a interação da radiação eletromagnética com os elétrons da placa metálica também se dava a partir de uma transferência descontínua de energia das ondas para as partículas, exatamente como Planck supôs para explicar a distribuição espectral do corpo negro. De fato, como a energia transferida ao elétron era de exatamente um quantum (não podia haver fracionário),

namento), a qual é proporcional à freqüência da luz incidente ($E = hf$), Einstein pôde, assim, explicar de forma satisfatória o porquê da energia dos elétrons ejetados ser proporcional à freqüência da onda recebida, como registrado experimentalmente. E isto era condizente com o fato de que a absorção de energia pelos elétrons era praticamente instantânea, ou ocorria numa escala de tempo bem inferior àquela prevista pela teoria clássica do eletromagnetismo, em que a transferência de energia se dava continuamente, e, portanto, de forma mais lenta. Por este feito, Einstein veio a receber o prêmio Nobel dezesseis anos depois.

O efeito fotoelétrico faz-se bastante presente no nosso dia-a-dia. Nos sensores que abrem portas automaticamente quando se aproxima uma pessoa, nas torneiras de banheiros dos shopping centers, nas células fotoelétricas que captam energia solar e a converte em eletricidade para uso doméstico, nas calculadoras solares de bolso e em diversos outros aparelhos que invadem o cotidiano das pessoas no mundo inteiro.

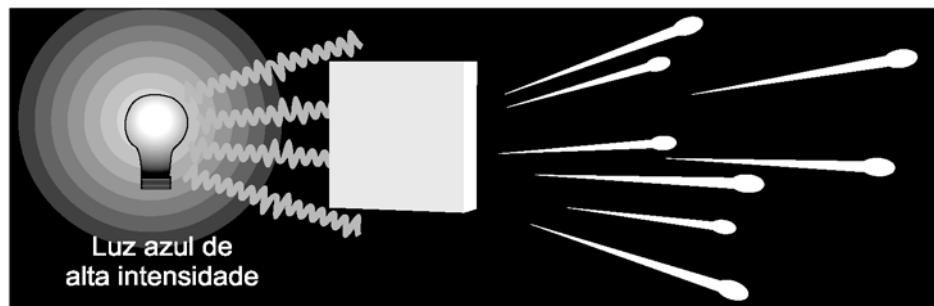


Fig. 4.8 - O Efeito Fotoelétrico

2.3 O Efeito Compton

Este efeito foi estudado pelo físico norte-americano Arthur Compton em 1923, pelo qual recebeu o prêmio Nobel em 1927. Ele fez incidir sobre uma amostra de cristal um feixe de raios X. Estes consistem em radiação eletromagnética de comprimento bastante curto (da ordem do raio do átomo) e, portanto, muito energéticos, produzidos por elétrons acelerados a grandes velocidades que depois são freados bruscamente. Aquele cientista observou que os elétrons livres da rede cristalina eram fortemente impactados pelo feixe, enquanto uma radiação de comprimento mais longo emergia do cristal, formando um ângulo bem definido com o elétron espalhado.

Compton trabalhou teoricamente o problema como uma simples colisão entre um fóton com determinado comprimento de onda inicial e um elétron em repouso. Usando as leis de conservação da energia e do momento linear no contexto da relatividade restrita, mostrou que parte da energia e do momento do

fóton era transferida para o elétron, de modo que aquele saía com um comprimento de onda mais longo, espalhado em uma direção formando certo ângulo em relação à direção do elétron ejetado. Esse tratamento teórico explicava bastante bem os resultados encontrados experimentalmente, e a existência da luz como partícula – o fóton – ficou inequivocamente demonstrada.

Fóttons: existia uma grande diferença entre os quanta de Einstein e os de Planck. Enquanto para este último tais pacotes mínimos de energia se manifestavam apenas no processo de interação da radiação com a matéria, para Einstein a própria radiação eletromagnética era por eles constituída. Estes “grãos” ou partículas de radiação eletromagnética foram chamados posteriormente de fótons. Assim, Einstein evidenciou um aspecto que deixou a comunidade científica bastante desconcertada: a luz exibia propriedades ondulatórias e corpusculares! Com efeito, ela se comportava como ondas, como nos fenômenos de interferência e difração, e como partículas, como no efeito fotoelétrico e no chamado efeito Compton. Tudo dependia do experimento que se fizesse. Esta característica ambígua da luz foi denominada **dualidade**.

