

**SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO**

**FÍSICA**  
ENSINO MÉDIO

**2<sup>a</sup> Edição**



**Este livro é público - está autorizada a sua reprodução total ou parcial.**

**Governo do Estado do Paraná**

Roberto Requião

**Secretaria de Estado da Educação**

Mauricio Requião de Mello e Silva

**Diretoria Geral**

Ricardo Fernandes Bezerra

**Superintendência da Educação**

Yvelise Freitas de Souza Arco-Verde

**Departamento de Ensino Médio**

Mary Lane Hutner

**Coordenação do Livro Didático Público**

Jairo Marçal

Depósito legal na Fundação Biblioteca Nacional, conforme Decreto Federal n.1825/1907, de 20 de Dezembro de 1907.

É permitida a reprodução total ou parcial desta obra, desde que citada a fonte.

SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO

Avenida Água Verde, 2140 - Telefone: (0XX) 41 3340-1500

e-mail: dem@seed.pr.gov.br

80240-900 CURITIBA - PARANÁ

Catalogação no Centro de Editoração, Documentação e Informação Técnica da SEED-PR

Física / vários autores. – Curitiba: SEED-PR, 2006. – p. 232

ISBN: 85-85380-34-9

1. Física. 2. Ensino médio. 3. Ensino de física. 4. Movimentos. 5. Eletromagnetismo. 6. Termodinâmica. I. Folhas. II. Material de apoio pedagógico. III. Material de apoio teórico. IV. Secretaria de Estado da Educação. Superintendência da Educação. V. Título.

CDU 53+373.5

2<sup>a</sup> Edição

IMPRESSO NO BRASIL

DISTRIBUIÇÃO GRATUITA

***Autores***

Ezequiel Burkarter  
Julia Tieko Fujimoto  
Juliana Loch  
Kleber Sebastião Juliani  
Leunice Ramme  
Luiza Polak  
Marina de Lurdes Machado  
Otto Henrique Martins da Silva  
Robson Lima Oliveira  
Teresinha Aparecida Soares Albuquerque

***Equipe técnico-pedagógica***

Ezequiel Burkarter  
Juliana Loch  
Marina de Lurdes Machado  
Fabio Luiz de Souza

***Assessora do Departamento de Ensino Médio***

Agnes Cordeiro de Carvalho

***Coordenadora Administrativa do Livro Didático Públíco***

Edna Amancio de Souza

***Equipe Administrativa***

Mariema Ribeiro  
Sueli Tereza Szymanek

***Técnicos Administrativos***

Alexandre Oliveira Cristovam  
Viviane Machado

***Consultora***

Ivanilda Higa - UFPR

***Leitura Crítica***

Marcelo Alves Barros - UEM

***Colaboradora***

Aparecida Magalhães Villatorre

***Consultor de direitos autorais***

Alex Sander Hostyn Branchier

***Revisão Textual***

Luciana Cristina Vargas da Cruz  
Renata de Oliveira

***Projeto Gráfico e Capa***

Eder Lima / Ícone Audiovisual Ltda

***Editoração Eletrônica***

Ícone Audiovisual Ltda

## Carta do Secretário

Este Livro Didático Público chega às escolas da rede como resultado do trabalho coletivo de nossos educadores. Foi elaborado para atender à carência histórica de material didático no Ensino Médio, como uma iniciativa sem precedentes de valorização da prática pedagógica e dos saberes da professora e do professor, para criar um livro público, acessível, uma fonte densa e credenciada de acesso ao conhecimento.

A motivação dominante dessa experiência democrática teve origem na leitura justa das necessidades e anseios de nossos estudantes. Caminhamos fortalecidos pelo compromisso com a qualidade da educação pública e pelo reconhecimento do direito fundamental de todos os cidadãos de acesso à cultura, à informação e ao conhecimento.

Nesta caminhada, aprendemos e ensinamos que o livro didático não é mercadoria e o conhecimento produzido pela humanidade não pode ser apropriado particularmente, mediante exibição de títulos privados, leis de papel mal-escritas, feitas para proteger os vendilhões de um mercado editorial absurdamente concentrado e elitista.

Desafiados a abrir uma trilha própria para o estudo e a pesquisa, entregamos a vocês, professores e estudantes do Paraná, este material de ensino-aprendizagem, para suas consultas, reflexões e formação contínua. Comemoramos com vocês esta feliz e acertada realização, propondo, com este Livro Didático Público, a socialização do conhecimento e dos saberes.

Apropriem-se deste livro público, transformem e multipliquem as suas leituras.

Mauricio Requião de Mello e Silva

**Secretário de Estado da Educação**

## Aos Estudantes

Agir no sentido mais geral do termo significa tomar iniciativa, iniciar, imprimir movimento a alguma coisa. Por constituírem um *initium*, por serem recém-chegados e iniciadores, em virtude do fato de terem nascido, os homens tomam iniciativa, são impelidos a agir. (...) O fato de que o homem é capaz de agir significa que se pode esperar dele o inesperado, que ele é capaz de realizar o infinitamente improvável. E isto, por sua vez, só é possível porque cada homem é singular, de sorte que, a cada nascimento, vem ao mundo algo singularmente novo. Desse alguém que é singular pode-se dizer, com certeza, que antes dele não havia ninguém. Se a ação, como início, corresponde ao fato do nascimento, se é a efetivação da condição humana da natalidade, o discurso corresponde ao fato da distinção e é a efetivação da condição humana da pluralidade, isto é, do viver como ser distinto e singular entre iguais.

Hannah Arendt  
*A condição humana*

Este é o seu livro didático público. Ele participará de sua trajetória pelo Ensino Médio e deverá ser um importante recurso para a sua formação.

Se fosse apenas um simples livro já seria valioso, pois, os livros registram e perpetuam nossas conquistas, conhecimentos, descobertas, sonhos. Os livros, documentam as mudanças históricas, são arquivos dos acertos e dos erros, materializam palavras em textos que exprimem, questionam e projetam a própria humanidade.

Mas este é um livro didático e isto o caracteriza como um livro de ensinar e aprender. Pelo menos esta é a idéia mais comum que se tem a respeito de um livro didático. Porém, este livro é diferente. Ele foi escrito a partir de um conceito inovador de ensinar e de aprender. Com ele, como apoio didático, seu professor e você farão muito mais do que “seguir o livro”. Vocês ultrapassarão o livro. Serão convidados a interagir com ele e desafiados a estudar além do que ele traz em suas páginas.

Neste livro há uma preocupação em escrever textos que valorizem o conhecimento científico, filosófico e artístico, bem como a dimensão histórica das disciplinas de maneira contextualizada, ou seja, numa linguagem que aproxime esses saberes da sua realidade. É um livro diferente porque não tem a pretensão de esgotar conteúdos, mas discutir a realidade em diferentes perspectivas de análise; não quer apresentar dogmas, mas questionar para compreender. Além disso, os conteúdos abordados são alguns recortes possíveis dos conteúdos mais amplos que estruturam e identificam as disciplinas escolares. O conjunto desses elementos que constituem o processo de escrita deste livro denomina cada um dos textos que o compõem de “Folhas”.

Em cada Folhas vocês, estudantes, e seus professores poderão construir, reconstruir e atualizar conhecimentos das disciplinas e, nas veredas das outras disciplinas, entender melhor os conteúdos sobre os quais se debruçam em cada momento do aprendizado. Essa relação entre as disciplinas, que está em aprimoramento, assim como deve ser todo o processo de conhecimento, mostra que os saberes específicos de cada uma delas se aproximam, e navegam por todas, ainda que com concepções e recortes diferentes.

Outro aspecto diferenciador deste livro é a presença, ao longo do texto, de atividades que configuram a construção do conhecimento por meio do diálogo e da pesquisa, rompendo com a tradição de separar o espaço de aprendizado do espaço de fixação que, aliás, raramente é um espaço de discussão, pois, estando separado do discurso, desarticula o pensamento.

Este livro também é diferente porque seu processo de elaboração e distribuição foi concretizado integralmente na esfera pública: os Folhas que o compõem foram escritos por professores da rede estadual de ensino, que trabalharam em interação constante com os professores do Departamento de Ensino Médio, que também escreveram Folhas para o livro, e com a consultoria dos professores da rede de ensino superior que acreditaram nesse projeto.

Agora o livro está pronto. Você o tem nas mãos e ele é prova do valor e da capacidade de realização de uma política comprometida com o público. Use-o com intensidade, participe, procure respostas e arrisque-se a elaborar novas perguntas.

A qualidade de sua formação começa aí, na sua sala de aula, no trabalho coletivo que envolve você, seus colegas e seus professores.

# Sumário

**Texto de Apresentação do LDP de Física** ..... 10

## **Conteúdo Estruturante: Movimento**

	Apresentação do Conteúdo Estruturante Movimento .....	12
<b>1</b>	- Gravitação Universal .....	17
<b>2</b>	- Descrição Clássica dos Movimentos: Inércia e <i>Momentum</i> .....	33
<b>3</b>	- Trajetórias .....	49

## **Conteúdo Estruturante: Termodinâmica**

	Apresentação do Conteúdo Termodinâmica .....	62
<b>4</b>	- Lei Zero da Termodinâmica .....	65
<b>5</b>	- Modelos de Calor .....	77
<b>6</b>	- Vapor e Movimento .....	93
<b>7</b>	- Verso e Reverso: A Ordem do Universo .....	107
<b>8</b>	- Pressão e Volume .....	121

## **Conteúdo Estruturante: Eletromagnetismo**

Apresentação do Conteúdo Estruturante Eletromagnetismo .....	134
<b>9</b> – Carga Elétrica.....	137
<b>10</b> – Geração mais Transformação igual a Conservação de Energia .....	151
<b>11</b> – Campos Eletromagnéticos.....	165
<b>12</b> – A Natureza da Luz e suas Propriedades.....	183
<b>13</b> – Dualidade Onda Partícula da Luz .....	207

## **Epílogo**

<b>14</b> – As Três Interações Fundamentais.....	219
--	-----

A  
p  
r  
e  
s  
e  
n  
t  
a  
ç  
ã  
o

A Física é uma Ciência que tem como objeto de estudo o Universo, sua evolução, suas transformações e as interações que nele se apresentam. Por alguma razão, os fenômenos da natureza obedecem a equações matemáticas. Dessa forma, o papel do físico consiste em elaborar modelos para os fenômenos expressos em equações matemáticas. Mas atenção! Esses modelos não são a natureza, mas sim a representação dela.

O conhecimento físico construído ao longo do tempo encontra-se presente hoje nas tecnologias do setor produtivo e de nossas casas. Daí a sua importância para as práticas sociais contemporâneas, a compreensão da cultura produzida pelos homens, para entender a relevância histórica dessa produção dentro da história da humanidade. Não fosse o bastante, a elegância das teorias físicas, a emoção dos debates em torno das idéias científicas, a grandeza dos princípios físicos, desafia a todos nós, professores e estudantes, de compartilharmos, ainda que com um pouco de Matemática, os conceitos e a evolução das idéias em Física, presentes desde que o homem, por necessidade ou por curiosidade, passou a se preocupar com o estudo dos fenômenos naturais. (MENEZES, 2005)

Até o final do século XIX e início do século XX, praticamente toda a Física conhecida estava concentrada no estudo dos **Movimentos**, apresentada no *Principia* de Newton, e o **Eletromagnetismo** de Maxwell, cuja síntese manifesta a junção dos fenômenos elétricos e magnéticos. E, ainda, as três leis da **Termodinâmica**, formulações ocorridas especialmente com os trabalhos de Mayer, Helmholtz e Gibbs, donde surgiu uma das primeiras formulações para a Conservação da Energia.

Assim, os textos, os quais chamamos Folhas, englobam três campos de estudos: **Movimento**, **Termodinâmica** e **Eletromagnetismo**, escolhidos como estruturantes do currículo de Física do Ensino Médio, porque constituem-se como teorias unificadoras da Física. No século XVI, a mecância de Newton uniu os fenômenos celestes e os terrestres, sendo que suas Leis de **Movimento** englobam a Estática, a Dinâmica e a Astronomia. No século XIX, os estudos da **Termodinâmica**, que tiveram como mote as máquinas térmicas, unificam os conhecimentos sobre gases, pressão, temperatura e calor. Ainda no século XIX, Maxwell inclui a Óptica dentro da **Teoria Eletromagnética**, concluindo a terceira grande sistematização da Física ao unir os fenômenos elétricos com os magnéticos e a óptica.

# F Í S I C A

O século XX presenciou grandes avanços no conhecimento dos fenômenos naturais: do transistor a nanotecnologia; a expansão do universo que impulsiona a busca por novos modelos cosmológicos; computadores com capacidade de armazenamento e transmissão de dados com uma rapidez nunca antes permitida; e tantos outros. Daí a tentativa de trazer, em cada Folhas, debates e buscas recentes para que também você, estudante, conheça esta produção humana contemporânea.

Evidentemente, muitos assuntos importantes foram deixados de fora, pois não é possível, em um livro, independente do número de páginas, cobrir todos os desdobramentos em conteúdos escolares. Os textos foram escritos tomando-se o cuidado com a linguagem matemática, isto é, nada além dos conteúdos matemáticos que você vem aprendendo no Ensino Médio.

Com este livro, esperamos que você possa se apropriar do conhecimento físico, e compreender que ele é e foi historicamente e socialmente construído, bem como, perceber as relações desse conhecimento com as estruturas políticas, econômicas, sociais e culturais da sociedade capitalista. Mas, acima de tudo, que perceba sua beleza filosófica e artística revelada nos grandes princípios e nos conceitos científicos.

Dessa forma, apropriamo-nos das idéias do físico e professor Luiz Carlos de Menezes<sup>1</sup>, colocadas em seu livro “A matéria – uma aventura do espírito”, de 2005, para dizer que consideramos um direito seu poder associar as leis de conservação com as propriedades do espaço e do tempo, cogitar sobre diferentes ordens que emergem e se transformam no domínio da vida e das máquinas, compreender as qualidades dos materiais em sua intimidade quântica, bem como acompanhar o quase místico surgimento das forças da natureza e a evolução do universo.

Finalmente, fechamos o livro com o Folhas “As três Interações Fundamentais”, escrito pelos professores Ezequiel Burkarter e Julia Tieko Fujimoto, uma temática atual para o tratamento das idéias em Física.

<sup>1</sup>Menezes, L. C. de. **A Matéria**. São Paulo: SBF, 2005

*I**n**t**r**O**d**u**c**ã**O*

## Movimento

Há muito tempo, mas muito tempo mesmo, o homem começou a perceber, através da observação da natureza, que alguns eventos apresentavam uma periodicidade incrível, variações cíclicas observadas nos céus, como, por exemplo: as fases da lua, as quais somam aproximadamente 30 dias, isto é, o período de um mês; as estações do ano, que por sua vez somam o tempo de um ano.

Essas observações foram importantes para o homem, pois ajudavam a resolver problemas práticos e garantir sua subsistência, além da necessidade de entender a origem do universo e a própria origem humana.

Inicialmente as explicações para os fenômenos naturais baseavam-se em mitos e crenças, mas com os gregos, vislumbrou-se um entendimento do universo sem o revestimento mitológico. Nessa época os fenômenos celestes eram estudados separadamente dos fenômenos terrestres, uma vez que a cosmologia aristotélica dividia o universo em supralunar e sublunar, separando céu e terra. De fato, Aristóteles foi um dos primeiros, pelo menos dos que conhecemos nos registros em livros, a elaborar uma teoria física criando as primeiras leis do movimento.

Muitos foram os esforços e contribuições para desvendar os fenômenos naturais. No entanto, até a Idade Média, a Ciência conhecida se resumia em: Física aristotélica, Astronomia geocêntrica de Ptolomeu e Geometria euclidiana. Assim é que chegamos ao Renascimento, que se inicia historicamente em 1453.

Mas o Renascimento, como o nome nos seduz a pensar, parece ter contribuído para que uma nova forma de ver e explicar o universo se iniciasse. Nesse cenário, Johannes Kepler, a partir de estudos de Tycho Brahé, concluiu que as órbitas dos planetas eram elípticas e não circulares, nem seus movimentos eram uniformes, mas dependiam da distância do planeta ao Sol. Edmund Halley observou que os cometas situam-se além da Lua, portanto fora da esfera lunar.

Essas constatações contrariavam o que pregava a Ciência medieval, na sua maioria baseada nas idéias de Aristóteles. E para piorar um pouco mais as coisas, Galileu Galilei propôs que o peso dos corpos não tem influência sobre a sua queda, o que contrariou a física dos lugares naturais de Aristóteles.

Pensa que é só isso? Engano seu, pois René Descartes, contemporâneo de Galileu, também imaginava uma ciência que desse conta dos mundos supralunar e sublunar. Em outras palavras, o universo não era separável.

# FÍSICA

Dessa forma, foi possível estudar os fenômenos físicos a partir de uma situação particular, por exemplo, a queda dos corpos. A natureza pode ser descrita por equações matemáticas, a partir de algumas considerações que fazemos dos fenômenos em estudo que resultam no que chamamos de modelo físico. Mas atenção, um modelo não é a natureza ou coisas da natureza, mas o que achamos que a natureza é!

Assim, inicia-se o que se costuma chamar de Ciência Moderna, que, a partir de uma situação particular, pode-se chegar ao geral, tornando possível inaugurar leis universais, isto é, que abrangem a totalidade do universo.

Impossível descrever num texto como este, todas as contribuições de cientistas, sejam eles conhecidos ou não, que com seus estudos, em cada época, possibilitaram entender um pouco o mundo físico. Da mesma forma, é impossível descrever os muitos erros e acertos, avanços e retrocessos, tão próprios da atividade científica, que conduziram a construção pela humanidade desse monumento que é o conhecimento científico.

Galileu e contemporâneos viveram numa sociedade que transitava do feudalismo para o capitalismo comercial, sendo este último, fruto das grandes navegações do século XVI, as quais permitiram o descobrimento de novos continentes e a formação de um mercado mundial, levando o comércio a longas distâncias e contribuindo para a formação de uma nova classe econômica: a burguesia.

A ampliação da sociedade mercantil e a conjuntura econômica, cultural e social da época derrubaram dogmas da Igreja e permitiram que Galileu adotasse o modelo heliocêntrico de Nicolau Copérnico (1473-1543), ousando observar sob a mesma ótica corpos celestes e terrestres, separados na física aristotélica.

A instalação do novo cenário foi possível porque Galileu utilizou-se de um telescópio, cujas observações contribuíram para sua ousadia. Você já deve ter ouvido o velho ditado que diz “fatos são fatos e contra fatos não há argumentos!”.

Mas apesar dos fatos e da sua ousadia, não foi possível a Galileu e a seus contemporâneos, romperem totalmente com o pensamento da época. No entanto, o palco estava pronto para que Isaac Newton (1642-1727) completasse o que Galileu, Descartes e outros, não conseguiram realizar, isto é, encontrar as leis que submeteriam céu e Terra à mesma descrição matemática. É isso que a Gravitação de Newton consegue: a primeira grande unificação da Física, submetendo céu e terra a mesma lei.

*I**n**t**r**O**d**u**c**ã**o*

Também Newton identificou as quantidades transferidas na interação entre objetos e observou que a soma dessas quantidades se mantém entre as partes do sistema que interagem, qualquer que seja esse sistema. Essa percepção levou-o a descobrir que as quantidades de movimento como grandezas que se conservam, mesmo quando, aparentemente, parece estar tudo mudando.

Os fundamentos da mecânica de Newton estão registrados na obra “*Philosophie naturalis principia mathematica – Principia*”, de 1687, que pode ser considerada como um marco na história do conhecimento científico, pois apresenta a unificação das leis da mecânica, as quais descrevem o movimento dos corpos sob a ação de forças, elevando a Física ao status de Ciência no século XVII. A síntese de Newton foi possível, conforme já mencionamos, pelo fato de muitos terem se preocupado com o estudo dos fenômenos naturais e, também, pela da interação com outros pesquisadores da época.

Hoje, no **estudo dos movimentos**, a mecânica de Newton, ainda é importante, visto que está intimamente ligada às questões externas ao meio científico, como: as guerras, o comércio e até os mitos e religiões. Por isso, para compreender toda essa produção humana, é preciso colocá-la num contexto mais amplo, dentro da história da humanidade.