2.4 Modelos e Espectros Atômicos

Evidentemente que a idéia da granulosidade da luz foi precedida pela da matéria, que já havia sido pensada há mais de 2500 anos por alguns filósofos da Grécia Antiga. O surgimento da química moderna no final do séc. XVIII e início do XIX resgatou o conceito de átomo, mas, em geral, este foi imaginado apenas como uma forma de se representar ou se quantificar as reações químicas, não se dando muito crédito à sua realidade física. No final do século XIX, entretanto, com os experimentos que evidenciaram a existência dos **raios catódicos**, que brilhavam em ampolas de vidro evacuadas de ar, dotadas de placas metálicas entre as quais havia uma diferença de potencial e de onde eles saltavam, mostrou-se que alguns desses raios eram compostos de partículas de carga negativa, que foram posteriormente chamadas de **elétrons**, a primeira partícula elementar a ser descoberta.

Estas partículas de alguma forma estavam presentes na matéria, que de um modo bastante geral apresenta-se eletricamente neutra. Então deveriam também fazer parte dessa mesma matéria elementos positivamente carregados para compensar a carga negativa eletrônica e assim neutralizá-la. Quando, finalmente, o átomo não passou mais a ter a sua realidade física contestada, salvo por alguns poucos céticos, ele deixou de ser considerado um pedaço esférico duro, indivisível e minúsculo de matéria, como os já referidos gregos antigos e químicos do século XIX imaginaram, e passou a ser dotado de uma estrutura interna que comportasse tanto as cargas elétricas representadas pelos elétrons como por elementos de carga positiva. E assim começaram a surgir os **modelos atômicos**.

No início do século XX, o físico J.J. Thomson, pioneiro em mostrar que uma parte dos raios catódicos eram constituídos de partículas de carga negativa (os elétrons), criou um dos primeiros modelos estruturais para o átomo eletricamente neutro, que consistia em uma massa positivamente carregada incrustada de elétrons espaçados uns dos outros, como um maracujá e suas sementes (vide figura abaixo). Na verdade, essa distribuição eletrônica não era aleatória, mas obedecia a certa configuração que permitisse a estabilidade do átomo.

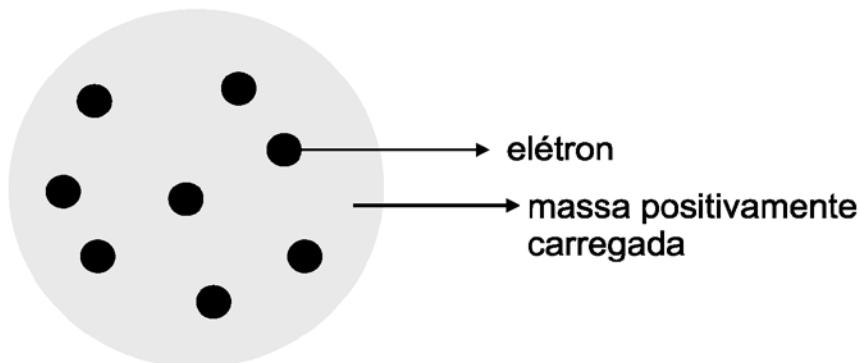


Fig. 4.9 - Modelo de J.J. Thomson para o átomo

Havia outros modelos atômicos que competiam com o de Thomson. No mesmo ano em que este cientista anunciava na Universidade de Yale o seu modelo atômico (1903), Hantaro Nagaoka, físico japonês da Universidade Imperial de Tóquio, propôs o modelo “saturniano”, em que a carga positiva concentrava-se numa região esférica do espaço e os elétrons orbitavam-na, formando um anel de partículas, muito parecido com o que acontece ao planeta Saturno.