Além disso, esse estudo permite a compreensão dos fenômenos presentes no seu cotidiano: o caminhar até a escola, andar de bicicleta ou deslizar sobre patins, o jogo de futebol, as jogadas com bolinhas de gude, o jogo de sinuca e tantos outros. Mas também o movimento de projéteis e dos automóveis, o movimento dos planetas em torno do Sol ou da Lua em torno da Terra, o equilíbrio dos corpos em um meio fluído ou o seu movimento dentro de uma piscina.

Para essa compreensão é importante o conhecimento de entes físicos, como as quantidades de movimento (o *momentum* de uma partícula) e a energia, as quais permitem estudos que vão desde a colisão de bolas de gude até a compreensão de processos que envolvem a cosmologia atual. Esses entes físicos carregam naturalmente as idéias de posição, tempo e massa.

Para tanto, são indispensáveis as idéias de Conservação do *Momentum* e de Conservação da Energia, dois princípios extremamente importantes para o entendimento dos fenômenos físicos. Não importa o que aconteça, nas colisões ou explosões, quando objetos se aproximam e colidem, ocorrendo fragmentação ou não desses objetos, a quantidade de movimento é sempre conservada. Em outras palavras, a quantidade de movimento de antes da colisão e depois da colisão é sempre a mesma.

Da mesma forma, os cientistas perceberam que, como a quantidade de movimento, a energia também se conserva. O Princípio da Conservação da Energia, desenvolvido no âmbito da Termodinâmica, é uma das mais importantes leis da natureza e, talvez, o mais belo dos

princípios. Sabe qual é o problema? A energia apresenta um tipo de dupla personalidade, ou melhor, muitas personalidades, aparecendo de diversas formas, ou se preferir, com muitos disfarces: cinética, química, potencial, calor, etc.

E ainda, a importância do conceito de força, definida por Newton como a variação temporal da quantidade de movimento, o impulso, o que conduz a Segunda Lei de Newton. As idéias de matéria (massa) e espaço, bem fundamentadas, permitem a compreensão da Primeira Lei de Newton.

Também é possível, dentro desse campo de estudos, a compreensão do movimento dos fluídos (líquidos e gases), os quais estão presentes até mesmo em você. Por exemplo, o movimento do sangue no corpo. Também é possível, o estudo dos movimentos oscilatórios, os quais podem levar ao estudo do caos.

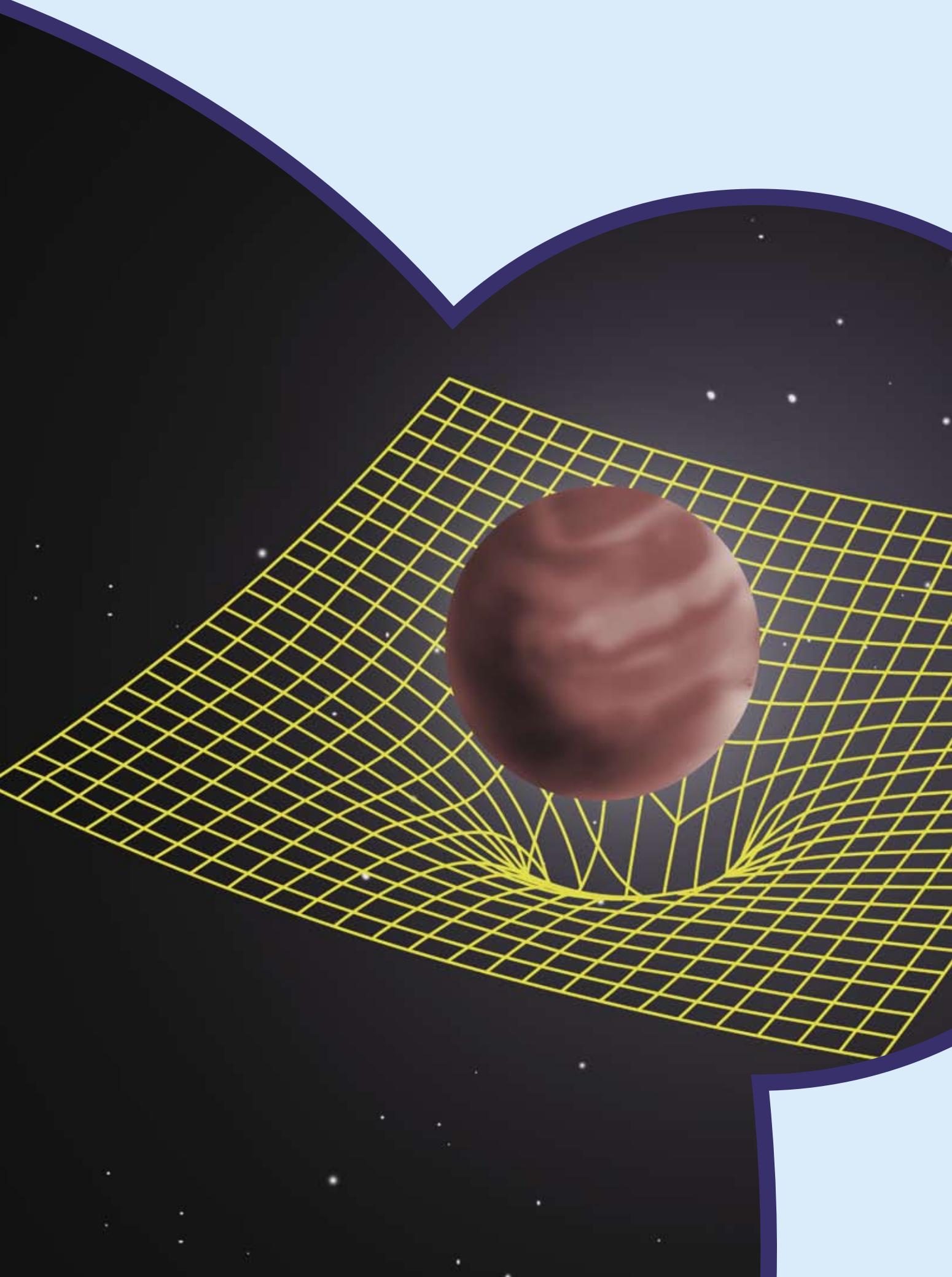
Como você já deve ter percebido, muitas são as possibilidades de tratamento dentro do **estudo de movimentos**. No entanto, não foi possível neste livro tratar de todas essas possibilidades, nem era nossa pretensão fazê-lo. O que fizemos foi escolher alguns conteúdos que consideramos importante para a construção do seu conhecimento. E assim, produzimos alguns textos, os quais chamamos de Folhas, para que você tenha a oportunidade de conhecer, com o apoio de seus professores, a beleza das teorias científicas.

A Profª Julia Tieko Fujimoto escreveu o Folhas “Gravitação Universal”, relacionando o texto com a disciplina de História ao discutir o contexto da construção da Lei da Gravitação de Newton. Para entender o modelo copernicano de universo, buscou-se na Geometria Analítica, disciplina de Matemática, o entendimento das elipses. A autora faz uma introdução à Relatividade de Einstein, numa tentativa de compreender o campo gravitacional dos buracos negros.

A Primeira Lei de Newton está presente no Folhas “Descrição clássica dos movimentos: inércia e *momentum*”, o qual busca na História a compreensão do contexto de produção da obra newtoniana. A Filosofia permite a compreensão do método newtoniano para encontrar as leis do movimento. O texto analisa, utilizando-se da alegoria da “Alice no País do Quantum”, criada por Robert Gilmore, o Princípio da Incerteza de Heisenberg.

Para falarmos sobre o movimento de projéteis, o Profº Kleber Sebastião Juliani produziu o Folhas “Trajetórias”. O projétil é um martelo, o que permitiu o relacionamento do conteúdo físico com a disciplina de Educação Física. O modelo matemático para a descrição do lançamento do martelo exigiu uma relação com a Matemática, ou seja, alguns conceitos presentes na trigonometria. Ainda, discutiu-se o Princípio da Mínima Ação, o qual nos permite compreender porque essa trajetória é parabólica e não uma outra qualquer.

F  
Í  
S  
I  
C  
A

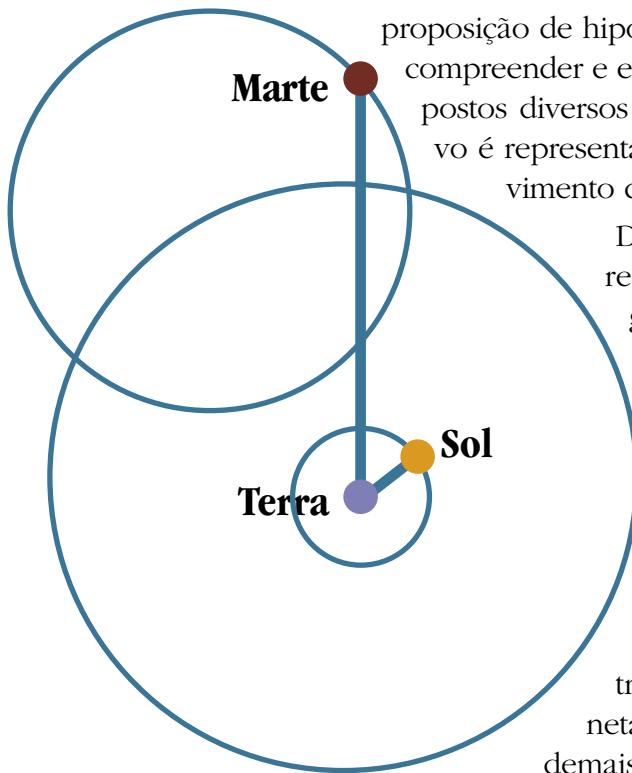


# GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

■ Julia Tieko Fujimoto<sup>1</sup>

**A**parentemente, ao passar por um campo gravitacional muito forte, a luz tem a sua trajetória modificada.

**Existiria um campo gravitacional, suficientemente forte, a ponto de aprisioná-la?**



■ Modelo do Sistema de Ptolomeu.  
www.if.usp.br

O fascínio do homem pelo espaço cósmico levou-o a observações, à proposição de hipóteses, a arquitetar desenhos geométricos a fim de compreender e explicar o movimento dos astros. Assim, foram propostos diversos modelos, que são criações humanas, cujo objetivo é representar a realidade, neste caso, o sistema solar e o movimento dos astros.

Dentro desses modelos que tentaram (e tentam) representar o universo, há dois mais conhecidos: o geocêntrico, que adota a Terra como o centro do Universo, e o heliocêntrico, para o qual o Sol é o elemento central.

Ptolomeu (100-178) criou o modelo que deu origem à teoria geocêntrica e permitia entender o que vemos todos os dias: o nascer e o pôr do sol. O Universo de Ptolomeu se estende desde a Terra até as estrelas, onde uma série de corpos esféricos, os Orbes, se encaixavam uns nos outros. Nesses corpos esféricos se encaixavam os planetas. Na última esfera estariam fixas as estrelas. Os demais espaços seriam preenchidos por éter.

Seu modelo perdurou por muito tempo, apesar de bastante complexo com seus epiciclos, deferentes, equantes, além dos artifícios geométricos. Descrevia, para sua época, com precisão, os movimentos dos corpos celestes, e podia-se prever eclipses e a existência de alguns planetas.

O tripé teórico constituído pela Física aristotélica, pela Astronomia geocêntrica de Ptolomeu e pela Geometria euclidiana, era praticamente toda a ciência conhecida até o Renascimento. Entretanto, desde o início da era cristã, o saber grego foi aos poucos sendo esquecido na Europa, principalmente a partir do Concílio de Nicéia, e substituído por um Cristianismo dogmático. (Adaptado de PONCZEK. In: ROCHA, 2002, p. 31).



## ATIVIDADE

1. No modelo de Ptolomeu, a última esfera era chamada de firmamento. Por que ela possuía esse nome?
2. Seu modelo era baseado na física Aristotélica e foi assumido como verdadeiro pela igreja ao longo da Idade Média. Seria esta a razão para que a Terra ocupasse o centro de seu Universo? Justifique sua resposta.

Na Idade Média, período compreendido entre o século V (ano 476 – Fim do Império Romano) e o século XV (ano 1453 – Queda de Constantinopla), a organização econômica era o feudalismo. A Igreja, também um feudo, tinha grande poder. Deus era o centro do pensamento medieval, por isso o estudo dos fenômenos físicos passava, naturalmente, por Ele.

Aos poucos, o homem medieval buscou novas formas de entender o mundo em que vivia e o domínio cristão sobre o conhecimento começou a diminuir. Muitos fatores contribuíram para que isso acontecesse, dentre os quais podemos citar: as cruzadas, que ocorreram durante os séculos XI, XII e XIII, contribuindo para colocar jovens do oriente em contato com jovens do ocidente; a expansão dos moinhos e o desenvolvimento do comércio.



## PESQUISA

1. Pesquise em livros de História e História da Ciência, revistas científicas e até mesmo na Internet, sobre o Feudalismo. Quais eram as características da sociedade feudal? Qual o papel dos senhores feudais? E o dos servos?
2. Durante a Idade Média, o modo de pensar e a maneira de conhecer o mundo estavam ligados, principalmente, à fé. Santo Agostinho (354-430), um filósofo cristão, dizia: *Credo et Intelligam* ("Para conhecer é preciso antes crer"). São Tomaz de Aquino (1225-1274), também cristão, procurava conciliar a filosofia grega com a filosofia cristã. Como a Igreja explicava os fenômenos físicos?
3. Busque novamente na História: a influência do domínio árabe na Península Ibérica, ocorrida entre o final do século VIII e o início do século XIV, contribuiu com novas formas de pensar e conhecer o mundo: a) Como era a cultura intelectual e a técnica desses povos? b) Qual o papel das universidades criadas por eles na irradiação do conhecimento? c) Que contribuição trouxe o estabelecimento das rotas comerciais para que ocorresse a transferência do conhecimento grego do Oriente para o Ocidente?

A partir do século XV, dá-se o processo de estruturação de uma nova ordem econômica e social, resultado do desenvolvimento do comércio. A nobreza ainda detinha grande ascensão social junto à aristocracia, porque ainda era grande proprietária rural. Já a nova classe que surgia com o comércio, a burguesia, apesar de próspera, não gozava do mesmo prestígio social. Podemos dizer que a ascensão do comércio constitui-se no início do que seria a sociedade capitalista, tal qual a conhecemos hoje.

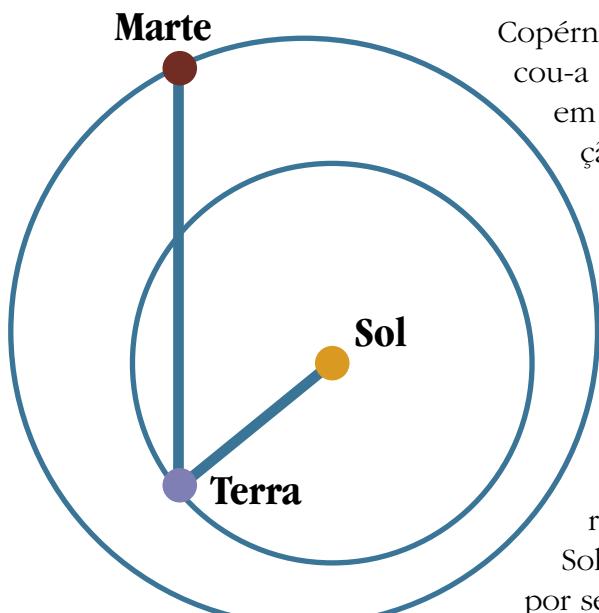
A navegação, os descobrimentos de novos continentes, as trocas de mercadorias, a criação de bancos, a circulação de bens e dinheiro geraram o surgimento de uma nova classe social: a burguesia, que se opõe, naturalmente, ao poder dos príncipes e reis medievais, bem como aos dos cardeais da Igreja. É o renascimento (...) (Adaptado de PONCZEK. In: ROCHA, 2002, p. 31).

O Renascimento provoca modificações no pensamento europeu em todos os campos, inclusive no científico. É assim que, no século XVI, Copérnico (1473-1543), a partir dos estudos sobre o modelo de Aristarco de Samos (310-230 a.C.) e por considerar o modelo de Ptolomeu muito difícil, propôs um novo modelo. No seu Universo, o Sol ocupava o centro, pois pensou que por ser o único astro com luz própria do sistema, seria o único que teria condições de iluminar todos os demais corpos celestes. Imaginou que todos os planetas moviam-se em torno do Sol, o que facilitava a determinação de suas órbitas.

Renascimento ou Renascença significa renovação da vida ou vida nova. O termo é consagrado para designar um período de história, mas não deixa de ser inexato, porque entre a Idade Média e a Idade Moderna não houve solução de continuidade, nem propriamente volta aos estudos greco-romanos, mas apenas evolução no pensamento humano, devido à revolução comercial, aos descobrimentos e às descobertas. Em todos os setores da atividade intelectual, havia precedentes medievais: de fato, Aristóteles fora, na Idade Média, um guia do pensamento cristão.

Os eruditos helenistas bizantinos, exilados depois da queda de Constantinopla, também contribuíram à difusão dos estudos clássicos, na Itália principalmente, onde foram acolhidos e para onde trouxeram manuscritos e bibliotecas. De fato, a Antiguidade estava mais “viva” no Oriente do que no Ocidente; o Renascimento foi uma aceleração na evolução do pensamento humano.

Coube ao cônego polonês Nicolau Copérnico refutar a teoria geocêntrica de Ptolomeu e estabelecer sobre observações e cálculos a teoria heliocêntrica que revelava ser o sol o centro de um sistema do qual a Terra é apenas um satélite. O famoso livro de Copérnico, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, foi dedicado ao Papa. Mas a Igreja declarou a teoria heliocêntrica herética, por estar em desacordo com as suas doutrinas, proibindo a sua divulgação em 1616; só no século XIX veio a ser revogada esta sentença. (Adaptado de: CARVALHO, 1996, 61-93)



■ Modelo do Sistema de Copérnico.  
www.if.usp.br

Copérnico destronou a Terra do centro do Universo, colocou-a como mais um dos planetas. Ordenou os planetas em relação ao Sol a partir de suas distâncias em relação a ele. Dessa forma, a Terra já não ocupava uma posição de destaque, sendo somente a terceira dessa ordenação.

Determinando estas distâncias, Copérnico utilizou-as para explicar as diferenças entre os períodos de revolução dos planetas, que é o tempo que o astro leva para circundar o Sol, e concluiu que quanto mais longe do Sol, maior o tempo para completar sua revolução. Assim, Júpiter completa uma revolução em doze anos, pois está mais afastada do Sol, Marte em dois anos, a Terra em um ano e Mercúrio, por ser o mais próximo do Sol, completa em três meses.



## DEBATE

1. Bom, aqui cabe uma questão: Se quase 1200 anos antes que Copérnico, Aristarco de Samos já havia proposto um modelo no qual o Sol ocupava o centro, então por que ele não foi aceito já naquela época?
2. O que era o Índex? Por que a Igreja colocou o livro de Copérnico “Das Revoluções dos corpos celestes”, que tratava do seu modelo, no Índex?

Ainda hoje a idéia de que a Terra é o centro do Universo continua presente. O texto de Salvador Nogueira, colocado na seqüência, mostra uma pesquisa realizada nos Estados Unidos que retrata o fato. Leia-o e procure responder à atividade proposta.

### Prisioneiros de Aristóteles

Preparem-se para pegar em armas, camaradas! A revolução copernicana ainda não acabou. Dúvida? Pergunte a Jon Miller. Ele é o responsável pelo Centro de Comunicações Biomédicas, em Chicago, Estados Unidos, órgão que conduz periodicamente pesquisas para avaliar a alfabetização científica da população daquele país. Seus últimos resultados mostram que um em cada cinco americanos ainda acha que o Sol gira em torno da Terra.

E, se isso soa inacreditável, saiba que o “privilegio” não é exclusivo dos eleitores de George W. Bush. Pesquisas semelhantes feitas em meados dos anos 1990, em países como Alemanha e Reino Unido, apontam para a mesma coisa. Entre os alemães, 16% afirmaram que o Sol girava em torno da Terra. Entre os britânicos, 19% dos entrevistados compartilhavam dessa convicção. Nos países em desenvolvimento, a coisa não deve ser melhor. Ou seja, a luta pela revolução definitivamente não acabou.