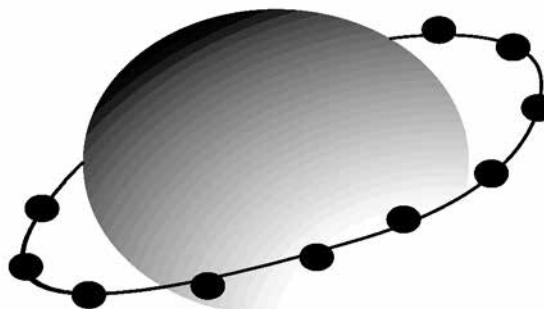


Fig. 4.10 - O átomo segundo Nagaoka

Mas nada melhor do que a experiência para decidir sobre qual dos modelos era o que representava melhor a realidade. Foi quando entrou em cena o físico britânico Ernest Rutherford, que a partir de 1909 planejou e orientou um brilhante experimento para testar qual modelo seria o correto – se o de Thomson ou o de Nagaoka. O arranjo experimental concebido por Rutherford consistia em disparar raios alfa – partículas de carga positiva altamente energéticas provenientes de decaimentos radioativos de átomos pesados – contra finas folhas de ouro, que é um metal de grande densidade, isto é, com uma grande concentração de átomos. As referidas folhas eram tão finas que chegavam a ser transparentes, de tal modo que houvesse pouquíssimos átomos ao longo de sua espessura. O que se verificou foi uma enorme surpresa. Muitas daquelas partículas, na verdade a maior parte, atravessava a folha como se nada existisse em seu caminho, como se ela fosse feita apenas de espaços vazios! Algumas sofriam pequenos desvios de trajetória ao atravessá-la e muito poucas sofriam desvios acentuados. Raríssimas, entretanto, apresentavam um ângulo de desvio próximo a 180° , ou seja, praticamente ricochetavam para trás, como se tivessem se chocado com algo extremamente duro dentro da folha de ouro! Então Rutherford realizou alguns cálculos e mostrou que esse comportamento das partículas alfa disparadas não era condizente com o modelo de Thomson. Se este fosse correto, quase todas as partículas alfa sofreriam algum desvio, embora que pouco acentuado. E a probabilidade de uma sofrer um recuo, como observado, seria virtualmente zero!

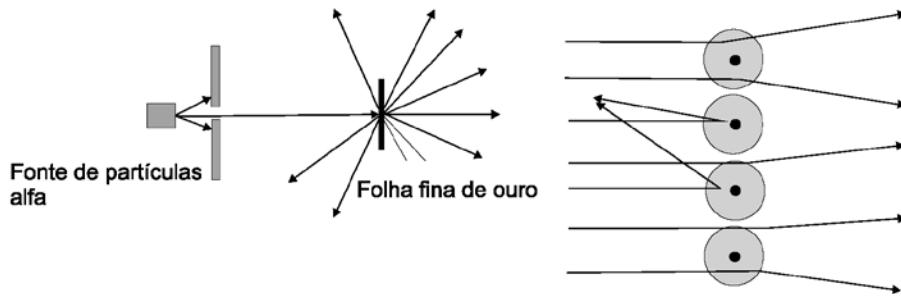


Fig. 4.11 - O Experimento de Rutherford

Então a hipótese que restava era a de que o átomo fosse composto de um pequeno núcleo de carga positiva que concentrava praticamente toda a massa atômica, com os levíssimos elétrons orbitando em volta e atraídos por uma força do tipo coulombiana. O núcleo teria entre 10^{-4} e 10^{-5} vezes o tamanho do átomo, ou seja, este seria quase que inteiramente formado de vazio, o que explicaria a grande quantidade de partículas alfa que quase não sofriam desvios no experimento realizado. As partículas que eram acentuadamente desviadas se aproximavam diretamente de um núcleo, sendo fortemente repelidas pela força coulombiana, pois a partícula alfa e o núcleo são ambos po-

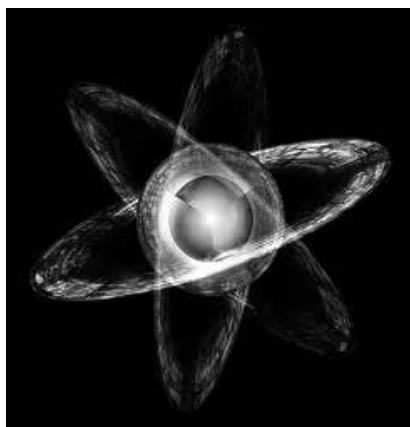


Fig. 4.12 - Representação Artística do Modelo Atômico de Rutherford

sitivamente carregados. Assim, o modelo saturniano de Nagaoka, com modificações, parecia haver vencido, e Rutherford fez referência a ele quando publicou o resultado de suas descobertas em 1911.