Ptolomeu baseou seu modelo do Universo no velho cosmo grego, summarizando nas idéias de Aristóteles. (Adaptado de NOGUEIRA, 2005)



## ATIVIDADE

1. O modelo de Ptolomeu ainda pode ser usado em casos especiais, como no caso da navegação, quando é mais simples postular a Terra como referência. Discuta com seus colegas por que é mais fácil para as pessoas, em geral, adotarem o modelo geocêntrico.
2. Faça um desenho representando cada modelo. Existem semelhanças entre o sistema geocêntrico e heliocêntrico? E há diferenças?



■ Tycho Brahe (1546-1601).  
Fonte: <http://en.wikipedia.org>

Embora divergissem no elemento central, os geocêntricos e heliocêntricos tinham um aspecto em comum: as trajetórias dos planetas, para ambos, eram circulares.

Posteriormente, o astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546-1601) propôs um sistema que era um híbrido entre os modelos de Ptolomeu e de Copérnico: a Terra estaria no centro do Universo, com o Sol girando em torno dela, mas os outros planetas estariam orbitando em torno do Sol.

As descobertas do Renascimento nos setores científicos não despertaram nas massas o interesse que acolheu o surto literário e as realizações artísticas. Mas as técnicas artesanais e as técnicas científicas foram aos poucos se aproximando do século XVI e Francisco Bacon foi um dos primeiros a ter consciência da significação histórica que teria o papel da ciência no mundo moderno, tendo sido um dos criadores do método experimental e indutivo.

Como era na ordem natural das coisas, coube à Astronomia o maior aproveitamento imediato das novas aplicações práticas das matemáticas, tomadas como base principal das ciências.

Coube ao nobre dinamarquês, Tycho Brahe, esclarecer os pontos incompreendidos da astronomia copernicana. Sua obra era principalmente de observações sistemáticas e muito precisas; aceitando a hipótese de Copérnico sobre rotação e movimento orbital dos planetas, admitiu que a órbita pudesse ser oval.

Seu sucessor foi Kepler, que também descobriu as três regras que regem a elipse, o foco, as áreas e o tempo dos planetas ao redor do sol.

(Adaptado de: CARVALHO, 1996, 61-93)

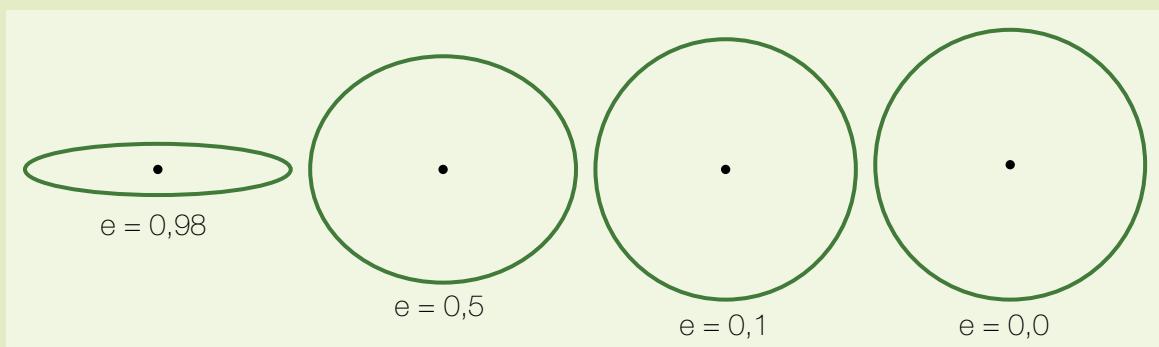
### Então cabe uma pergunta: Você sabe o que é uma elipse?

O quadro colocado na seqüência mostra a representação e as características principais de uma elipse.

#### Representação de uma elipse, com os focos F1 e F2, seu eixo maior A e eixo menor B

A excentricidade de uma elipse ( $e$ ) é dada por:  $e = F/A$

Observe as seguintes elipses com suas respectivas excentricidades:



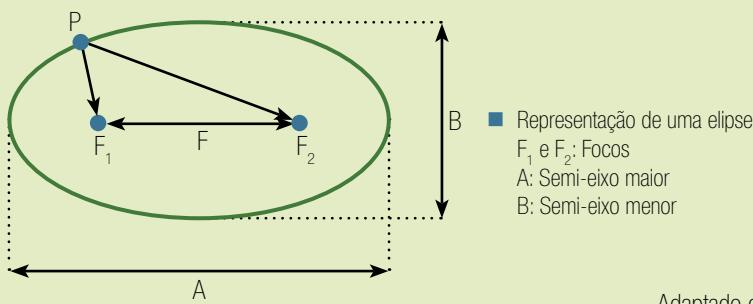
Quanto mais próxima de zero o valor da excentricidade, mais próxima de uma circunferência a elipse se torna, até que, quando  $e = 0$ , teremos uma circunferência.

As excentricidades das elipses descritas pelas órbitas dos planetas do Sistema Solar variam de 0,009 para Netuno até 0,25 para Urano. Como as excentricidades são muito próximas de zero, as órbitas dos planetas são quase circulares, o que fez com que a maioria dos astrônomos acreditasse que a órbita fosse realmente circular.

A tabela abaixo mostra as excentricidades das órbitas dos planetas de nosso Sistema Solar:

Planeta	Mercúrio	Vênus	Terra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Netuno	Plutão*
e	0,2	0,07	0,02	0,09	0,05	0,06	0,05	0,009	0,25

\*A partir de 24 de agosto de 2006, Plutão deixa de ser considerado um planeta por decisão da International Astronomical Union (IAU), na XXVI Assembléia Geral da entidade ([www.iau.org](http://www.iau.org)).



Adaptado de: CANALLE, 2003.

Johannes Kepler (1571-1630), astrônomo alemão, foi assistente de Tycho e, com os dados deste, aperfeiçoou o modelo copernicano, sintetizando os resultados em três leis, conhecidas como as leis de Kepler.

Ao tentar encontrar uma curva que se ajustasse aos dados obtidos pelas pacientes observações de Tycho, referentes ao planeta Marte, Kepler verificou que, apesar de muito próxima da circunferência, a figura geométrica que mais se aproximava dos dados era a elipse.

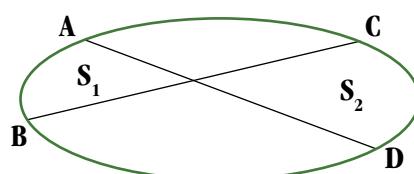
Assim, chegou à lei das órbitas, modernamente enunciada como a primeira lei:

**“Todo planeta descreve uma órbita elíptica, com o Sol ocupando um dos focos”.**

Kepler verificou também que, quando os planetas estão mais próximos do Sol, eles estão com maior velocidade. Na figura 1, o planeta desenvolve maior velocidade entre A e B do que entre C e D. Assim, se um planeta gasta um tempo  $t_1$  para ir de A até B e, um tempo  $t_2$  de C até D, então as áreas  $S_1$  e  $S_2$  são iguais, assim como os tempos  $t_1$  e  $t_2$ .



■ Johannes Kepler (1571-1630)  
Sistematizou o conhecimento da mecânica celeste da sua época em três leis que ficaram conhecidas como leis de Kepler. Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/bib/>



■ Fig. 1: Representação da Lei das Áreas de Kepler.

Dessa forma, a segunda lei pode ser enunciada como segue:

**“A reta que une o Sol e um planeta ‘varre’  
áreas iguais em tempos iguais”.**

A terceira lei de Kepler afirma que:

**“A razão entre o quadrado do período da órbita do  
planeta (símbolo T) e o cubo do raio médio (símbolo r)  
de sua órbita é uma constante”.**

Isso quer dizer, simplificadamente, que quanto mais longe do Sol estiver o planeta, maior será o seu período de revolução, independente da massa do planeta. Kepler, na realidade, “matematizou” a observação de Copérnico, como mostra a equação 1:

$$\frac{T^2}{r^3} = K \quad (1)$$



## ATIVIDADE

Apesar de Kepler introduzir as primeiras relações matemáticas descrevendo o movimento dos planetas, segundo Marcelo Gleiser, físico brasileiro e professor de astronomia, os elementos de seu sistema correspondiam ainda a uma manifestação da fé religiosa: Deus, todo poderoso, era o Sol, no centro, o Filho era representado pela esfera das estrelas fixas e o Espírito Santo era responsável pelos movimentos celestes. Para Kepler, os planetas mais externos moviam-se mais devagar porque o poder do Sol diminuía em proporção inversa à distância.

Responda: Kepler é “heliocentrista”, ou seja, ele tirou o caráter divino da Terra. Mas, por que, mesmo assim, os elementos do seu sistema ainda mantinham o misticismo religioso? Qual a razão de seu conflito?

Faltou muito pouco para Kepler conceituar “força gravitacional”. Mas havia três questões fundamentais que instigavam o ambiente cultural da época.

**O que causava a queda dos objetos próximos à superfície terrestre?**

**Qual a relação entre os movimentos dos planetas e o dos corpos próximos à superfície da Terra?**

**Quem viria a tratar satisfatoriamente dessas questões?**

No século XVII nasce Isaac Newton, em 1643 segundo o calendário gregoriano. Em 1661, inicia seus estudos em Cambridge, onde o ensino centrava-se na filosofia aristotélica. O importante, no entanto, não foi a data de nascimento, mas o fato de que Newton nasceu em berço esplêndido, pois pôde utilizar os trabalhos, não só de Galileu, mas de outros pioneiros da ciência moderna, como Kepler, que morreria doze anos antes, e Descartes, que trabalhava ativamente na Holanda.

Em 1666, uma grande peste assolou a Grã-Bretanha, obrigando o Trinity College a fechar as suas portas, levando-o a refugiar-se em sua propriedade em Woolsthorpe. Foi nesse *annus mirabilis* (ano dos milagres) que Newton intuiu que uma maçã ou um objeto qualquer caindo um pouco acima da superfície terrestre e a Lua orbitando em torno da Terra tinham algo de muito importante em comum: a mesma força as “puxava” para o centro da Terra. A correlação da órbita lunar com a aceleração da maçã ou do objeto implicava numa lei do inverso do quadrado das distâncias que seria aplicável, não apenas a corpos situados próximos da superfície terrestre, mas também se estendia a corpos celestes distantes como a Lua. Todas as partículas que compõem a Terra combinavam-se para atrair tanto uma maçã situada a apenas alguns palmos acima da sua superfície, como a Lua, situada a centenas de milhares de quilômetros, com uma força que cairia com o quadrado inverso das distâncias do centro da Terra.

Essas fantásticas descobertas vieram à lume primeiramente em 1684-1685, na obra *De Motu Corporum in Gyrum* (Sobre o Movimento dos Corpos em Rotação) e de forma definitiva em 1687, no livro *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, brevemente conhecido como os *Principia* e tido por muitos como a maior obra científica de todos os tempos.

No *De Motu*, Newton mostrou a um de seus poucos amigos, o astrônomo Edmond Halley, não só que uma órbita elíptica implicava, necessariamente, numa força inversamente proporcional ao quadrado das distâncias em direção a um dos focos da elipse, mas também que a recíproca era verdadeira: uma lei inversamente proporcional ao quadrado implicava em órbitas, circulares, elípticas, parabólicas ou hiperbólicas, a depender das velocidades iniciais dos corpos. O tratado demonstrava também as duas últimas leis de Kepler (lei das áreas e lei do quadrado dos períodos) e de como um projétil arremessado próximo da superfície terrestre descreveria uma trajetória parabólica. Estava assim unificada a “ciência” dos movimentos dos corpos terrestre e celeste, por uma única lei matemática: *A matéria atrai matéria na razão direta de suas massas e na razão inversa do quadrado das distâncias que as separam.*

(Adaptado de PONCZEK. In: ROCHA, 2002, p. 104-105).

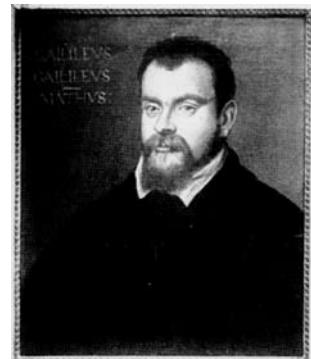
O abandono definitivo das teorias aristotélicas se iniciaria com um italiano de Florença, Galileu Galilei (1564-1642), que foi punido pelas autoridades da Inquisição. Mas quando morreu, havia deixado o legado de sua obra descrito no seu “Diálogo dos Dois Sistemas do Mundo”, no qual um aristotélico e um copernicano dialogam sobre o que seus adversários temiam e o que os impediam de anunciar. Desaparecia Galileu no ano que Isaac Newton (1642-1727) nasceu. E seria Newton quem proporia a lei da gravitação com a qual explica os movimentos dos planetas, dos cometas e dos satélites conhecidos.

A Lei da Gravitação Universal é expressa matematicamente por:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad (2)$$

onde  $F$  é o módulo da Força que atua entre dois corpos de massas  $m_1$  e  $m_2$ ,  $d$  é a distância entre os corpos e  $G$  é a Constante de Gravitação Universal que atualmente vale  $6,67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$ .

Para Newton, as trajetórias dos planetas em torno do Sol independentemente de suas massas, assim como a aceleração da gravidade na su-



■ Galileu Galilei (1564-1642) Físico, matemático, astrônomo italiano. Foi condenado pela igreja católica por defender as idéias copernicanas. Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/bib/>

perfície da Terra. Ao que parece, foi isso que sugeriu a Newton que a gravidade que faz as maçãs caírem da macieira e a força centrípeta dirigida para o Sol tinham a mesma causa: uma interação mútua que ocorre entre dois corpos quaisquer, denominada Força Gravitacional.

Você também já deve ter lido ou escutado alguém falar, em algum lugar, que Sir Isaac Newton formulou a Lei da Gravitação Universal ao observar uma maçã caindo.

### **Seria isso possível? Ou seria uma lenda da Física?**

Leia o texto colocado na seqüência e tire as suas conclusões.

Uma lenda na História da Física é a da queda da maçã. Newton tentava entender porque a Lua não se afastava da Terra, na década de 1660, quando estando em um jardim observou uma maçã caindo de uma árvore. A “estória” teria sido inventada por Newton para convencer e tornar aceita sua alegação de que a descoberta da Gravitação Universal ocorreu cerca de 20 anos antes de sua publicação, no *Principia*. Isso ocorreu devido uma contenda entre ele e Robert Hooke pela paternidade da Lei do Inverso do Quadrado ( $1/r^2$ ) e, então, antecipou a descoberta da Gravitação Universal para um período anterior a uma troca de cartas com Hooke.

Hooke, em novembro de 1679, escreveu a Newton apresentando-lhe o seguinte problema: Se um corpo sofre uma atração em direção a um centro, que tipo de curva seria sua órbita, se a atração varia inversamente com o quadrado da distância? Newton não respondeu e, em 1684, Edmund Halley visitou-o e lhe fez a mesma pergunta. Newton teria respondido, que, segundo seus cálculos, era uma elipse, porém não achou os cálculos. Halley insistiu, então, que ele escrevesse seus cálculos. O resultado, após alguns pequenos tratamentos, foi o “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”.

Com uma leitura cuidadosa do livro de Newton e de seus cadernos de notas, L. B. Cohen, um estudioso de Newton, propõe que:

- 1) Newton chegou à Gravitação Universal por uma aplicação de sua Terceira Lei;
- 2) A Terceira Lei só foi formulada por ele no último rascunho do Princípios, por volta de 1685. Logo a história da maçã é falsa, pois teria ocorrido 20 anos antes e;
- 3) Newton aprendeu a tratar trajetórias curvas a partir de um método desenvolvido por Hooke.

(Adaptado de DIAS; SANTOS; SOUZA, 2004, p. 265-266)



## **ATIVIDADE**

1. A partir da equação (2), qual seria a intensidade da força entre dois corpos, ambos de massas muito pequenas e, separadas por uma distância também pequena? Suponha, por exemplo, massa de 1 Kg e distância de 1 m.
2. Como você explica o fato dos corpos e das árvores não saírem voando, apesar do movimento de rotação da Terra?

Mas a teoria de Newton não foi bem aceita em sua época: era difícil entender como a Terra poderia exercer uma força sobre a Lua, se elas não estavam em contato. Como estender o conceito de gravidade, bem conhecido na Terra para corpos do espaço celeste? Como poderia o Sol, apenas pela sua presença, manter os planetas em suas órbitas? Somente mais tarde se introduziu o conceito de campo gravitacional, a partir dos estudos de fenômenos elétricos e magnéticos realizados por Michael Faraday (1791-1867) (ver o capítulo 13 – “Campos eletromagnéticos”).

O mundo na época de Newton, vivia uma transição, pois, com exceção da propriedade rural, quase toda a riqueza estava nas mãos da burguesia. A prosperidade burguesa tornava-a classe dominante, controlando praticamente todo sistema de produção. No entanto, ainda deparavam com a falta de privilégios políticos que a eles eram vetados devido aos entraves que restavam do feudalismo.

O status de nobre ou de gentil homem era inconcebível sem uma propriedade. Na maioria dos países da Europa Ocidental, essa ordem feudal era implícita. No entanto, a obsolescência econômica, que fazia com que os rendimentos dos nobres e cavaleiros fossem ficando cada vez menores, tornava seu único bem econômico inalienável, os privilégios de status e de nascimento. A burguesia não tinha esses privilégios. (Adaptado de: HOBSBAWM, 1977, p.35)

Especialmente na França, a sociedade era dividida em três grandes classes: o clero, os nobres e o povo. Mesmo as classes, internamente, possuíam níveis de poder. Por exemplo, o clero era dividido em clero superior, os que tomavam as decisões e que detinham grandes privilégios, e o clero inferior, representado pelos padres das Igrejas. Por isso, era preciso desafiar a razão e a autoridade dos reis e, é assim que surge, na França, o Iluminismo, um projeto que visava romper com a tradição e construir uma sociedade pautada na razão.

A Lei da Gravitação Universal de Newton, ao unir céu e Terra às mesmas leis, tira do controle celeste de Deus, conforme a interpretação da Igreja. Por isso, passa a ser adotado pelo iluminista Voltaire (1694-1778), que passa a estudar a obra de Newton e, em 1738, publica a obra “Elementos da Filosofia de Newton”, contribuindo para tornar Newton conhecido para além das fronteiras inglesas.

Newton não tem nem pretende ter uma explicação para a origem do universo ou do Sistema Solar. Ele abandona toda tentativa de explicação puramente natural e afirma que a ordem que se observa no Sistema Solar vem da inteligência divina.

Newton não faz nenhum estudo propriamente cosmológico, isto é, sobre o universo como um todo. Ao utilizar a teoria da gravitação, ele assume, sem discussão, que as estrelas estão muito afastadas do Sistema Solar e que, por isso, não é preciso levar em conta sua influência sobre os planetas do nosso sistema. Também assume que as estrelas estão muito distantes umas das outras e que a sua atração é mínima; por isso elas não se aproximam umas das outras. (MARTINS, 1997, p. 89)



## DEBATE

O movimento iluminista utiliza-se das idéias presentes na síntese elaborada por Newton para a construção de sua desejada sociedade racional.

No entanto, o texto anteriormente colocado mostra a análise do historiador das ciências Roberto de Andrade Martins, da Teoria da Gravitação de Newton.

O Newton apresentado pelo historiador era puramente racional?

De fato, tratar os movimentos celestes, a partir da gravitação de Newton, passa a ter o mesmo tratamento racional que os terrestres. O astrônomo inglês Edmond Halley, contemporâneo de Newton, utilizou a formulação matemática da gravitação para os cometas. Assim, conseguiu prever a aparição de um cometa (visto pela última vez em 1682, que julgou ser o mesmo visto em 1531 e 1607) para 1758. O cometa reapareceu conforme previsto, com um pequeno erro em dias. Por isso, ele recebeu o nome de Halley, em homenagem ao astrônomo.

Um grande trunfo da teoria de Newton foi a descoberta do planeta Netuno, antes mesmo dele ser observado. Como o movimento de Urano não coincidia com os cálculos matemáticos, suspeitou-se que um outro planeta (na realidade a sua massa), causasse esta não coincidência entre a teoria e a realidade. Da mesma forma, perturbações na órbita calculada para Netuno apontaram para a existência de mais um planeta, no caso, Plutão, hoje não mais considerado um planeta.

De fato, a massa gravitacional é a propriedade do corpo responsável pela força gravitacional que ele exerce sobre o outro corpo.

Assim, a força que a Terra exerce sobre um corpo em sua vizinhança é dada por:  $F = G \frac{M_T \cdot m_G}{R_T^2}$ , na qual  $M_T$  é a massa gravitacional da Terra,  $m_G$  é a massa gravitacional do corpo em questão e  $R_T$  é a distância entre a Terra e o corpo.

Entretanto, a massa inercial é a propriedade do corpo que mede a sua resistência à aceleração, e pode ser obtida através da segunda lei de Newton, para o movimento, a qual também pode ser expressa pela equação matemática:  $m = \frac{F}{a}$ , na qual  $F$  é a força aplicada no corpo de massa  $m$ , o qual adquiriu uma aceleração  $a$ .

Mas verifica-se, experimentalmente, que as massas gravitacional e inercial de um corpo são iguais, e é por isso que qualquer corpo em queda livre, próximo à superfície da Terra, sofre a mesma aceleração, desprezando-se a resistência do ar. Observe a seguinte demonstração:

a aceleração de queda livre (livre do atrito com o ar), de um corpo nas vizinhanças da superfície da Terra, pode ser obtida por

$$a = \frac{F}{m} = \left( \frac{GM_T}{R_T^2} \right) \frac{m_G}{m}$$

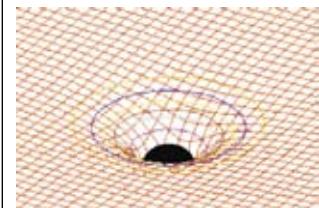
Se a gravidade fosse apenas uma outra propriedade da matéria, como a cor ou a dureza, seria razoável esperar que a razão  $\frac{m_G}{m}$  dependesse de fatores como a composição química do corpo, ou a temperatura do corpo ou outras características físicas do corpo. A aceleração da queda livre seria então diferente para diferentes corpos. O fato experimental, no entanto, é o de a ser igual para todos os corpos. Isto significa que a razão  $\frac{m_G}{m}$  é a mesma para qualquer corpo. Se este for o caso, não há necessidade de manter a distinção entre  $m_G$  e  $m$  e podemos fazer  $m_G = m$ . (Isto corresponde a fazer a razão igual à unidade, o que determina o valor e as unidades de  $G$ , na lei da gravitação universal (TIPPLER, 1995, p.12).

Com a teoria da gravitação, Newton conseguia explicar porque a Lua estava em órbita em torno da Terra e em seu *Principia* ele fez uma ilustração que mostrava como colocar um satélite artificial em torno da Terra.

Para escapar do campo gravitacional da Terra, basicamente, é necessário levar o satélite (através de foguetes) até uma certa altura e depois ser lançado horizontalmente com uma determinada velocidade, chamada velocidade de escape, que lhe permita entrar em órbita. Assim, o satélite estará continuamente sobre a influência da gravidade da Terra e permanecerá em órbita.

Mas, até mesmo a teoria da gravitação de Newton, que conseguira unificar os fenômenos de céu e da Terra, interpretando desde a queda dos corpos até a órbita dos planetas, tinha suas limitações. Durante mais de dois séculos, a teoria de Newton foi suficiente para explicar a maioria dos fenômenos celestes. No entanto, fenômenos que envolvem velocidades próximas a da luz não respeitam os princípios da mecânica newtoniana. Neste caso, é preciso aplicar a teoria da gravitação de Albert Einstein (1831-1879), mais conhecida como Teoria da Relatividade Geral (para diferenciar de sua outra teoria, a da Relatividade Restrita).

Ou seja, a gravitação que com Newton era entendida como uma força atrativa entre massas e instantânea, com Einstein passa a ser concebida como uma propriedade do espaço-tempo não-euclidiano.



■ Curvatura espaço tempo em torno de uma massa formando um campo gravitacional. Fonte: <http://wikipedia.org/wiki/Gravidade>

No espaço-tempo einsteiniano, os corpos não se deslocam mais em linha reta, como no espaço usual, mas segundo geodésicas, que são as linhas mais curtas que ligam um ponto a um outro na esfera. Ou seja, a transição de uma geometria plana (euclidiana) para uma geometria multidimensional (não-euclidiana) provoca uma curvatura do espaço. (Adaptado de RIVAL, 1997, p.117 e p.119)

A teoria de Einstein também previu a existência dos buracos negros, sistemas que absorvem toda a radiação que nelas incidem.

**Mas você sabe o que é um buraco negro?**



■ <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap060427.html>

A Figura ao lado mostra um buraco negro. Essencialmente, trata-se de uma região do espaço dentro da qual a matéria caiu e nada pode escapar; dentro de um buraco negro a gravidade é tão poderosa que nem mesmo a luz pode se mover para fora. O termo “negro” é altamente apropriado, pois se nem a luz pode emergir de dentro de um buraco negro, ele deve ser uma entidade inteiramente negra; o termo “buraco” também é adequado, uma vez que ilimitadas quantidades de matéria ou energia podem cair nele e, neste sentido, é como um abismo sem fundo. (Adaptado de NICOLSON, 1981, p. 129)

Muito da Física nasceu da Astronomia, necessidadeposta pelas grandes navegações. Foram as observações dos astros celestes que conduziram aos trabalhos de Galileu, Copérnico, Kepler, Tycho, Newton e outros. Mas, no final do século passado, o caminho se inverteu, e foram os avanços na Física teórica que permitiram o desenvolvimento nas áreas de Astrofísica e Cosmologia.

A teoria da gravitação de Einstein foi capaz de prever o desvio de luz de algumas estrelas, ao passar próximo ao Sol. Segundo a teoria de Einstein, esse desvio não é causado pela força de atração, mas como o espaço em volta do Sol está deformado, o raio de luz apenas acompanha a curvatura existente. A confirmação experimental de que o Universo é curvo só foi possível em 1987.

De acordo com Hallyday (1994), fazendo uma retrospectiva sobre gravitação, os estudos de Galileu, a teoria de Newton e a de Einstein que prevê duas possibilidades para o futuro, a expansão infinita do Universo até um certo limite e depois, a contração do mesmo até voltar ao estado inicial, a história da gravitação está longe de chegar ao fim.

Lembra-se de nosso questionamento inicial? Será que agora você pode respondê-lo? Aparentemente, ao passar por um campo gravitacional muito forte, a luz tem a sua trajetória modificada.

**Existiria um campo gravitacional, suficientemente forte, a ponto de aprisioná-la?**

## Referências

- CANALLE, J. B. G.. O Problema do Ensino da Órbita da Terra. In: **Revista Física na Escola**, v.4, n.º 2, p. 12-16, 2003.
- CARVALHO, D. de. **História geral** – Idade Moderna. Vol. 3. Rio de Janeiro: Record Cultural, 1996.
- DIAS, M. C.; SANTOS, W. M. S.; SOUZA, M. T. M. A Gravitação Universal. In: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 3, p. 257-271, 2004.
- HOBSBAWM, E. J.. **A Era das Revoluções**. 19. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2005.
- MARTINS, R. de A.. **O Universo** – Teorias sobre sua origem e evolução. São Paulo: Editora Moderna, 1997. Coleção Polêmica.
- NICOLSON, I. **Gravidade, Buracos Negros e o Universo**. Rio de Janeiro: Editora Francisco Alves, 1981.
- NOGUEIRA, S. **Prisioneiros de Aristóteles**. In: [www1.folha.uol.com.br/folha/pensata/ult3193u3.shtml](http://www1.folha.uol.com.br/folha/pensata/ult3193u3.shtml). Acesso em 09/10/2005.
- ROCHA J. F.. **Origens e Evolução das Idéias da Física**. Salvador: EDFBA, 2002.
- TIPLER, P. **Física**. Vol.2. 3 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

## Obras Consultadas

- HALLIDAY, David. RESNICK, Robert. WALKER, Jearl. **Fundamentals of Physics**. John Wiley & sons, Inc. and Smart Books, Inc. Fourth edition, 1994.
- RIVAL, M. **Os Grandes Experimentos Científicos**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1997.
- SINGER, P. **O Capitalismo** – sua evolução, sua lógica e sua dinâmica. São Paulo: Moderna, 1987.
- TIPLER, P. **Física**. Vol.3. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.



# DESCRIÇÃO CLÁSSICA DOS MOVIMENTOS: INÉRCIA E MOMENTUM

■ Marina de Lurdes Machado<sup>1</sup>



"Com licença, este é o Instituto de Mecânica?" Alice perguntou, mais para puxar conversa. Pelo cartaz já sabia que era.

"Sim, minha cara", disse o mais alto e impressionante dos dois. "Eu sou um Mecânico Clássico do Mundo Clássico, e estou visitando meu colega, aqui, que é um Mecânico Quântico. Qualquer que seja seu problema, tenho certeza de que um de nós poderá ajudá-la. É só esperar até que terminemos nossas jogadas."

Ambos se viraram para a mesa de bilhar. O Mecânico Clássico mirou com cuidado, considerando as ínfimas partes de todos os ângulos envolvidos. Finalmente, deu a tacada bem à vontade. A bola bateu e voltou numa impressionante série de ricochetes e acabou por entrar em colisão com a bola vermelha, que foi parar com precisão dentro de uma das caçapas. "Ai está", exclamou com satisfação ao tirar a bola de dentro do buraco. "É assim que se faz, está vendo? Observação cuidadosa e exata, seguida de ação precisa. Procedendo assim, você obtém o resultado que escolher."

Seu companheiro não respondeu, tomou seu lugar na mesa e fez um movimento vago com o seu taco. Após suas experiências anteriores, Alice não ficou surpresa ao ver a bola disparar em todas as direções ao mesmo tempo, e não havia lugar na mesa onde ela pudesse dizer com certeza que a bola não havia estado, embora não pudesse dizer igualmente onde a bola havia estado. Após um intervalo, o jogador olhou dentro de uma das caçapas, enfiou a mão e tirou a bola vermelha.

"Se não se importa que eu faça uma observação", disse Alice, "parece que você joga de forma muito diferente."

"É isso mesmo", respondeu o Mecânico Clássico. "Odeio quando ele dá tacadas desse jeito. Gosto que tudo seja feito com muito cuidado e precisão e que todos os detalhes sejam planejados antecipadamente. Contudo", acrescentou, "imagino que você não tenha vindo aqui para nos ver jogar bilhar, por isso, pode nos dizer o que é que quer saber."

Robert Gilmore

**Alice está vivendo uma nova aventura, agora no País do Quantum. O que a intriga tanto?**

<sup>1</sup>Instituto de Educação do Paraná Prof. Erasmo Pilotto - Curitiba - PR



■ Selo alemão distribuído em 1993 em comemoração ao 350º aniversário de Isaac Newton. Em vermelho, no canto superior esquerdo, está a expressão matemática para o Impulso. No canto superior direito a data de nascimento e morte de Newton, segundo o calendário Gregoriano. Mas há outro calendário, o Juliano, no qual a data de nascimento e morte de Newton é (1642-1727). Fonte: <http://tigre.ucr.edu/dipen/stamps/newton>

Em 1686, em Cambridge, na Inglaterra, Isaac Newton publica a primeira edição da obra *Principia mathematica philosophiae naturalis*, o *Principia*, onde estão colocados os fundamentos da mecânica. Essa mecânica nos permite entender como e porque os objetos e carros se movem, as marés, as trajetórias dos planetas ao redor do sol. Enfim, nos possibilita entender nosso mundo macroscópico cotidiano, nosso mundo humano.

Newton nasceu em 1642, segundo o calendário Juliano, em Woolsthorpe, cidade localizada no noroeste da Inglaterra. Nesse país, na segunda metade do século XVII, se concentrava a maior parte da atividade comercial e manufatureira da Europa. Era o início do capitalismo manufatureiro, que se utilizava da formação de um mercado mundial decorrente das grandes navegações. Esse modo de produção se oficializa quando empreários empregam um certo número de artesãos que

passam a produzir em massa para os novos mercados que surgiam e derrubavam barreiras locais e regionais para além das fronteiras europeias.

A Inglaterra também havia se utilizado da reforma desencadeada no século XVI por Martinho Lutero (1483-1546), na Alemanha. O rei inglês Henrique VIII, para lutar contra a proibição de seu segundo casamento, funda a Igreja Anglicana. Essa igreja aceitava a idéia de que a verdade a respeito da natureza estava ao alcance do homem. Esse foi um dos fatores que contribuiu para a migração de muitos cientistas e técnicos de outras regiões da Europa para a Inglaterra, pois lá a ciência encontrou um espaço para se desenvolver, contrariando o dogmatismo católico.

Mas, uma obra do porte do *Principia* não poderia ser obra de uma única pessoa. Ao contrário, carrega uma síntese de algo que já se conhecia ou se pensava conhecer. Esse parece ser um dos grandes méritos da obra de Newton.

De fato, parece que o próprio Newton dizia que se pôde chegar longe é porque havia se apoiado em ombros de gigantes. No texto Gravitação Universal, escrito pela Professora Júlia Tieko Fujimoto, você poderá encontrar muitas das idéias de alguns desses gigantes, na verdade, homens que buscavam solucionar os problemas do seu tempo, que contribuíram para que Newton elaborasse a sua teoria gravitacional.

Mas para a elaboração do Princípio da Inércia, sem dúvida alguma, os trabalhos de Galileu Galilei (1564-1642) merecem destaque especial.

Na época de Galileu acreditava-se na necessidade da ação contínua de um motor (uma ação sobre o corpo) para que o movimento existisse, uma idéia que perdurava desde Aristóteles.



## ATIVIDADE

### **Uma experiência interessante ...**

Utilize de um plano inclinado (pode ser um pedaço de madeira levantado de um dos lados) e um objeto qualquer (pode ser uma bolinha de gude).

- Inicialmente mantenha a inclinação do plano positiva, isto é, ascendente. Solte o objeto. O que acontece com a velocidade desse objeto? E se a inclinação for descendente, a conclusão seria a mesma?
- E se o plano for mantido com inclinação nula? Qual seria o comportamento de sua velocidade? Discuta com seus colegas.

Elabore um relatório da experiência com suas conclusões.

Ao realizar experiências com o plano inclinado, Galileu constatou que a gravidade produzia aceleração em um corpo. Essa aceleração, contrariamente ao que se pensava, não dependia da velocidade. Conclui que sob a ação de uma força constante, no caso a força da gravidade, o espaço percorrido por um corpo é proporcional ao quadrado do tempo empregado e que esse corpo se desloca de modo que a sua velocidade, em todo instante, é proporcional ao tempo empregado.

**Existiria a possibilidade do movimento de um corpo sem a ação contínua de um motor?** Pois foi o que Galileu parece ter percebido com suas experiências.

Galileu não chegou a Lei da Inércia tal qual é conhecida hoje. Na verdade ele viveu em um mundo que transitava entre as idéias aristotélicas e a fé religiosa, tão presentes ainda em sua época, e a nova física que parecia contrariar o que se acreditava até então. Mas, o terreno estava preparado para que, Issac Newton, nascido no ano que Galileu morreu, fizesse a primeira grande unificação da Física. Essa unificação reuniu fenômenos terrestres e celestes, que passam a ser regidos pelas mesmas leis.

A análise de algumas partes do *Principia* talvez nos ajudem a compreender o “Instituto da Mecânica”.

No prefácio de Newton presente na primeira edição do *Principia*, de maio de 1686, está o esboço do que seria a nova mecânica.

Já que os antigos consideravam a ciência da mecânica da maior importância na investigação das coisas naturais, e os modernos, rejeitando formas substanciais e qualidades ocultas, têm-se esforçado para sujeitar os fenômenos da natureza às leis da matemática, cultivar a matemática, neste tratado, no que ela se relaciona à filosofia. Os antigos consideravam a mecânica sob dois aspectos: como racional – a qual corre rigorosamente de demonstração – e prática. À mecânica prática pertencem todas as artes manuais, das quais a mecânica tomou seu nome. Mas como os artesãos não trabalham com rigor perfeito, diferencia-se a mecânica da geometria, o que é perfeitamente precioso é chamado geométrico, o que é menos rigoroso é chamado mecânico. No entanto, os erros não estão na arte, mas nos artesãos. (Newton, 1686).

Os artesãos tinham técnicas especiais para a produção de bens, mas não utilizavam a matemática. Essa era a crítica de Newton, para o qual a descrição de linhas retas e círculos pertence à mecânica. Isso não era possível sem a matemática.

Durante muito tempo o movimento dos corpos eram atribuídos a qualidades dos corpos.

Os efeitos sobre os corpos eram decorrentes dessas qualidades. Mas não se sabia de onde ou como os corpos recebiam essas qualidades.

Coube aos gregos, provavelmente por volta dos séculos VII e VI a.C., o esforço na tentativa de racionalização e busca de afastamento dos mitos. Mas as preocupações eram com o princípio de todas as coisas e a busca da origem e da natureza do universo. No entanto, filosofia e ciência continuam juntas até que a Idade Moderna as separa.

A ciência moderna herdou de seus antepassados, como Galileu e René Descartes (1596-1650), um objeto de investigação e um método para realizá-lo.

■ WILLIAM BLAKE. Newton, 1804-5. Aquarela, 46 x 60 cm; Tate Britain, Londres, Inglaterra. O compasso representa a Geometria e a Matemática.

Galileu foi levado a renegar suas convicções por um tribunal da Inquisição, mas este poder arbitrário já começava a declinar; surgiam mudanças econômicas e políticas que anunciam o turbilhão de transformações que não parou mais, com a ampliação da sociedade mercantil e com as revoluções industriais. René Descartes (1596-1650), filósofo seu contemporâneo, também propunha que a mesma ciência desse conta dos mundos supralunar e sublunar, separados na tradição aristotélica. É justo tomar Galileu e Descartes como marcos da modernidade e do que se conhece hoje como ciência (Adaptado de: MENEZES, 2005, p.18).

Não se deve encarar Descartes como um gênio isolado, que tenha surgido como um fungo matinal, da noite para o dia. Descartes foi preparado por um vasto movimento, que mergulha suas raízes na própria Idade Média e se estende até o século XVI. Este movimento ficou conhecido como Humanismo Renascentista.

No seio da cultura ocidental, o Humanismo (segunda metade do séc. XIV e primeira metade do séc. XV) e a Renascença (segunda metade do séc. XV e século XVI) constituem dois momentos de um mesmo processo que se notabilizou por buscar, sublinhar e favorecer tudo o que aperfeiçoasse o homem intelectualmente e praticamente. Nele, o indivíduo é visto como “valor absoluto” a natureza como seu “reino”, a história como sua “criação” e a arte como expressão de sua “superioridade” sobre os demais seres da criação. Assim, vai desaparecendo o complexo humano de inferioridade.

Enquanto um ser que contempla e age, o homem é semelhante a Deus. A razão torna-se a instância privilegiada de busca de sentido para as coisas em geral. A fé vai perdendo sua exclusividade e a filosofia declara sua autonomia diante da teologia. Pela primeira vez, desde os primórdios do cristianismo, as questões filosófico-científicas são tratadas sem apelo ao elemento religioso.

( Adaptado de: HRYNIEWICZ, 2001, p.353).

De fato, Descartes, que em latim se chamava Cartesius, viu uma época em que se aperfeiçoavam técnicas de fabricação de instrumentos e objetos de precisão. O comércio, em pleno desenvolvimento, daria origem ao capitalismo comercial e o poder da Igreja começava a entrar em decadência. Ele também viveu a Revolução Científica propiciado pelo Renascimento, e foi influenciado pelo pensamento de Copérnico (1473-1543), Johannes Kepler (1571-1630) e Galileu. Esse último foi o primeiro a usar a observação empírica e a matemática para descrever os fenômenos da natureza. Por isso não podemos enxergar Descartes como um gênio isolado.



## ATIVIDADE

Na tradição aristotélica o universo era dividido em duas partes: supralunar, formado pelos corpos que ficam acima da esfera da lua e, sublunar, formado pelos corpos que ficavam abaixo da esfera da lua. Agora, céu e terra passam a ser sujeitas às mesmas leis.

Que consequências trouxe para a cosmologia a geometrização do espaço e a matematização dos fenômenos físicos propostos por Galileu?