Mas havia um sério problema com o “modelo atômico nuclear” proposto por Rutherford. Os elétrons orbitando em torno do núcleo estão acelerados devido à ação centrípeta da força coulombiana. E pelas leis clássicas do eletromagnetismo, deveriam emitir radiação eletromagnética, perdendo energia e executando órbitas de raio cada vez menor, numa espiral descendente em direção ao núcleo atômico. E esse colapso aconteceria em frações de segundo... Mas tal fato não é observado, felizmente. A matéria à nossa volta é estável! Então havia uma inconsistência que a mecânica e o eletromagnetismo clássicos não conseguiam resolver.

Falamos na seção anterior dos espectros contínuos emitidos por fontes aquecidas, quando de nossa exposição acerca da radiação do corpo negro. Agora falaremos de outros tipos de espectros, os de emissão e os de absorção. Um espectro de emissão é o resultado da decomposição espectral da luz emitida por um gás rarefeito contido em um tubo de descarga elétrica. Os poucos átomos do gás no tubo ganham energia em colisões com os elétrons durante a descarga e em seguida a perdem emitindo radiação eletromagnética. Verifica-se que o espectro de emissão resultante contém uma série de linhas brilhantes discretas, espaçadas uma da outra, correspondentes a diferentes imagens coloridas da fenda sobre um fundo escuro. As posições das linhas no anteparo do espectrômetro são únicas para o tipo de átomo contido no tubo de descarga.

Já um espectro de absorção é formado quando átomos removem certos comprimentos de onda do espectro contínuo da luz branca. A luz de uma fonte incandescente é dirigida para uma fenda e atravessa então um recipiente contendo gás, após o que passa pelo prisma do espectrômetro. A dispersão pelo prisma produz um espectro contínuo de cores, devido à radiação térmica da fonte (filamento luminoso), o qual é acompanhado de uma série de linhas escuras devido ao gás interveniente (como no espectro de Fraunhofer, visto mais acima). A formação dessas linhas precisas e escuras é atribuída à absorção de luz pelos átomos do gás em determinados comprimentos de onda, a qual é emitida pelo filamento incandescente. Esses comprimentos de onda ausentes são característicos do tipo de átomo constituinte do gás. Acha-se que as linhas brilhantes no espectro de emissão ocorrem nas mesmas posições das linhas escuras no espectro de absorção, se o gás empregado é o mesmo.

Então os átomos, isoladamente, só absorvem ou emitem radiação eletromagnética em comprimentos de onda (frequências) bem definidos, o que levou Niels Bohr, em 1913, a aprimorar o modelo de Rutherford, postulando

que os elétrons ocupariam apenas determinadas órbitas permitidas. Uma vez estando nelas, haveria uma violação das leis do eletromagnetismo clássico, pois os elétrons não emitiriam radiação eletromagnética, só o fazendo quando “saltassem” de uma órbita externa para uma mais interna.

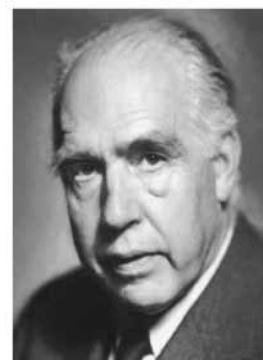
Se cada órbita eletrônica, que assinalaremos por um número natural n diferente de zero, possui uma energia E_n , então a diferença energética entre uma órbita externa m , de maior energia, e aquela da órbita interna n , será exatamente a energia do fóton emitido na transição, o qual, pela lei de Planck, possui uma freqüência bem definida:

$$E_m - E_n = hf \quad (4.5)$$

Da mesma forma, o elétron deve absorver exatamente essa energia do fóton incidente para saltar da órbita interna para a externa.