Descartes procurou estabelecer um método para se chegar ao conhecimento de todas as coisas. Ao instituir o racionalismo, ele instaura a dúvida. É preciso contestar, evitar a pressa e a prevenção. Os fenômenos deveriam ser divididos em tantas parcelas quantas fossem possíveis e necessárias, buscando a melhor solução possível. A condução de um estudo deve ser por ordem de pensamento, iniciando pelos mais simples e fáceis, para galgar, aos poucos, outros degraus, até o mais composto. Em seguida, deve-se efetuar as relações das partes com o todo de forma a chegar ao mais geral possível do fenômeno.

Apesar de acreditar que existem algumas coisas impossíveis de serem investigadas devido ao limite imposto pela nossa intuição, as quais considera que devem ser abandonadas pois seria um trabalho supérfluo e vão, Descartes acredita no racionalismo para se chegar ao entendimento da maioria dos fenômenos. Para ele as razões acima seriam suficientes para que nada ficasse oculto sem que fosse revelado. Veja o que ele coloca no Discurso do Método:

"Essas longas séries de razões, todas simples e fáceis, que os geômetras costumam utilizar para chegar às suas mais difíceis demonstrações, tinham-me dado a oportunidade de imaginar que todas as coisas com a possibilidade de serem conhecidas pelos homens seguem-se umas às outras do mesmo modo e que, uma vez que nos abstemos apenas de aceitar por verdadeira qualquer uma que não o seja, e que observemos sempre a ordem necessária para deduzi-las umas das outras, não pode existir nenhuma delas tão afastada a que não se chegue no final, nem tão escondida que não se descubra". (René Descartes)



- René Descartes (1596-1650). Publicou em francês, em 1637, o *Discurso do Método*, famoso tratado de Filosofia e Matemática. Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

O método de Descartes, o método cartesiano, coloca a sua crença na matemática. É um método analítico e reducionista. Ao dividir o todo em partes, recorre à análise e estuda cada parte do todo para conhecer a sua natureza, por isso é analítico. Ao decompor o fenômeno complexo em seus termos mais simples e considerá-los mais fundamentais do que o próprio fenômeno, torna-se reducionista.

Newton encontra uma sociedade já preparada para aceitar o ato de conhecer já não tão dependente de Deus. O homem de sua época também já estava acostumado aos mecanismos mecânicos que funcionavam com precisão, como por exemplo os relógios.

A mecânica racional de Newton será a ciência dos movimentos que, conforme ele mesmo diz, resultam de quaisquer forças, e das forças exigidas para produzir quaisquer movimentos, rigorosamente propostas e demonstradas. As forças são as causas de todos os movimentos.

Essa passa a ser a melhor forma de filosofar: ao analisar um fenômeno selecionado, devemos deduzir as forças da Natureza e as leis de forças mais simples. A constituição do resto virá por síntese, ou seja, reunir todos os dados encontrados e integrá-los num todo consistente e coerente.

Dessa forma, o fenômeno (o todo) selecionado acaba por não ser compreendido de uma forma orgânica, isto é, como se as partes não tivessem ligação entre si.

O método cartesiano analítico de Descartes e a concepção mecanicista da natureza dele derivado, influenciaram a ciência que se desenvolveria a partir daí. A crença na certeza do conhecimento científico proporcionado pela nova maneira de fazer ciência só seria abalada na virada do século XX, apesar de ainda hoje ser muito difundida a crença na verdade infalível da ciência, refletida na cultura ocidental.

Bom, vamos voltar ao *Principia*. A obra começa com oito definições, seguidas das leis do movimento (três axiomas). Vejamos algumas dessas definições:

"Definição I: A quantidade de matéria é a medida da mesma, obtida conjuntamente a partir de sua densidade e volume". (Newton, 1990, p.1)

Observe que Newton define a quantidade de matéria como o produto da densidade e do volume. Para ele essa quantidade seria a massa, a qual é conhecida através do peso de cada corpo, pois a massa é proporcional ao peso. Na verdade quando ele fala em densidade, está referindo-se ao peso do corpo, conforme consta no apêndice histórico e explicativo do *Principia*, feito por Florian Cajori.

"Definição II: A quantidade de movimento é a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria". (Newton, 1990, p.2)

Para Newton o movimento do todo é a soma dos movimentos de todas as partes. Assim, se dobrarmos a quantidade da matéria de um corpo, mantendo sua velocidade, o movimento é duplo. Se dobrarmos a quantidade da matéria de um corpo e, também dobrássemos a sua velocidade então, seu movimento seria quádruplo. Esse movimento se dá, sempre, na direção da velocidade do corpo.

Em seguida, Newton define a força de inércia, a *vis insita*.

"Definição III: A *vis insita*, ou força inata da matéria, é um poder de resistir, através do qual todo o corpo, estando em um determinado estado, mantém esse estado, seja ele de repouso ou de movimento uniforme em linha reta". (Newton, 1990, p.2)

O corpo possui esta força em virtude de sua massa que é uma quantidade intrínseca da matéria, uma característica particular desse corpo.

Após a definição de inércia, Newton procura mostrar a distinção entre a inatividade da massa ou inércia da massa e a força de inatividade ou de inércia, colocando que a força de inércia em nada difere da inércia da massa, a não ser pela nossa maneira de concebê-la.

"Essa força [a *vis insita*] é sempre proporcional ao corpo ao qual ela pertence, e em nada difere da inatividade da massa, a não ser pela nossa maneira de concebê-la. A partir da natureza inerte da matéria, um corpo não tem seu estado de repouso ou movimento facilmente alterado. Sob esse ponto de vista a *vis insita* pode ser chamada, mais significativamente, de inércia (*vis inertiae*) ou força de inatividade. Mas um corpo só exerce essa força quando outra força, imprimida sobre ele, procura mudar sua condição". (Newton, 1990, p.2)

Para Newton, a inércia da massa e a força são idênticas enquanto poder de resistência que um corpo apresenta quando uma ação externa à ele tenta mudar o seu estado de repouso ou movimento.

**Mas o que seria uma força imprimida sobre um corpo?**

"Definição IV: Uma força imprimida é uma ação exercida sobre um corpo a fim de alterar seu estado, seja de repouso, ou de movimento uniforme em linha reta". (Newton, 1990, p.3)

Para Newton, a força imprimida representa a ação externa sobre um corpo, mas ela não permanece no corpo quando termina a ação.



## ATIVIDADE

- Se após a ação cessa a força imprimida sobre um corpo então, como manter o novo estado adquirido decorrente dessa ação?
- O que aconteceria a um corpo se ele fosse desprovido de massa inerte?

No *Principia* seguem-se outras definições que não trataremos neste texto e, após elas, Newton enuncia os axiomas ou leis do movimento. O primeiro axioma, conhecido como Lei da Inércia ou Primeira Lei de Newton, diz:

"Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele". (NEWTON, 1990, p. 15)

Essa propriedade do corpo de resistir a mudança de estado de movimento chama-se inércia. Ou seja, é por inércia que um corpo tende em permanecer em repouso e, é também por inércia que um corpo tende a permanecer em movimento retilíneo e uniforme. Ou seja, para mudar o estado de um corpo é necessário uma força externa a ele que vença a sua inércia.

Durante muito tempo se acreditou na necessidade de uma ação (que em Física chamamos de força) para manter um corpo em movimento. Isso parece óbvio quando consideramos, por exemplo, uma mesa: para tirá-la de um determinado lugar e transportá-la para outra é necessário uma ação, isto é, empurrá-la. Mas ao cessarmos a ação a mesa também pára.

### Então a Lei da Inércia contraria o óbvio?

Bom, vamos agora pensar em outras situações como por exemplo um jogo de futebol: um jogador chuta uma bola exercendo uma força sobre ela. Mas, o pé do jogador não continua na bola após o chute e, mesmo assim, ela continua em movimento por um certo tempo.



## ATIVIDADE

Num jogo de sinuca a bola continua em movimento após cessado a ação transmitida pelo taco através da mão do jogador. Pense em outras situações cotidianas e responda:

Por que em algumas situações, mesmo quando acaba a ação da força o movimento não deixa de existir ou permanece durante um certo tempo? Reflita. Discuta com seus colegas.

Lembra-se da experiência do plano inclinado? Galileu conclui que quando não havia descida (plano descendente) ou subida (plano ascendente) não tinha aceleração, ou seja, a velocidade do corpo permanecia constante. Mas, no nosso dia-a-dia, percebemos que o corpo que se movimenta em linha reta acaba parando.

### O que faz com que o corpo pare seu movimento numa superfície horizontal? O que mais deve ser levado em conta?

Ao descrever a preparação necessária para realizar a experiência Galileu fala sobre o polimento das superfícies. Veja o que ele diz, na citação de THUILLIER (1994): “Em uma régua, ou mais exatamente uma viga de madeira, medindo cerca de seis metros de comprimento e com a espessura de três dedos, cavamos um pequeno canal com pouco mais de um dedo, perfeitamente retilíneo; em seguida o guarneçemos com uma folha de pergaminho bem lustrosa, para torná-lo o mais escorregadio possível, e deixamos correr sobre ele uma bola de bronze bem duro, perfeitamente redonda e polida” (GALILEI, Citado por: THUILLIER, 1994, p. 120).

Na verdade o que ele percebeu é que ao deslizarmos um corpo sobre uma superfície surge uma outra força que atua sobre esse corpo que é o atrito. E é justamente o atrito que faz com os corpos param e não a lei que está incorreta. Se não houvesse o atrito, os corpos em movimento retilíneo e uniforme permaneceriam nesse movimento eternamente.

### Mas como medir essa resistência?

A medida dessa resistência do corpo é o seu *momentum*. Para Newton, essa quantidade, denominada por ele de quantidade de movimento, é proporcional a sua velocidade. A massa, cuja propriedade é resistir a mudança do estado de movimento, é a constante de proporcionalidade entre o *momentum* da partícula e sua velocidade.

Assim podemos escrever:

$$Q = m \cdot v \quad (1)$$

Essa quantidade é constante sempre que nenhuma força resultante atue sobre o corpo, isto é, quando a força externa ao corpo é nula.

## Você nada? Pratica remo ou já remou?



Nas interações entre dois objetos sempre ocorre uma mudança no movimento de cada um.

Nadar ou remar, por exemplo, é empurrar a água para trás. Quanto mais água é jogada para trás, mais rapidamente o nadador ou o barco avançam.

Quando afirmamos que um nadador empurra a água para trás e avança para frente e, que quanto mais água ele empurra, maior será a sua velocidade, estamos afirmando que a velocidade do nadador tem uma direção e um sentido enquanto a velocidade da água tem a mesma direção mas sentido oposto. Da mesma forma podemos dizer que a velocidade de um avião tem a mesma direção que a velocidade do ar que ele desloca, porém o sentido de suas velocidades é oposto.

Essas considerações permitem-nos atribuir à quantidade de movimento uma direção e um sentido. Isso porque leva em conta a direção e o sentido da velocidade dos objetos. O *momentum* de uma partícula (ou quantidade de movimento) é uma grandeza física vetorial pois, como a velocidade, necessita de informações a respeito da direção e do sentido além da intensidade para ficar perfeitamente caracterizado.

(Adaptado de: USP/GREF, 4<sup>a</sup> edição, p. 34)

Então, devemos dizer vetor *momentum* da partícula ou vetor quantidade de movimento da partícula. A equação 1 nos permite calcular o módulo desse vetor.



### ATIVIDADE

Imagine a situação: você está no meio de uma pista de patinação, sozinho, parado. Nenhuma força externa atua sobre o seu corpo. A pista é muito lisa, o que o impossibilita de tentar caminhar sobre ela. O que você faria para sair da pista?

Discuta com seus colegas o resultado.

Dentro da teoria newtoniana a posição, a velocidade e a quantidade de movimento de um corpo podem ser determinadas com relativa precisão. Em outras palavras, podemos dizer que qualquer grandeza de movimento de uma partícula pode ser medida e descrita de modo

exato, inclusive sua energia. A medida dessas grandezas podem ser realizadas de forma simultânea sem no entanto interferir no movimento. Também está implícita a idéia de que a partícula em movimento descreve, antes de parar ou atingir um alvo, uma sucessão de pontos que formam a sua trajetória.



Ambos se viraram para a mesa de bilhar. O Mecânico Clássico mirou com cuidado, considerando as ínfimas partes de todos os ângulos envolvidos. Finalmente, deu a tacada bem à vontade. A bola bateu e voltou numa impressionante série de ricochetes e acabou por entrar em colisão com a bola vermelha, que foi parar com precisão dentro de uma das caçapas. "Ai está", exclamou com satisfação ao tirar a bola de dentro do buraco. "É assim que se faz, está vendo? Observação cuidadosa e exata, seguida de ação precisa. Procedendo assim, você obtém o resultado que escolher". (Gilmore, 1998, p.40-41)

Essas idéias mecanicistas carregam a idéia de certeza, de precisão. Ou seja, o universo, tal qual um relógio, funciona com precisão mecânica.

Para a mecânica clássica, a posição e o *momentum* de uma partícula definem o seu movimento. Por isso, essas grandezas físicas são tão importantes para um mecânico clássico. Elas são o que chamamos de condições iniciais ou condições de contorno do fenômeno em estudo.

**E agora, você já consegue imaginar o que tanto intrigou Alice?  
O que diria um mecânico clássico sobre isso diante do mundo subatômico? Fótons, elétrons... qual seria o seu comportamento?**

Como eu já disse, gosto das coisas claras, com a causa sendo seguida pelo efeito, com tudo muito claro e previsível. Para dizer a verdade, muitas coisas que acontecem aqui não fazem o menor sentido para mim, ele murmurou em tom de confidêncial. "Eu saí do mundo clássico só para dar uma voltinha. Lá é um lugar esplêndido, onde tudo acontece com precisão mecânica. A causa é seguida do efeito de uma maneira maravilhosamente previsível, o que faz com que tudo faça sentido e que você saiba o que vai acontecer. E tem mais: os trens estão sempre na hora", acrescentou. (Idem, p. 42)

Felizmente, surgiram alguns mecânicos quânticos que se preocuparam em entender algumas coisas, as quais a teoria newtoniana parecia não ser suficiente para explicar, fenômenos fora do alcance de nosso mundo macroscópico. Dentre esses podemos citar Max Planck (1858-1947), Niels Bohr (1885-1962) e Werner Heisenberg (1901-1976).

Heisenberg, ao estudar as teorias da luz de então, se viu diante de uma situação inusitada: a impossibilidade de medir, com precisão, as propriedades de uma partícula subatômico, como por exemplo, um elétron. Não é a mesma coisa que tratar do movimento de um carro, ou de uma bola de futebol.

Na mecânica de Newton, conhecendo as condições de contorno de um corpo ou partícula (coordenadas de posição e *momentum*) é possível saber, num tempo futuro, onde ele estará. No mundo subatômico essa previsibilidade torna-se uma impossibilidade. Em outras palavras, ao estudar o movimento de elétron não é possível dizer com precisão sua posição e velocidade ao mesmo tempo.

Assim, não é possível determinar a posição e a quantidade de movimento de uma partícula subatômica ao mesmo tempo, ou o tempo do movimento e a energia nesse tempo. Quanto mais certeza se tem de uma medida, mais incerteza se tem da outra. Por isso, o máximo que podemos é recorrer à interpretação probabilística da matéria estudar a probabilidade de se localizar uma partícula ou saber o seu *momentum*, o intervalo de tempo ou a sua energia nesse intervalo de tempo.

Essa impossibilidade de se determinar com precisão as propriedades de uma partícula subatômica é conhecida como Princípio da Incerteza ou da Indeterminação e foi desenvolvido inicialmente pelo físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976), em 1927. Segundo Heisenberg, esse princípio é traduzido matematicamente por:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \quad (2)$$

onde:

$\Delta x$ : incerteza para a medida da posição

$\Delta p$ : incerteza para o *momentum* da partícula

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s é a constante de Planck.

A constante de Planck representa a mínima ação possível de ser colocada na natureza. Essa constante representa o limite entre o mundo clássico e o mundo quântico.

Uma outra formulação para o Princípio da Incerteza formulado por Heisenberg relaciona a incerteza na medida da energia com a incerteza na medida do intervalo de tempo em que essa energia é medida.



■ Heisenberg (1901-1976) – Trouxe grandes contribuições para a Mecânica Quântica.  
Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \quad (3)$$

onde:

$\Delta E$ : incerteza para a medida da energia

$\Delta t$ : incerteza para o intervalo de tempo

### Mas o que querem dizer as expressões acima?

O Princípio da Incerteza de Heisenberg nos coloca diante da impossibilidade de se conhecer simultaneamente a posição e a energia de uma partícula subatômica pois ao se estudar uma dessas partículas acabamos por interagir com ela interferindo e, dessa forma, influenciando na medida. Mesmo que pudéssemos nos aproximar muito da partícula, sua visão se tornaria muito difusa.

O que a (Eq. 2) nos diz é que o produto da incerteza na medida da posição ( $\Delta x$ ) de uma partícula e a incerteza associada ao *momentum* ( $\Delta p$ ) não pode ser inferior a constante de Planck dividida por  $4\pi \left(\frac{h}{4\pi}\right)$ . Da mesma forma, analisando a (Eq. 3), o produto da incerteza na medida do tempo ( $\Delta t$ ) de uma partícula e a incerteza na medida da energia associada a esse tempo ( $\Delta E$ ) não pode ser inferior a constante de Planck dividida por  $4\pi \left(\frac{h}{4\pi}\right)$ .

Assim, quanto mais certeza tivermos na posição da partícula maior a incerteza do seu *momentum* e vice-versa. Ou, olhando para a segunda formulação, quanto mais certeza fosse possível para obtermos a medida do intervalo de tempo maior seria a incerteza na medida de sua energia ou o inverso.

### E agora? Se você fosse Alice o que faria no país do Quantun? Já sabe o que tanto a intrigou?

Os novos rumos da Física no passar do século XIX para o século XX estão aí para nos mostrar que não existe verdade absoluta em ciência e que conceitos e teorias hoje aceitos como verdades no futuro podem estar limitados ou até serem substituídos por outros. O método cartesiano, que tanto influenciou todos os ramos da ciência moderna, ainda pode ser útil. Mas é preciso reconhecer suas limitações.

## ■ Referências

- DESCARTES, R. **O Discurso do Método**. Coleção Ediouro, 1986.
- GILMORE, R.. **Alice no País do Quantum**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.
- HRYNIEWICZ, S. **Para filosofar hoje**. 5<sup>a</sup> Ed. Rio de Janeiro: Edição do autor, 2001.
- NEWTON, Isaac, **Princípios**: princípios matemáticos de filosofia natural. Trad. Triste Ricci...[et.al.]. São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 1990.
- THUILLIER, P. **De Arquimedes a Einstein**: A face oculta da invenção científica. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1994.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESTADO DE SÃO PAULO/USP. GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA/GREF. **Física 1**: mecânica. 4<sup>a</sup> Edição. São Paulo: Edusp, s/d.

## ■ Obras Consultadas

- CARPENTIER, J. LEBRUN, F. **História da Europa**. 1 ed. Trad. Manuel Ruas, ed. Estampa: Lisboa, 1993.
- CARVALHO, D. de.. **História Geral – Idade Moderna**. Vol. 3. Rio de Janeiro: Record Cultural, 1996.

## ■ Documentos Consultados *ONLINE*

<http://tigre.ucr.edu/dipen/stamps/newton.htm> Acesso: 29 ago. 2006.



## ANOTAÇÕES

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

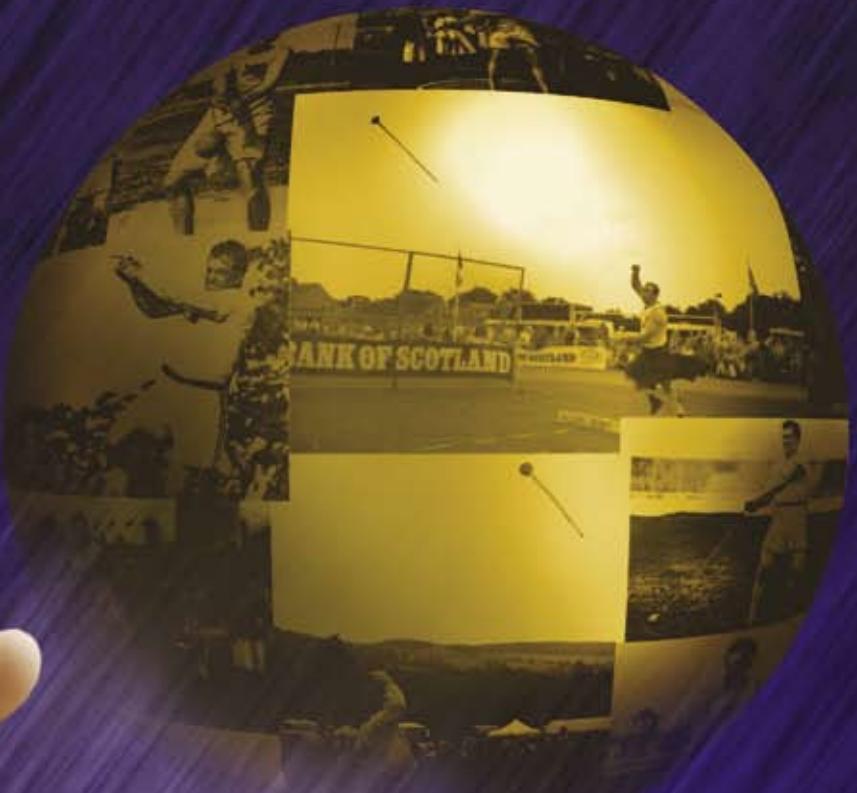
---

---

---

---

---



# TRAJETÓRIAS

■ Kleber Sebastião Juliani<sup>1</sup>



ançamento de martelo, você conhece esse esporte?

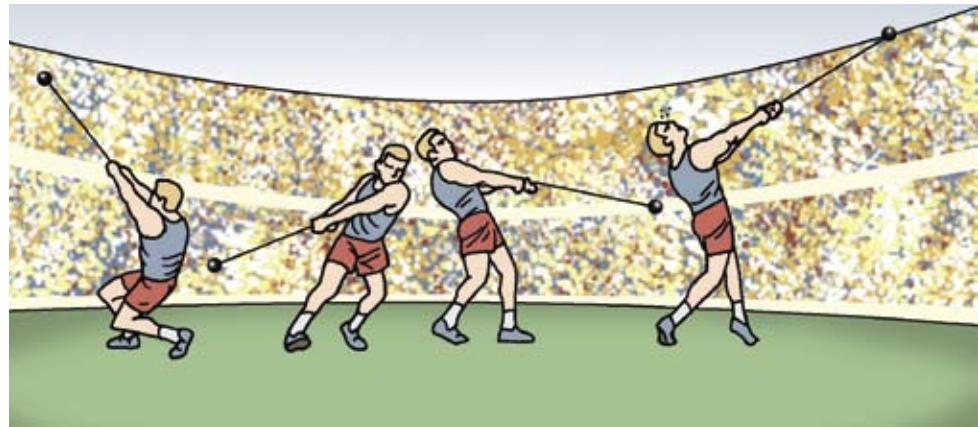
Por que as trajetórias do martelo são sempre em forma de parábola? Comportadas, não?

Por que o martelo, ao ser lançado pelo atleta, não sai “por aí”, dando voltas e mais voltas?



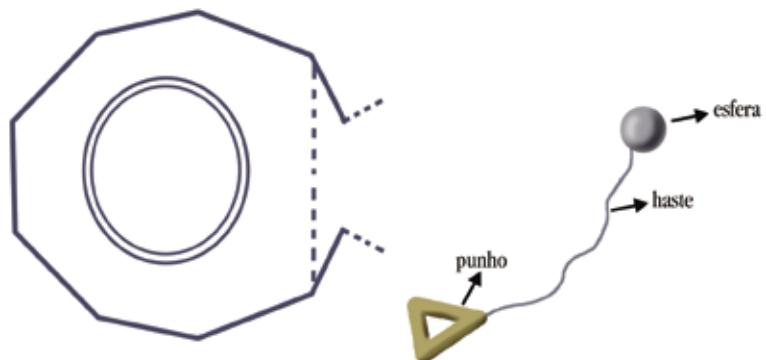
## O lançamento de martelo e as previsões sobre suas trajetórias e deslocamentos

O lançamento do martelo teve suas origens no folclore irlandês, relacionado aos encantos produzidos na utilização da força e destreza por seus heróis. Talvez por influência da origem, os campeões das primeiras competições nessa modalidade foram Irlandeses.



■ Figura 1. Seqüência de posições de um atleta fazendo movimento para lançar o martelo. Adaptado de Técnicas Atléticas, páginas 168 e 169.

Para a realização desse esporte, o atleta precisa girar o martelo, como ilustra a Figura (1), dentro de uma “... gaiola construída com a forma de ‘U’. A abertura de saída deve ter 6m e estar distante 4,2 m à frente do círculo” (Confederação Brasileira de Atletismo, 2004, p. 170). As faces são grades de tela de arame ou corda de fibra natural com no mínimo 7 m de altura. Interno a essa gaiola, existe um círculo de cimento, chamado de anteparo, de onde o atleta não pode sair até finalizar o lançamento e aguardar que o implemento atinja o solo. A Figura (2) mostra o aspecto da gaiola e do martelo utilizados.



■ Figura 2: Modelo de gaiola para martelo e martelo. Adaptado de: Regras Oficiais de Atletismo, 2004. p.171.

Na realização desse esporte, o atleta gira o martelo de três a quatro voltas. Depois disso, o martelo é lançado para que se desloque e caia num determinado ponto do solo. A pontuação será maior quanto maior for o alcance do martelo, desde que o lançamento tenha sido válido.



## ATIVIDADE

Você poderia construir seu próprio martelo. Que tal? O martelo pode ser construído com material simples, um saco plástico e areia.

Com o seu martelo você pode organizar competições com seus colegas e professor. Busque as regras oficiais e discuta.

Pensemos na seguinte situação: um competidor dessa modalidade, visando melhorar seu rendimento, repete por diversas vezes o exercício de soltura. Em cada exercício ele tenta melhorar a qualidade de seu lançamento, mas procura fazer cada um desses exercícios mudando a inclinação (na largada) em relação ao plano horizontal. Ele sabe que deve girar o martelo com “muita força” para ganhar o máximo de velocidade, mas qual será a inclinação para o maior deslocamento?

É certo que esses atletas adquirem habilidades para o desenvolvimento dos exercícios, através dos treinos. Nós, ao contrário deles, faremos aqui uma análise física, utilizando-se da Matemática, a fim de estudar as direções em que as trajetórias poderão se projetar no lançamento do martelo. Mas como faremos isso?

## ■ Velocidades e suas componentes

O modelo que utilizaremos baseia-se numa análise atribuída a Galileu Galilei (1564-1642). Segundo relatos:

“Em suas pesquisas sobre o movimento, Galileu fazia balas de canhão rolarem em pranchas com diferentes inclinações e comparava as distâncias que atingiam ao caírem no chão. Notou que, a partir da borda da prancha, as balas não caiam em linha reta, mas faziam uma curva. Galileu media a distância que elas alcançavam a partir da borda e media o tempo gasto no percurso. A trajetória curva descrita é um tipo de parábola”. (PARKER, 1996, p. 11)

A partir desses estudos sobre o movimento parabólico, Gallieu concluiu que quando um móvel realiza um movimento composto, cada um dos movimentos componentes se realiza como se os demais não existissem.

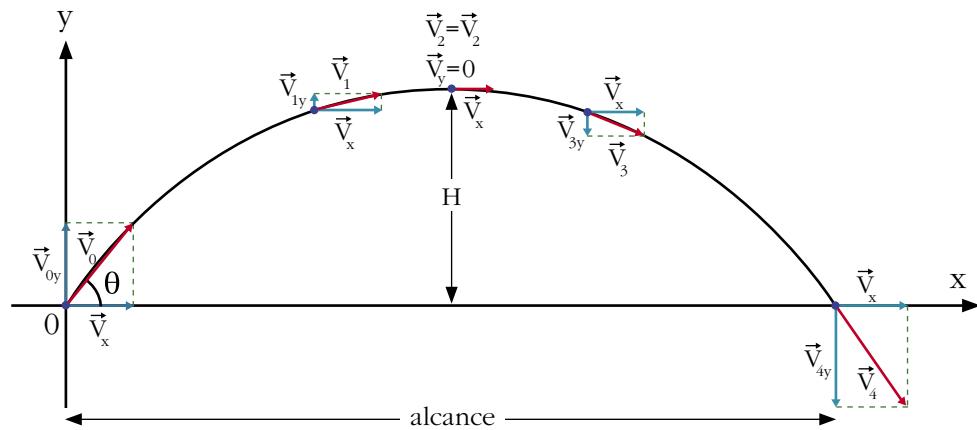
**Você deve estar se perguntando: que história é essa de movimento composto?**

Na verdade, o movimento parabólico que vemos, tanto no caso do tiro de canhão quanto no caso do lançamento de martelo, é resultado de dois movimentos, um na horizontal e outro na vertical.

O que queremos dizer é que consideramos a velocidade de lançamento como sendo o resultado da soma de duas componentes, uma horizontal ( $V_x$ ) e uma vertical ( $V_y$ ). A soma das duas componentes tem como resultado o comportamento parabólico mostrado na Figura (3). Pense em algo que se movimenta para cima e para o lado ao mesmo tempo. As duas velocidades comportam-se de maneira independente.

Na Figura (3), a velocidade de lançamento aparece esquematizada em suas componentes,  $V_x$  e  $V_y$ . Vamos analisar o movimento em relação aos dois eixos: x que está associada à distância atingida pelo martelo e y que está associada à altura atingida pelo martelo.

Mas por que é interessante fazer essa decomposição? Para responder a essa pergunta, analisaremos o comportamento da velocidade em cada eixo.



■ Figura 3: Representação da velocidade de lançamento (em vermelho) e suas componentes (em azul).

Iniciando com x:

- Quais são as forças que agem, para o movimento na horizontal?
- De acordo com a questão anterior, o movimento é uniforme ou uniformemente variado?

Agora para o eixo y:

- O que acontece com a velocidade durante a trajetória na subida? E na descida?
- Existe alguma força agindo no martelo? Qual? Como?



## DEBATE

Discuta com seus colegas e professor as questões anteriores, antes de prosseguir na leitura!

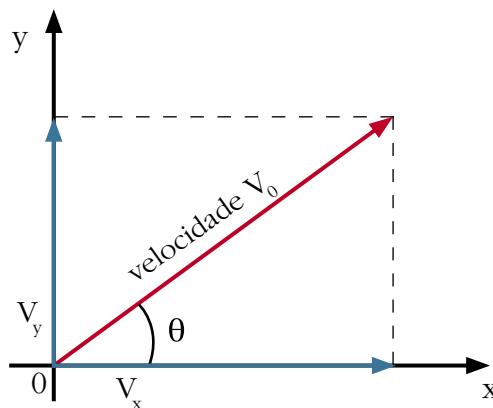
Para o eixo x, como desconsideramos a resistência do ar, a velocidade não varia e, ao longo da trajetória horizontal, temos um Movimento Retilíneo Uniforme (MRU).

Para o eixo y, a vilã é a força peso, ela faz com que a velocidade varie, diminuindo na subida e aumentando na descida. **De que maneira?**

O valor da aceleração da gravidade é em torno de  $9,81\text{m/s}^2$  (variando conforme a altitude), isso significa que a cada 1s, a velocidade aumenta ou diminui  $9,81\text{ m/s}$ , dependendo, é claro, do sentido da velocidade. Em geral, consideramos que a aceleração é constante, assim, chamamos esse movimento de Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV).

### Mas como obter a velocidade em cada eixo?

Na Figura (4), temos a velocidade de lançamento do martelo num gráfico. Note que essa velocidade, representada pela seta vermelha, possui inclinação tanto em relação ao eixo x quanto em relação ao eixo y. As componentes da velocidade são obtidas pela sua projeção sobre esses eixos. É como se buscássemos a sombra da seta vermelha em relação aos eixos. Essas “sombras” estão representadas pelas setas azuis na Figura (4).



■ Figura 4: Projeção da velocidade nos eixos x e y.

Não perca o “fio da meada”, é importante lembrar o objetivo do esporte. O atleta deseja lançar o mais longe possível o martelo, por isso estamos tentando entender quais fatores influenciam nessa distância. Daí a necessidade de entendermos o comportamento da velocidade.

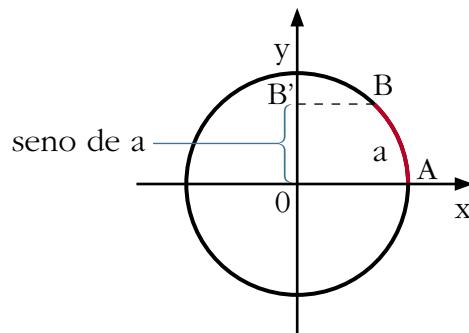
A projeção em relação ao eixo x será chamada  $V_x$ , e é a que permanece constante em nosso estudo. No que diz respeito ao eixo y, a projeção será chamada de  $V_y$ , e é a componente da velocidade associada à altura.

### Mas qual é o valor de cada componente?

Para saber o valor de cada componente precisamos recorrer a um grupo de funções matemáticas chamadas Funções Trigonométricas. Duas delas nos interessam especialmente: a função seno e a função cosseno.

Há registros dessas funções nos estudos realizados por Hiparco (194-120 a.C), estudioso que usava a técnica de medida de arcos através de cordas.

A Figura (5) mostra uma circunferência onde aparece um arco do ciclo trigonométrico **a** com origem em A e extremidade em B. Chamamos de seno do arco **a**, a coordenada de B no eixo Y. Em outras palavras, o seno do arco AB, de medida **a**, pode ser interpretada como o tamanho do segmento de extremidades O e B' (OB').



■ Figura 5: Seno de um arco **a** representado no ciclo trigonométrico.

O eixo OY é denominado eixo dos senos, cada arco sobre o ciclo está associado a um valor nesse eixo por meio da função seno. A medida do arco **a** da Figura (5) é igual ao que, costumeiramente, chamamos de ângulo, em geral representado por uma letra grega. Como o ciclo trigonométrico tem raio igual a 1, o valor da função seno varia de -1 a 1, como na relação a seguir, em que aparece o seno um ângulo  $\theta$  qualquer:  $-1 \leq \text{sen } \theta \leq 1$

Podemos usar o mesmo raciocínio em relação ao eixo X e definir o tamanho da projeção do arco **a** nesse eixo, como o cosseno desse arco. Assim como no caso anterior, o valor máximo da função cosseno é 1.

Essas funções ajudam a relacionar a velocidade de lançamento ( $V$ ) às suas componentes. Se a velocidade de lançamento faz um certo ângulo  $\theta$  com a horizontal, então suas componentes (“sombras”) nos eixos X e Y, como mostra a Figura 4, serão obtidas através das funções seno e cosseno. Essas componentes aparecem nas equações (1) e (2).

$$V_{0x} = V_0 \cos(\theta) \quad (1)$$

$$V_{0y} = V_0 \text{sen}(\theta) \quad (2)$$

### Mas em que o conhecimento das componentes das velocidades ajuda na questão do lançamento do martelo?

No lançamento do martelo, o atleta está preocupado em obter a maior distância. Retomando o trabalho de Galileu:

“Galileu descobriu, através de testes e cálculos matemáticos, que para uma bala atingir uma distância maior, o canhão deveria disparar apontado para o alto com uma inclinação de 45 graus” (PARKER, 1996, p. 11).

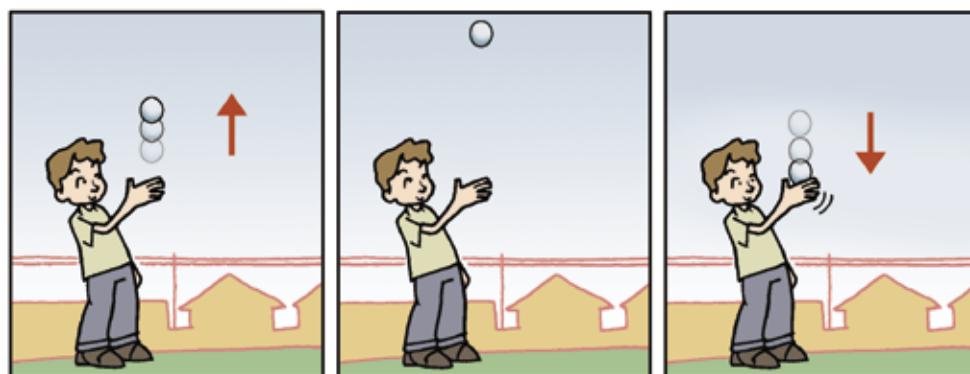
**Então, como obter a maior distância?  
Em que inclinações o alcance será maior?  
Será que o atleta se preocupa com isso?**

Como temos dito,  $V_x$  e  $V_y$  são as porções da velocidade de lançamento ao longo dos eixos x e y. Mas o que faremos com essas velocidades?

Também já foi dito (calma, logo chegam novidades) que, no eixo x (o da horizontal), a velocidade se mantém constante, enquanto que, no eixo y (o da vertical), ela sofre variações devido ao efeito da aceleração da gravidade. Vamos analisar o comportamento da velocidade na direção vertical.

## ■ Obtendo o alcance

O que acontece quando você atira uma bolinha de gude verticalmente para cima? A seqüência mostrada na Figura (6) ilustra o comportamento da velocidade na subida e na descida.



■ Figura 6: Comportamento da velocidade num lançamento vertical.

A bolinha sobe até certa altura e depois começa a cair. Mas qual é a velocidade no topo da trajetória?

Se a bolinha sobe e desce, significa que, no topo, a velocidade é nula. Você pode verificar isso fazendo alguns lançamentos. Vamos usar esse fato para calcular o tempo de subida e descida do nosso martelo.



### DEBATE

Por que estamos interessados no cálculo deste tempo? Discuta com seus colegas e professor sobre o tempo em que se manifesta a trajetória. Observe que estamos lidando com o tempo de subida e descida, independentemente do que acontece no eixo X.

Considerando a aceleração da gravidade constante, o comportamento da velocidade na subida é descrito pela Equação (3):

$$V_y = V_0 \operatorname{sen}(\theta) - gt \quad (3)$$



## PESQUISA

A Equação (3) é aplicada no estudo de movimentos em que a aceleração é constante, note que essa equação é uma aproximação do comportamento da velocidade no eixo Y. Repare em dois detalhes importantes: a) fizemos uso da componente vertical da velocidade de lançamento, você sabe por quê? b) a aceleração da gravidade, g, aparece com sinal negativo. Qual o significado desse sinal nessa equação? Faça uma pesquisa buscando entender o significado físico desses fatores.

Considerando que no topo da trajetória a velocidade é nula e que o tempo de subida é igual ao tempo de descida, podemos usar a Equação (3) para calcular o tempo total em que ocorre a trajetória do martelo. Lembra-se do debate proposto a pouco? Baseando-se nessas discussões você mesmo pode fazer isso. Esse resultado aparece na Equação (4):

$$t = \left( \frac{2V_0}{g} \right) \operatorname{sen}(\theta) \quad (4)$$

No eixo X, o comportamento do alcance é aproximado por meio de uma equação do movimento retilíneo uniforme (MRU). Assim escrevemos o alcance (A) na horizontal por meio da Equação (5):

$$A = V_0 \cos(\theta) t \quad (5)$$



## DEBATE

Aparentemente a Equação (5) é um tanto diferente da equação característica do MRU ( $x = x_0 + v_0 t$ ). Discuta com seus colegas e professor sobre as diferenças entre a Equação (5) e a equação do MRU.

Substituindo o tempo da Equação (4) na Equação (5), obtemos a Equação (6), que é uma aproximação para o alcance na horizontal em função da velocidade de lançamento e do ângulo de inclinação neste lançamento.

$$A = \left( \frac{2V_0^2}{g} \right) \operatorname{sen}(\theta) \cos(\theta) \quad (6)$$

Note que o aspecto da Equação (6) não é muito atraente. Por vezes a elegância de uma teoria ou de um modelo está na simplicidade e abrangência de suas equações, em geral, quando mais simplificadas forem as formulações, maior é a beleza da teoria.