A teoria de Bohr explicava maravilhosamente bem os espectros de absorção e emissão do átomo de hidrogênio, o mais simples de todos, o qual consiste de uma partícula de carga positiva (que depois recebeu o nome de próton) e de um elétron em órbita, ambos possuindo carga de mesmo módulo. Mas a teoria falhava na descrição do espectro do átomo de hélio, o segundo mais simples da tabela periódica.

O modelo teórico proposto por Bohr era uma tentativa razoável de se entender o mundo microscópico, procurando manter onde fosse possível os conceitos clássicos da Física e inserindo quando necessário as novas descobertas que vieram à tona a partir de 1900. Precisava-se, entretanto, de uma teoria que fosse geral e, portanto, mais fundamental, capaz de explicar os espectros de emissão e absorção de todos os outros átomos e moléculas, bem como suas diversas propriedades físico-químicas. Essa teoria só surgiria mais de uma década depois: **A Mecânica Quântica**.



Niels Bohr – 1885-1962

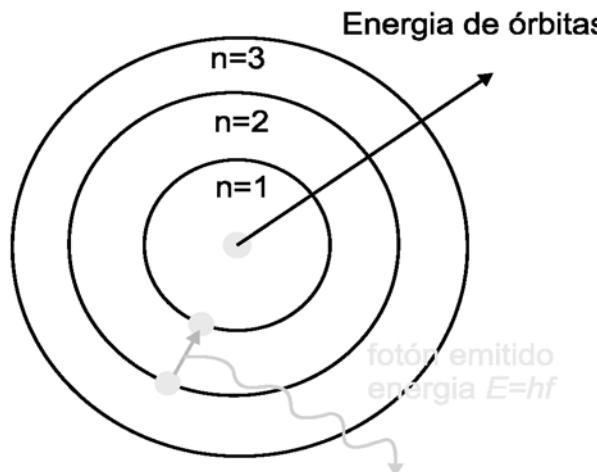


Fig. 4.13 - Esquema do modelo de Rutherford-Bohr

2.5 Propriedades Ondulatórias dos Elétrons e o Surgimento da Mecânica Quântica

Não fica claro no modelo de Rutherford-Bohr porque os elétrons deveriam seguir determinadas trajetórias, e não outras. Na verdade, Bohr postulou que as referidas órbitas circulares teriam de obedecer à condição de que o momento angular orbital L dos elétrons fosse um múltiplo inteiro de h :



Louis de Broglie
(1875-1960)

onde h é a constante de Planck dividida por 2, r é o raio da trajetória, m a massa e v a velocidade eletrônicas. Essa suposição talvez se devesse ao fato de que a referida constante possui unidades de momento angular e é numericamente muito pequena. Comparemos com a quantização da carga elétrica, em que os valores de todas as cargas na natureza são múltiplos inteiros de uma carga fundamental, de valor também bastante reduzido, igual à carga do elétron e do próton.

Em 1924, o físico e príncipe francês Louis de Broglie, utilizando argumentos de simetria, defende em sua tese de doutoramento na Universidade de Paris que o princípio da dualidade onda-partícula seja estendido para os corpúsculos materiais. Ou seja, as partículas deveriam exibir também um comportamento ondulatório, do mesmo modo que a luz podia manifestar propriedades de partículas. Então de Broglie associou uma onda ao elétron, estabelecendo que houvesse uma relação entre o aspecto corpuscular, representado pela quantidade de movimento $p = mv$ do elétron e sua característica ondulatória, representada pelo comprimento de onda λ , tal que

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (4.7)$$

Da equação acima podemos verificar que objetos de grande massa movendo-se a velocidades apreciáveis, como aqueles que estão presentes em nosso cotidiano (um automóvel em movimento, por exemplo), apresentam grande quantidade de movimento, e comprimento de onda a ele associado, portanto, tende a zero, uma vez que a constante de Planck, por outro lado, apresenta um valor extremamente reduzido. Desse modo, o aspecto ondulatório das partículas, característica do mundo quântico, não se manifesta em objetos macroscópicos. Podemos afirmar que a constante de Planck divide o mundo de acordo com a escala de distâncias envolvidas.

De Broglie propôs um experimento com elétrons para demonstrar o seu caráter ondulatório, o qual foi finalmente realizado por Davisson e Germer, nos Estados Unidos, e por G.P.Thomson (filho de J.J.Thomson, o descobridor do elétron), na Escócia. Elétrons eram disparados contra um pedaço de cristal, e

os que eram refletidos de volta por um plano desse cristal interferiam, em um anteparo de detecção, com os que eram refletidos pelo plano situado imediatamente atrás do primeiro, formando um inequívoco padrão de interferência, isto é, alternância de estreitas faixas em que chegavam muitos elétrons com regiões aonde não chegava nenhum, um padrão típico de ondas.

Um experimento semelhante ao realizado por Thomas Young no início do século XIX, o da dupla fenda, que demonstrou as propriedades ondulatórias da luz, foi feito com elétrons em 1989 atravessando fendas da ordem de nanômetros, por um grupo de pesquisadores japoneses, confirmando com maior precisão o comportamento ondulatório daquelas partículas. Experimentos dessa natureza também foram realizados com nêutrons, átomos e moléculas. Em 2002, foram publicados resultados de interferência ondulatória com moléculas de geometria esférica, formadas de 60 ou 70 átomos de carbono, chamadas de fulerenos. São presentemente os maiores objetos materiais a exibirem a dualidade onda-partícula.

Mas voltemos à hipótese de de Broglie e tentemos conectá-la com o modelo atômico de Rutherford-Bohr. Se os elétrons podem se comportar como ondas, então as órbitas permitidas serão aquelas em que o seu comprimento seja um número inteiro de comprimentos da onda eletrônica, isto é

$$2\pi r = n\lambda. \quad (4.8)$$

Como afirmado por de Broglie, $\lambda = h/p$. Substituindo na equação acima, encontramos a justificativa para o postulado da quantização do momento angular proposta por Bohr (equação 4.7), ou seja, esta emerge como uma consequência natural da hipótese de que os elétrons também se comportam como ondas.

No final do ano de 1925, o físico austríaco Erwin Schrödinger encontrou uma equação matemática que descreve a propagação dessas ondas, obtendo com sucesso soluções – as chamadas funções de onda ψ – que incluíam os valores das energias de vários sistemas físicos, notadamente os níveis energéticos do átomo de hidrogênio, que concordaram com o calculado no modelo de Rutherford-Bohr. Depois foram encontradas, usando o formalismo de Schrödinger e com razoável aproximação, os níveis de energia do átomo de hélio. Parecia que havia se chegado a uma teoria mais fundamental que explicava o mundo microscópico, e que foi denominada **Mecânica Quântica Ondulatória**.

Surgiu então a pergunta: o que eram essas ondas? As ondas eletromagnéticas, por exemplo, são formadas por campos elétricos e magnéticos oscilando no espaço. E os elétrons, seriam a vibração de quê? Schrödinger mostrou que as funções de onda, soluções de sua equação, assumem valores complexos (números complexos são aqueles em que figuram a unidade

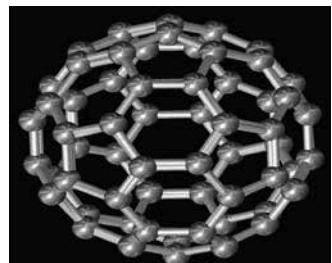


Fig. 4.14 - Representação da molécula de fulereno C_{60}

Curiosidade:
Thomson pai foi o descobridor do elétron enquanto partícula, pelo que recebeu o prêmio Nobel de 1906 e Thomson filho foi um dos descobridores do elétron enquanto onda, pelo que compartilhou o prêmio Nobel de 1937.