Para simplificar um pouco a Equação (6), vamos recorrer a uma propriedade do produto de funções trigonométricas que você pode obter em qualquer texto sobre funções trigonométricas:

$$2 \sin(\theta)\cos(\theta) = \sin(2\theta)$$

Fazendo uso dessa igualdade na Equação (6), obtemos uma expressão para o alcance, com uma “carinha” melhor, como é mostrado na Equação (7):

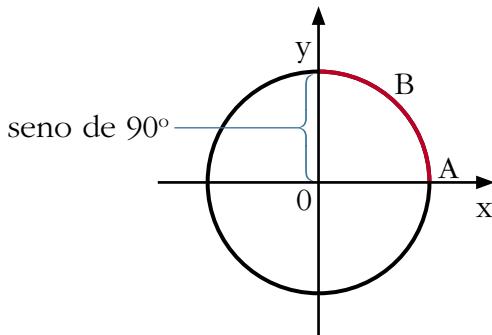
$$A = \left( \frac{V_0^2}{g} \right) \sin(2\theta) \quad (7)$$

Agora temos uma expressão mais simples que representa a nossa aproximação do alcance do lançamento do martelo.

Lembra-se do resultado atribuído a Galileu para o tiro do canhão? Será que a Equação (7) pode nos ajudar a confirmá-lo?

Lembre-se de que havíamos dito que o valor máximo da função seno é 1. Mas que valor de  $\theta$  nos fornece esse máximo?

O ciclo trigonométrico da Figura (7) nos dá uma idéia do ângulo que maximiza a função seno. Note que o valor do seno do arco correspondente a 90 graus é justamente 1. Como o argumento da função seno na Equação (7) é  $2\theta$ , podemos dizer que o máximo do alcance se dá quando a inclinação for de 45 graus, como apontou Galileu para o caso de canhões.



■ Figura 7. Seno de noventa graus, obtido no ciclo trigonométrico.

Para obter o melhor alcance, o atleta, em seus treinamentos, deve buscar lançamentos com inclinações de 45 graus.



## PESQUISA

A inspeção da Equação (7) mostra ainda que o alcance depende também do quadrado da velocidade de lançamento. No caso do martelo, o atleta deve combinar uma boa velocidade de lançamento com uma inclinação o mais próximo possível de 45 graus. Faça uma pesquisa a respeito do trabalho do atleta na tentativa de se obter uma maior velocidade de lançamento.

Só para refletir sobre as considerações que fizemos sobre o lançamento do martelo, leia o texto colocado na seqüência.

Havíamos suposto que o ar, através do qual o martelo se movimenta, não exerceia qualquer influência sobre o seu movimento, uma hipótese razoável para velocidades baixas. Entretanto, conforme a velocidade cresce, a discrepância entre os nossos cálculos e o movimento real torna-se grande.

Pode parecer surpreendente, mas nenhum problema de Física pode ser resolvido exatamente, a despeito do número de algarismos significativos que a resposta calculada possa conter. O cálculo da órbita da lua envolve horas e horas de utilização do computador e – ainda que estes resultados sejam impressionantes e muito bons para todas as aplicações práticas – jamais se poderá dizer que eles sejam exatos.

É sempre necessário fazer aproximações na resolução de problemas. O físico P. A. M. Dirac (1902 – 1984) afirmou que o truque é dividir o problema em duas partes, uma das quais é simples e outra pequena. Você, então, resolve a primeira parte exatamente e faz o melhor possível com a parte pequena. Às vezes, a “pequena” parte é pequena o suficiente de modo a ser completamente desprezada, como fizemos com o ar para velocidades baixas. (Adaptado de: RESNICK e HALLIDAY, 1994, p. 55).



## DEBATE

Em nossos estudos, obtivemos uma aproximação para o alcance horizontal no lançamento do martelo. Note, uma aproximação. Discuta com seus colegas e professor sobre as limitações da equação obtida. Qual seria a influência da resistência do ar no alcance? Faria diferença se o lançamento fosse feito ao nível do mar ou numa região de maior altitude?

## Trajetórias e Trajetórias

Será que o caminho percorrido pelo martelo é sempre o mais econômico em algum aspecto? Por que a parábola é bem comportada? Por que o martelo não sai fazendo “piruetas”? Isso se dá pelo mesmo motivo que você sempre procura caminhos mais curtos para ir de um lugar para outro.

Em seus trajetos, você busca a melhor relação custo benefício, ou seja, menor caminho, menor tempo e menor gasto de energia. Em casos como o lançamento do martelo, a natureza busca a mesma coisa, o que se traduz na minimização de uma quantidade física, que pode ser escrita como a diferença entre as energias de movimento (cinética) e potencial envolvidas. Tal quantidade é denominada “ação do sistema”.

No século XIX, o filósofo e matemático William Rowan Hamilton (1805-1865) propôs um “princípio dinâmico” a partir do qual seria possível fundamentar toda a mecânica.

Segundo Hamilton, as trajetórias de objetos físicos “minimizam” a ação do sistema. Este é o “princípio da mínima ação”. A trajetória do martelo é uma parábola porque minimiza a sua ação.

A natureza está sempre à busca desta minimização, ou seja, da melhor relação custo benefício, em geral, isso se traduz no menor gasto de energia.

Como temos visto, o martelo segue apenas uma trajetória. Mas o que aconteceria se, ao invés de um martelo, fosse um átomo?

Note que diminuímos bruscamente o tamanho do objeto de estudo, de um martelo ( $\approx 30$  cm) para um átomo ( $\approx 10^{-10}$  m).

Ao mudarmos do mundo macroscópico (martelo) para o mundo microscópico (átomo), estamos passando do domínio da mecânica clássica para o domínio da mecânica quântica, desenvolvida, sobretudo, na primeira metade do séc. XX.

A mecânica quântica é uma teoria essencialmente probabilística. Para um átomo sair de um ponto A e ir para um ponto B, existem infinitos caminhos. É como se o martelo, ao sair da mão do atleta, percorresse toda a vila olímpica antes de chegar à marca final. Poderiam existir outros infinitos caminhos, mas apenas um se manifesta, o da parábola. No caso de um átomo não é bem assim, existe uma certa probabilidade de que outros caminhos, além da parábola, se manifestem.

Considerando a probabilidade dos muitos caminhos, Richard Feynman, propôs um método para se calcular as probabilidades de manifestação de cada caminho a ser seguido pelo átomo. O método de Feynman é baseado na ação associada a cada caminho. Quanto menor a ação, maior a probabilidade de manifestação do caminho.

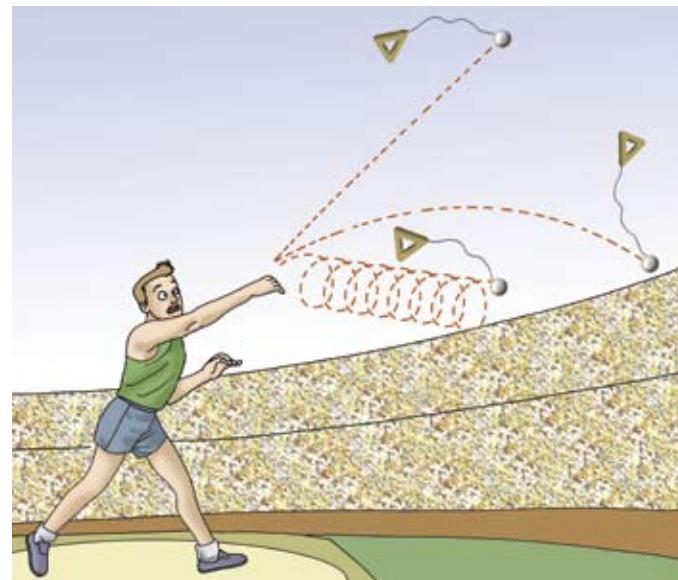


Figura 8: Três caminhos possíveis para uma partícula.

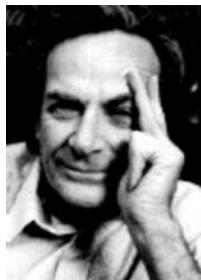


Figura 9: Richard Feynman (1918-1988), físico que deu significativas contribuições para o desenvolvimento da mecânica quântica, um dos ganhadores do Prêmio Nobel de Física em 1965. Fonte: <http://en.wikipedia.org>

Assim, o método permite a compreensão de como a mecânica quântica reproduz resultados da mecânica clássica. Dito de outra forma, o método de Feynman permite mostrar que a trajetória mais provável para o martelo é a parabólica.

## ■ Referências

- BRASIL/Confederação Brasileira de Atletismo. **Regras Oficiais do Atletismo.** Rio de Janeiro: Sprint, 2004.
- PARKER, S. **Galileu e o Universo.** São Paulo: Scipione, 1996.
- RESNICK, Robert. HALLIDAY, David. **Física 1.** 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos, 1994.

## ■ Obras Consultadas

- ALONSO, M.; FINN, E. J. **Física:** um curso universitário. São Paulo: Edgard Blucher, 1972.
- BRASIL/MEC/SEED. **Caderno Técnico-Didático de Atletismo.** Brasília: MEC/SEED, 1977.
- ROSENFELD, R. **Feynman & Gell-Mann:** Luz, Quarks, Ação. São Paulo: Odysseus: 2003.
- YOUSSEF, A. N.; FERNANDEZ, V. P. **Matemática:** Conceitos e Fundamentos. São Paulo: Editora Scipione, 1993.

## ■ Documentos Consultados **ONLINE**

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Jogos\\_Ol%C3%ADmpicos](http://pt.wikipedia.org/wiki/Jogos_Ol%C3%ADmpicos)  
Acesso em: 13 dez. 2005.

[www.cbat.org.br/atletismo/provas/m/lancamento\\_martelo.asp](http://www.cbat.org.br/atletismo/provas/m/lancamento_martelo.asp)  
Acesso em: 13 dez. 2005.



## ANOTAÇÕES

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

I  
n  
t  
r  
o  
d  
u  
ç  
ã  
o

## Termodinâmica

Certamente um dos sonhos mais antigos do homem se manifesta no desejo de voar. Mas não é somente isso. Desde as mais antigas civilizações, percebemos também uma incessante busca pela construção de máquinas que facilitassem ou melhorassem o trabalho humano. Nesse sentido, uma importante questão passa a fazer parte dessa busca: poderia o fogo ou o vapor em alta temperatura ser utilizado na obtenção de potência mecânica?

A busca pela obtenção da potência mecânica a partir do calor, às vezes, fruto de um olhar contemplativo a cerca da natureza, outras, fruto de um olhar mercantilista, acabou motivando o desenvolvimento de um dos ramos mais importantes das ciências físicas, a **Termodinâmica**.

O desenvolvimento dessa ciência tem como mote a possibilidade de melhorar o aproveitamento da potência fornecida pelas máquinas térmicas, ou seja, melhorar a eficiência dessas máquinas e a resolução do problema do perigo ligado ao trabalho com vapor a alta pressão e temperatura. Esse melhorar a eficiência estava ligado ao controle e aproveitamento da potência fornecida.

Qual era a pretensão? Transformar calor em trabalho e, para que isso se tornasse possível, foi preciso entender e conhecer essa importante forma de energia que hoje chamamos calor.

De que fatores depende essa potência? A procura de uma resposta para essa pergunta passou pela busca do que vem a ser a temperatura, pressão e calor. Daí o desenvolvimento de alguns modelos para o estudo dessas entidades.

Falando nisso, como foi difícil chegar a uma medida de temperatura pela primeira vez, com alguma precisão. Não poderíamos contar apenas com o tato. Aí vem a construção do primeiro termômetro, e mais outros, com diferentes escalas, e os mais esquisitos pontos fixos. Acredite! Chegou-se inclusive ao estabelecimento da temperatura de uma vaca como um dos pontos fixos. Se bem que não eram tão fixos assim.

Com o desenvolvimento do termômetro, aparecia mais uma questão: afinal de contas, o que esses termômetros mediam? O que era a temperatura? Você já se perguntou a que se deve as sensações de calor que sentimos?

De fato não somos só nós que sentimos calor. As variações de temperatura também estão relacionadas a efeitos como a dilatação ou a mudança de estado físico de alguns materiais. Então, como os materiais reagem a mudanças de temperatura? Sentem calor? O que seria então o calor? Agitação de partículas, como sugeriu Galileu? Um fluido, conforme as idéias de Descartes?

Esses questionamentos e idéias levaram a concepção do calor como energia, no séc. XVIII, com Thompson e Joule. Esse último obteve, através de uma série de experimentos, uma equivalência quantitativa entre energia mecânica e calor. Essa relação teve como consequência um dos mais importantes princípios da Física, o “Princípio da Conservação da Energia”, o qual acabou sendo utilizado por Helmholtz e Gibbs na formulação da “Primeira Lei da Termodinâmica”.

Hoje, no âmbito da **Termodinâmica**, temos quatro leis, tão importantes quanto às equações de Maxwell são para o **Eletromagnetismo**: a “Lei zero da Termodinâmica”, que descreve as condições para o equilíbrio térmico; a “1ª

Lei da Termodinâmica”, que manifesta as condições para a transformação de calor em trabalho; a “2<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica”, que aponta para a impossibilidade do rendimento das máquinas térmicas serem 100%, e a “3<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica”, que busca compreender o comportamento da matéria nas proximidades do zero absoluto.

Então, eis que surge uma nova variável, a entropia. Já apresentada na segunda lei, por conta da reversibilidade e irreversibilidade dos processos físicos, tem também na terceira lei um papel importante. Mas, o que seria ou para que serve a entropia?

Essa grandeza física é útil para nos dar noção da direção do tempo em certos processos: o tempo psicológico, em que um segundo pode representar uma eternidade; o tempo cosmológico, que é dado pela direção de expansão do universo, e, também, o tempo da **Termodinâmica**, que é dado pela entropia, palavra de origem grega que significa transformação.

Para encurtar a conversa, a mensagem das Leis da Termodinâmica é que a energia do universo é constante enquanto que a entropia tende a aumentar.

Quando os cientistas acharam que estava tudo pronto e explicado, a Termodinâmica adentrou no mundo microscópico e das probabilidades. Apareceu aqui, uma pedra no caminho, conhecida como buraco negro.

Como você, estudante, já deve ter percebido, muitas são as possibilidades de estudos dentro da Termodinâmica. No entanto, não é possível neste livro tratar de todas essas possibilidades. Desse modo, escolhemos alguns conteúdos que consideramos importantes para a construção do seu conhecimento.

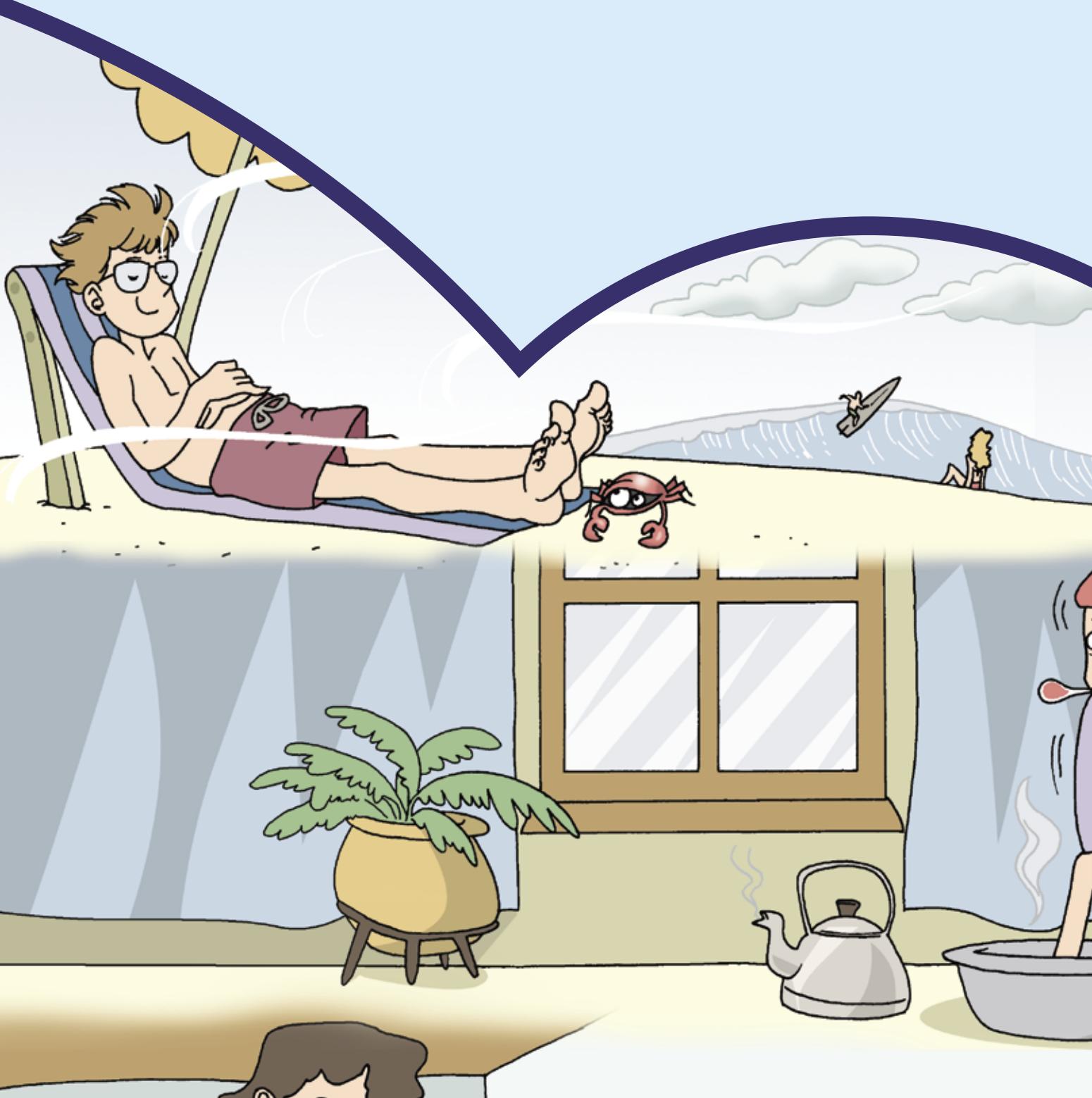
Iniciamos com o texto da Professora Leunice Ramme, “Lei Zero da Termodinâmica”, ela traz uma discussão sobre temperatura, equilíbrio térmico e propagação de calor. A mesma professora Leunice Ramme e o professor Ezequiel Burkarter escreveram o texto “Modelos de calor”, buscando esclarecer a 1<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica, apresentando o Princípio da Conservação de Energia. Esse texto busca na Filosofia uma explicação para o fogo e, na Química, o entendimento da entalpia.

A Professora Luiza Polak escreveu os textos “Vapor e movimento” e “Verso e Reverso”. O primeiro contempla a 1<sup>a</sup> e a 2<sup>a</sup> Leis da Termodinâmica, máquinas térmicas, ciclo de Carnot, motores a combustão, processos reversíveis e irreversíveis. Buscando entender o contexto histórico-social do desenvolvimento das máquinas térmicas e as repercuções no mundo do trabalho, o texto relaciona-se com as disciplinas de História e de Sociologia. O texto “Verso e Reverso” contempla entropia, entropia de Boltzmann, relação tempo entropia, além dos processos reversíveis e irreversíveis. As relações interdisciplinares acontecem com Biologia, enzimas, e com a Filosofia, Nietzsche versus Sócrates.

A professora Luiza Polak e o professor Ezequiel Burkarter também escreveram o texto “Pressão e volume”, o qual aborda a equação geral dos gases, discutindo os conceitos de pressão, temperatura e volume. Buscando entender a influência da pressão atmosférica na respiração, o texto recorre à Biologia. O tratamento com as equações dos gases busca na Matemática a idéia de função.

Bom estudo!

F  
Í  
S  
I  
C  
A





# LEI ZERO DA TERMODINÂMICA

■ Leunice Ramme<sup>1</sup>

**F**rio, calor, brisa, febre, inversão térmica...

**O que estas palavras tem em comum?**

Para entender essas situações, vamos começar com a idéia de temperatura. Usamos esse termo com naturalidade, em nosso cotidiano, para indicar se alguma coisa está “fria” ou “quente”. Por exemplo, quando seguramos uma colher de metal, temos a sensação de que ela é “mais fria” quando comparada a uma colher de madeira. Podemos até pensar que a temperatura da colher de metal é menor que a temperatura da colher de madeira se confiarmos nestas sensações atribuídas ao tato. No entanto, como teremos certeza desta conclusão, se diferentes pessoas atribuem valores diversos a estas “medidas de temperatura”? Utilizar apenas o tato como critério para avaliar e atribuir um valor de temperatura aos objetos mencionados não é confiável, pois cientificamente, precisamos de certo rigor ao fazer medidas. Sensações, como quente e frio, podem nos enganar, levando a conclusões errôneas acerca da temperatura de um objeto.