imaginária $i = \sqrt{-1}$). Como só podemos medir grandezas representadas por números reais, então as ondas associadas às partículas não teriam um significado físico imediato, isto é, não teriam uma realidade palpável. Então pouco depois da descoberta da equação de Schrödinger, o físico alemão Max Born propôs a interpretação de que o módulo quadrado de tal função de onda, $|\Psi|^2$, este sim um número real, estava relacionado à probabilidade de se localizar o elétron em determinada região do espaço. O conceito de órbita eletrônica foi, então, substituído pelo de **orbital**, que seria o conjunto de pontos com máxima probabilidade de se localizar a partícula em torno do núcleo do átomo. Assim, o elétron poderia ser encontrado em qualquer posição próxima ao núcleo, de modo que se passou a representar essas partículas como uma “nuvem” espalhada em volta do núcleo atômico, e não mais seguindo trajetórias circulares precisamente determinadas.

Há outra característica fundamental associada ao elétron, (e a outras partículas) e que não está relacionado ao seu movimento orbital. Seria uma propriedade intrínseca da partícula, tal como sua massa e carga elétrica, e que, embora não seja uma imagem correta, de alguma forma representaria uma espécie de rotação em torno de si própria: o **spin**.

2.6 Heisenberg e o Princípio da Incerteza

O físico alemão Werner Heisenberg publicou em 1927 o chamado Princípio da Incerteza, em que ele afirmava ser impossível determinar com graus arbitrários de precisão a posição e a quantidade de movimento de uma partícula. Quanto mais se conhece a respeito da quantidade de movimento, menos se sabe sobre a posição da partícula, e vice-versa. A relação proposta entre as incertezas da posição Δx , medida numa linha reta, e a da quantidade de movimento ao longo dessa linha Δp seria, então,

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

onde a constante de Planck mais uma vez nos mostra que essa incerteza é uma peculiaridade do mundo microscópico. Cabe frisar que a relação mínima de incerteza não é devida à imperícia do experimentador ou à deficiência de tecnologia empregada, e sim a uma característica intrínseca da realidade física.

No mundo macroscópico descrito pelas Leis de Newton e mesmo pelas de Einstein, podemos saber precisamente onde está a partícula e para onde ela está indo, isto é, podemos estabelecer a trajetória da partícula. No mundo descrito pela Mecânica Quântica, isto já não é mais possível – o conceito de trajetória é completamente abolido, só podemos falar de probabilidade de

localização do elétron, como já discutido na seção anterior ao falarmos de orbital. Assim o determinismo da Mecânica Clássica já não faz mais sentido no domínio quântico.

Faremos, enfim, um breve resumo do que é a Mecânica Quântica:

- Descreve com bastante exatidão o domínio das moléculas, átomos e partículas elementares;
- Nela, em determinadas circunstâncias, algumas grandezas dinâmicas são quantizadas, como a energia e o momento angular do elétron em torno do átomo;
- As partículas podem comportar-se ou como corpúsculos ou como ondas, de acordo com o experimento realizado (isto é, os objetos microscópicos apresentam dualidade onda-partícula);
- Existe uma relação de incerteza associada a medidas de pares de determinadas grandezas físicas, como, por exemplo, posição e quantidade de movimento de uma partícula.

Saiba mais



O Princípio da Incerteza no Eletromagnetismo Clássico e o Vácuo Quântico

O Princípio da Incerteza de Heisenberg foi inicialmente aplicado a partículas como elétrons. Mas ele também pode ser aplicado a campos, como o elétrico e o magnético, entidades físicas que funcionariam como os pares de variáveis dinâmicas das partículas relacionados pelo referido princípio. A esses campos estariam associadas incertezas em suas medidas, igualmente relacionadas por uma desigualdade. Existe uma semelhança formal entre a energia de um oscilador harmônico simples (OSH) e a densidade energética dos campos eletromagnéticos. No primeiro caso, aplicando-se o Princípio da Incerteza e minimizando-se a energia do sistema, encontra-se a chamada energia do ponto zero $E = (\frac{1}{2})hf$ por modo de oscilação, já encontrada por Schrödinger ao resolver sua equação para o OSH quântico, onde h é a constante de Planck e f a freqüência. Fazendo uma inversão no método, é possível extrair um Princípio da Incerteza válido para os campos, considerando que o valor mínimo da energia é o mesmo encontrado para o oscilador harmônico, já que os campos podem ser vistos de certo modo como um conjunto de osciladores. Daí pode-se mostrar que é impossível a eliminação completa desses campos em uma dada região do espaço, pois isso implicaria que seriam perfeitamente determinados, violando o referido princípio. Esse aspecto daria origem ao chamado vácuo quântico e suas manifestações físicas, como o Efeito Casimir, no qual placas metálicas paralelas descarregadas, situadas em uma região de vácuo, atraem-se com uma força inversamente proporcional à quarta potência da separação entre as mesmas.

Leituras, filmes e sites



Fronteiras da Física – O Universo Elegante, com Brian Greene, em três episódios, 2 DVD's, editora Duetto.

Referências



AMALDI, UGO: **Imagens da Física – As Idéias e Experiências dos Pêndulos aos Quarks**, Editora Scipione, São Paulo 2006

ALONSO & FINN: **Física um Curso Universitário – Vols. 1 e 2**, 8^a. Reimpresão Edgard Blucher, São Paulo 1999

CHAVES, ALAOR: **Física Vols 1, 2, 3 e 4**: Reichmann & Affonso Editores; São Paulo, 2001.

FEYNMAN, LEIGHTON & SANDS: **Lições de Física - Volume 1**, Editora Bookman, Porto Alegre, 2008

HALLIDAY-RESNICK-WALKER **Fundamentos de Física vols. I, II, III e IV**. 4a. ed., Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro e São Paulo, 1996.

HAWKING, S. **Os Gênios da Ciência – Sobre o Ombro de Gigantes** – 2^a. Edição, Editora Campus-Elsevier, Rio de Janeiro, 2005.

HEWITT, PAUL G.: **Física Conceitual** , 9^a. Edição, Editora Bookman, Porto Alegre, 2002

NUSSENZVEIG, H.M. **Curso de Física Básica vols. 1, 2, 3 e 4**. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1997.

PERELMAN, J. **Aprenda Física Brincando**, Hemus Livraria Editora Ltda., São Paulo, 1970

ROCHA, JOSÉ F. (org.): **Origem e Evolução das Idéias da Física**, Editora da UFBA, Salvador, 2002

Sobre os autores

Celio Rodrigues Muniz

Possui graduação (Bacharelado) em Física Geral e Fundamental pela Universidade Federal do Ceará (2001), mestrado em Física pela Universidade Federal do Ceará (2004) e doutorado em Física pela Universidade Federal do Ceará (2008). Atualmente é professor Adjunto I da Universidade Estadual do Ceará. Tem experiência na área de Física, com ênfase em Teoria Geral de Partículas, Campos e suas aplicações em Matéria Condensada. Interessase também por gravitação, Astrofísica e Cosmologia.

Lázara Silveira Castrillo

Possui graduação em Engenharia Energética Nuclear pelo Instituto Superior En Ciencias Energéticas y Nucleares (1993), mestrado em Tecnologias Energéticas Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco (1998) e doutorado em Tecnologias Energéticas Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco (2003). Atualmente é Assistente da Universidade Estadual do Ceará. Tem experiência na área de Engenharia Nuclear, com ênfase em Tecnologia dos Reatores. Atuando principalmente nos seguintes temas: Análise de sensibilidade, Modelagem computacional, Métodos Perturbativos, fluxo bifásico.



Matemática

Fiel a sua missão de interiorizar o ensino superior no estado Ceará, a UECE, como uma instituição que participa do Sistema Universidade Aberta do Brasil, vem ampliando a oferta de cursos de graduação e pós-graduação na modalidade de educação a distância, e gerando experiências e possibilidades inovadoras com uso das novas plataformas tecnológicas decorrentes da popularização da internet, funcionamento do cinturão digital e massificação dos computadores pessoais.

Comprometida com a formação de professores em todos os níveis e a qualificação dos servidores públicos para bem servir ao Estado, os cursos da UAB/UECE atendem aos padrões de qualidade estabelecidos pelos normativos legais do Governo Federal e se articulam com as demandas de desenvolvimento das regiões do Ceará.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