## O termômetro



■ Termômetro de Galileu.

Tentativas mais confiáveis de medida de temperatura remontam aos antigos filósofos gregos. Galileu Galilei (1564-1642), no final do século XV, construiu o primeiro termoscópio, baseado nas idéias dos gregos, que servia apenas para comparar temperaturas de corpos diferentes.

O aparelho era formado por um bulbo esférico de vidro ligado a um tubo cilíndrico, também de vidro. O tubo era mergulhado na água e o ar de dentro desse tubo era comprimido pela água. Quando aquecido, o ar expandia empurrando para baixo a coluna de água. O aparelho ainda não possuía escala, as medidas eram obtidas por comparação da variação da coluna de água.

O termoscópio de Galileu ganhou escala através do médico Santorio (1561-1636), que o utilizava para medir temperaturas de seus pacientes. A partir daí, surgiram muitas escalas, aproximadamente 60. Normalmente eram escolhidos dois pontos fixos, associados a valores numéricos, e este intervalo era dividido em partes iguais. Atualmente, na construção de uma escala, utilizamos como pontos fixos o ponto de fusão e o ponto de ebulição da água.

Desde o tempo de Galileu, já era observado que, normalmente, os diversos materiais dilatam quando aquecidos e comprimem quando resfriados. Assim, essa característica dos materiais é utilizada para comparar a variação produzida no volume com a variação da temperatura. A dilatação ou a contração servem como indicador de quanto muda a temperatura em um corpo.

A substância colocada dentro do tubo que irá dilatar-se ou comprimir-se é denominada substância termométrica, a qual, no caso do termoscópio de Galileu, foi o ar.

## E nos termômetros de hoje, qual é o líquido utilizado?

Quando efetuamos uma medida utilizando um termômetro, o que observamos não é, de fato, a temperatura, mas a variação de uma grandeza que varia com a temperatura. Por exemplo, num termômetro clínico, medimos como a altura da coluna de mercúrio varia com o aumento ou a diminuição da temperatura. Ao incluirmos este equipamento em um sistema com outros corpos, precisamos aguardar algum tempo para que a temperatura inicial mude e passe a ser indicada em outro ponto do termômetro, como já foi observado no início do texto.



Fig. 1: O termômetro é uma espécie de régua com marcas igualmente distribuídas para representar as temperaturas a serem medidas. A figura mostra um Termômetro, graduado em graus, na escala Celsius (°C).

Vamos agora entender um pouco melhor as escalas termométricas.

Aqui vamos nos limitar a discutir uma escala bem conhecida em nosso país: a Celsius, muito utilizada nos termômetros que medem temperatura corporal, ou ainda, a temperatura atmosférica.

Na escala Celsius, o ponto ZERO indica a temperatura em que a água permanece em seu estado sólido (gelo) e, ao mesmo tempo, em seu estado líquido. A temperatura indicada no CEM é aquela em que coexistem o estado gasoso e líquido. Tanto a referência de ZERO como a de CEM é obtida sob a pressão de 1atm, que é o valor da pressão atmosférica adotada ao nível do mar.

Os termômetros têm sido construídos explorando as características que as substâncias exibem ao sofrerem mudanças de temperatura. Assim, ainda é utilizada a idéia do primeiro termoscópio construído por Galileu, o qual utilizava a dilatação como propriedade termométrica. É importante ressaltar que, na indústria, também são usados termômetros que se utilizam da variação de outras propriedades, como a condutividade elétrica.



### DEBATE

Quais são as substâncias utilizadas em termômetros clínicos? Por que não utilizamos o leite nesses termômetros?

E para medirmos baixas temperaturas, qual é o líquido utilizado? Poderia ser a água?

Mais importante do que saber quais líquidos são utilizados, é saber quais não podem ser utilizados e o porquê.

Faça um pequeno relato registrando a discussão. A partir do que você escreveu, poderá observar o que entendeu.

## Sistemas ideais X sistemas reais

Para tratarmos desse assunto, pensemos no fluxo de calor (energia térmica) de um corpo com temperatura maior para um corpo de temperatura menor. Isso poderia ser um ferro de passar roupas e uma camisa de algodão (Sistema 1), ou você e o ar que o cerca (Sistema 2).

Sistemas como os citados são chamados de “sistemas reais” e são difíceis de serem estudados, porque envolvem diversos fatores. Por exemplo, com o seu corpo e o ar que o envolve, existem outros objetos, como as roupas, ou mesmo outras pessoas recebendo ou fornecendo calor no mesmo ambiente. É preciso considerar ainda que substâncias diferentes trocam calor de formas diferentes em função do material do qual são constituídas.

Os sistemas ideais são modelos de eventos que poderiam acontecer sem que se manifestassem tantos fatores, como no caso dos sistemas reais. Com esses modelos são feitas simulações tentando facilitar a compreensão do fenômeno, através de certo controle sobre os fatores que influenciam em sua observação. Como se fosse um show musical, em que você quer observar com precisão apenas o dedilhar do guitarrista sobre as cordas. Se você pudesse, retiraria o som e a névoa de gelo seco que os envolvem e, assim, estaria exercendo um controle sobre os fatores que prejudicam sua percepção.

Desta forma, selecionaria o que é importante, a arte como o guitarrista manobra as cordas. Esse seria o seu sistema idealizado criado para estudar o dedilhar do guitarrista. Em ciência, por vezes criamos sistemas ditos ideais para observar o comportamento de certas grandezas, buscando aproximações com o que se observa nos modelos reais.

Para falar em equilíbrio térmico, também vamos considerar um sistema idealizado que, no caso desse estudo, é chamado de “sistema isolado”.

Vamos construir, então, nosso sistema isolado?

Imaginemos dois blocos, o bloco A e o B com diferentes temperaturas. Vamos supor que tanto o que está com maior temperatura quanto o que está com menor estão dentro de uma caixa de um material que não permite a troca de calor com o meio externo, ou seja, é um isolante perfeito. Esse é o nosso sistema isolado.

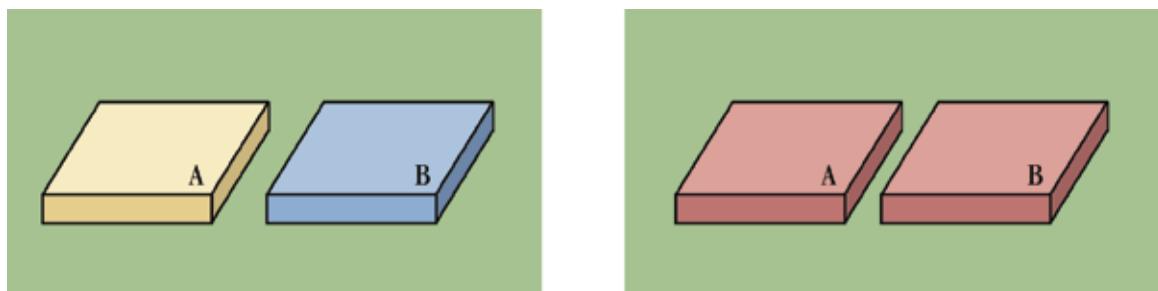
### **Será que essa caixa existe?**

Supondo que essa caixa exista, vamos analisar os processos térmicos que acontecem dentro dela? Como o nosso sistema é isolado, dentro da caixa, ocorre somente a passagem de calor de um bloco para o outro. Mas como se dá essa passagem?

Existem aí duas situações: a passagem por condução e por radiação. No caso da condução, o corpo de maior temperatura (A) transfe-

re energia térmica para o corpo de menor temperatura (B), como ilustra a Figura 2. Já no caso da radiação, os dois corpos irradiam calor e essa emissão é mais intensa quanto maior for a temperatura do corpo. Assim, os dois corpos emitem e recebem calor. Como o corpo A está a uma temperatura mais elevada, ele emite mais energia térmica do que recebe. Já com B ocorre o contrário, ele recebe mais do que emite. Assim dizemos que o fluxo de calor se dá no sentido de A para B, ou seja, do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura.

Passado algum tempo, os dois corpos estarão com a mesma temperatura e, nessas condições de isolamento térmico, a situação se estabiliza, ou seja, no instante em que cessa o trânsito de energia térmica, de um corpo para o outro, as duas temperaturas se igualam e dizemos que o sistema atingiu o Equilíbrio Térmico.



- Corpos A e B inicialmente a diferentes temperaturas,  $T_A > T_B$
- Após algum tempo os corpos A e B atingem a mesma temperatura,  $T_A = T_B$

Fig. 2: Esquematização de sistema ideal para fluxo de calor



## ATIVIDADE

Observe que, no texto acima, mencionamos alguns processos de transferência de calor que ocorrem num sistema isolado. Você consegue identificar, em seu dia a dia, algum sistema como esse? Como ele se previne contra transferências de calor indesejáveis? Discuta com seus colegas e faça uma ilustração explicativa desse sistema.

## ■ Equilíbrio Térmico

Para descrever o fenômeno do Equilíbrio Térmico entre corpos que participam de um mesmo ambiente, aparece a Lei Zero da Termodinâmica. De acordo com essa lei:

**“Se um corpo A está em equilíbrio térmico com um corpo B e este em equilíbrio térmico com um terceiro C, então o primeiro, no caso o corpo A, estará em equilíbrio térmico com o terceiro, no caso, o corpo C”.**

Dessa forma, a Lei Zero é a ante-primeira Lei da Termodinâmica, um conceito que fundamenta a compreensão da Primeira e da Segunda Lei. Sem ela, a Primeira e a Segunda Lei ficariam sem sentido. E, no campo histórico-cronológico, as outras duas precederam a Lei Zero, mas por questão de lógica (coerência) e prioridade, ela vem antes, daí a origem de seu nome.

A lei indica que o equilíbrio térmico pode envolver diversos corpos. Um deles pode ser o termômetro. Assim, fazendo parte do sistema, este alcançará a mesma temperatura e estará em equilíbrio com os outros elementos, identificando, por sua vez, a temperatura de equilíbrio.



## DEBATE

Mas se o sistema não for isolado e sim um sistema real em que estão presentes, no mesmo ambiente, pessoas, as roupas dessas pessoas, talheres de metal, a massa de ar, as paredes de alvenaria ou madeira, como fica a lei Zero?

Bom, agora já temos idéias sobre equilíbrio térmico e medidas de temperaturas. **Será que alguns fenômenos climáticos que ocorrem em nossa atmosfera têm alguma coisa a ver com essas idéias?**

Esses fenômenos da nossa atmosfera são dependentes de fatores que, num conjunto, formam toda uma área de estudos: a Meteorologia. Portanto, para obtermos algumas respostas sobre o comportamento do sistema global envolvendo a atmosfera, existem diversos dados e relações a serem investigadas. Interessa-nos aqui os fenômenos relacionados à transmissão de calor.

A convecção é uma forma de transferência de calor, que ocorre na presença de fluidos. Podemos observá-la se colocarmos uma vasilha de água com serragem para ser aquecida numa chama do fogão. Com o aquecimento, a porção de água que está no fundo da vasilha fica menos densa e sobe, ocupando o lugar de porções com temperatura menor, que por estarem mais densas, descem. Tal efeito pode ser percebido através do movimento da serragem, o qual é chamado de correntes de convecção.

O fenômeno de convecção ocorre também na atmosfera que envolve o planeta Terra, mais especificamente na Troposfera, camada principal dos fenômenos climáticos, e o desencadeador desses fenômenos é a radiação solar, introduzindo na Troposfera energia calorífica e luminosa, interferindo nos elementos do clima por meio do aquecimento da atmosfera e da superfície líquida e sólida do planeta.

A radiação solar ultrapassa a atmosfera, atingindo as superfícies, parte é absorvida e parte é irradiada, aquecendo as proximidades.

Na área mais aquecida, o ar é mais quente. O ar mais quente se expande. Nisso, ele cria movimento. Eleva-se, mas se esfria à medida que sobe. Nessa região mais aquecida (na superfície) se desenvolve um centro de baixa pressão, para onde irá o ar das regiões vizinhas, em deslocamento horizontal. O ar sobe até atingir uma altura em que a sua temperatura e do seu vizinho são iguais. Nesse nível, ele se desloca horizontalmente no sentido oposto ao da superfície. (PRATES, In: Ciência hoje na escola, 1996, p.43)

Esse deslocamento do ar, que são as correntes de convecção, é um movimento cíclico que não tem fim.

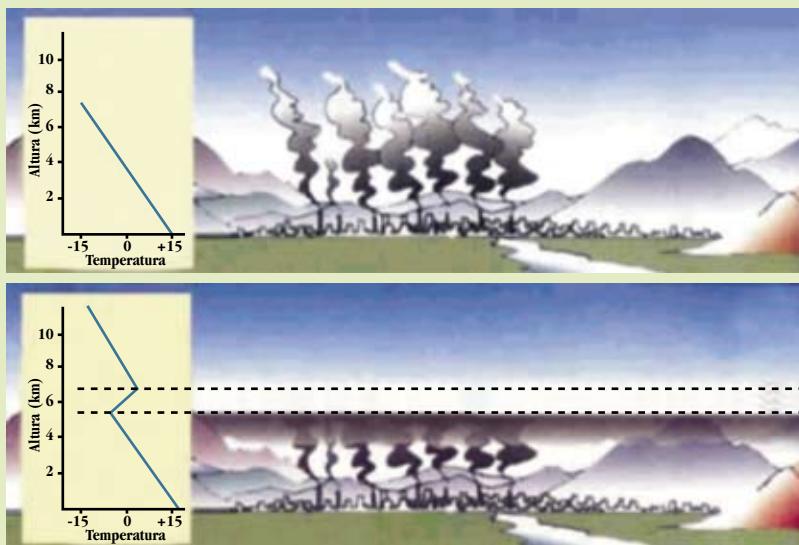
Em algumas situações, essas correntes são prejudicadas, como, por exemplo: aproximação de uma intensa frente fria, esta fica presa por duas camadas quentes, com isso o ar próximo ao solo fica parado, acumulando poluição. Os cientistas ainda estudam os efeitos que essa concentração de poluição pode causar, no entanto, já se sabe que os mais prejudicados são as crianças, os idosos, fumantes e pessoas que possuem doenças respiratórias e cardíacas.

Cada vez mais, o homem vem interferindo nos fenômenos climáticos. Uma das formas de interferência é a poluição, a qual é produzida em grande escala nas cidades maiores, provocada por automóveis, indústrias e usinas termoelétricas. Mas não se engane, a poluição acontece também na zona rural, através de queimadas, um processo utilizado pelos agricultores para acelerar o cultivo, criação de gado e para a retirada da cana-de-açúcar.

Entre os poluentes, um vilão é o monóxido de carbono (CO), suas principais fontes são os automóveis dos diferentes combustíveis, especialmente os que utilizam óleo diesel.

A concentração da poluição se dilui e se mistura com atmosfera. Porém o grau de diluição depende de fatores como: temperatura, velocidade do vento, movimento dos sistemas de alta e baixa pressão e sua interação com a topografia local – montes, vales. Na Troposfera, a temperatura tem tendência a diminuir com a altitude, mas a inversão térmica contraria essa tendência.

### Mas o que causa a inversão térmica?



Em situação normal, o ar se resfria a medida que se distancia da superfície da Terra. Dessa forma, o ar próximo a superfície, mais aquecido sobe, abrindo espaço para que o ar mais frio desça, favorecendo a dispersão dos poluentes (figura superior).

Durante o fenômeno da inversão térmica, uma camada de ar aquecido se acumula sobre uma camada de ar frio, impedindo o processo, dificultando o movimento ascendente do ar, fazendo com que os poluentes se acumulem e fiquem próximo da superfície da terra.

Adaptado de <http://www.cetesb.sp.gov.br/>

O fenômeno da inversão térmica se mantém ativo enquanto está sob o efeito de altas pressões e ventos com velocidades baixas. Outros aspectos que favorecem a inversão térmica são: a época do ano e o período do dia, ocorrendo com mais freqüência no inverno e na madrugada.

As metrópoles também são ambientes que favorecem a inversão térmica, devido a grande área construída, absorvem o calor durante o dia e irradiam rapidamente durante a noite.

Entre as formas de transmissão de calor, encontra-se a radiação, processo pelo qual o Sol emite calor. Uma parte da radiação é absorvida ou refletida pelos elementos da própria atmosfera, enquanto outra parte é refletida ou absorvida na superfície terrestre.

A radiação solar absorvida pela superfície da Terra é a maior responsável por seu aquecimento. Ao estar mais aquecida que o ar, a superfície terrestre emite calor. Com essas considerações, dizemos que a Terra e a atmosfera trocam calor, por radiação e por condução.

Esses processos de transferências de calor - condução, radiação, e convecção - não estão presentes só no comportamento climático do nosso planeta, mas também nos seres vivos!

## ■ Alguns exemplos de transferência de calor nos seres vivos

A condução aparece quando, por exemplo, pegamos algo que se encontra com temperatura menor, o objeto e a mão trocam calor até chegar num equilíbrio, nesse caso, o organismo, com temperatura maior, perde calor para o objeto.

No nosso caso, nosso organismo tem condições de trabalhar para manter a temperatura interna do corpo estável, quando sujeito a variação de temperatura externa. Isso porque, possuímos receptores de frio e de calor cuja função é perceber imediatamente essas variações a que ficamos submetidos.

A forma de transferência mais considerável é a radiação, todos os seres vivos recebem e emitem radiações na freqüência do infravermelho. Para nós, seres humanos, essa radiação é invisível, mas para as serpentes (cobra é uma denominação inglesa, que se refere a Naja, a qual não se encontra no Brasil), essa radiação é importante, já que elas são praticamente “surdas” e “cegas”.



### PESQUISA

As serpentes conseguem perceber a radiação na freqüência do infravermelho.

Você já ouviu falar: “serpentes sentem o calor da presa”? Será esse o motivo de as serpentes localizarem suas presas com facilidade? Que estrutura do organismo da serpente possibilita essa percepção? Esse “calor” será algo emitido pelos seres vivos?

Durante a pesquisa, observe e diferencie as serpentes de hábitos noturnos e diurnos, quanto a importância da percepção da radiação infravermelho.

Tendo como base as fontes de pesquisa, discuta com seus colegas e apresente uma conclusão ao seu professor.

Já a convecção ocorre no processo de respiração pulmonar. Ao expirar, a pessoa expele o ar do organismo com uma temperatura de aproximadamente  $36,5^{\circ}\text{C}$ , esse ar, próximo da pessoa, sobe e ocupa o espaço do ar mais frio. Então, esse ar frio desce e é inspirado pela pessoa.

A inspiração ocorre pelas narinas, aberturas que levam o ar às fossas nasais. Por sua vez, nas paredes das fossas nasais pelos e glândulas produtoras de muco filtram o ar que entra através da retenção de impurezas.

Na respiração, o ar inspirado de um ambiente com temperatura em torno de  $25^{\circ}\text{C}$  precisa entrar em equilíbrio com o organismo que deve se encontrar em torno de  $36,5^{\circ}\text{C}$ , em situação de normalidade. Isto se a pessoa não estiver com febre!

As fossas nasais são bastante vascularizadas e, por isso, são responsáveis pelo aquecimento do ar que entra no sistema respiratório através das narinas antes que eles cheguem aos pulmões.

Além dessas formas, existe ainda a evaporação. O líquido acumulado na camada externa da pele, a epiderme, evapora da superfície desse para as vizinhanças.



## ATIVIDADE

1. Você já teve febre? Que sensação sentiu? Discuta com seus colegas e responda a questão: Por que sentimos frio quando estamos com febre?
2. Quando a temperatura está abaixo do valor aceito como normal para nós, humanos, sentimos frio. No entanto, quando o termômetro marca, por exemplo 30°C, sentimos calor. Por que isso acontece se, em tese, também estamos perdendo calor para o ambiente, uma vez que 30°C é menor que 37°C?

Temos feito até aqui uma descrição da temperatura em termos macroscópicos, mencionando, por exemplo, a temperatura do corpo todo, mas não fizemos alusão a efeitos microscópicos que a influenciam. Na expectativa de se propor um modelo teórico para o comportamento microscópico da temperatura para o caso de gases, surge a Teoria Cinética dos Gases, que teve, como marco de seu surgimento, o livro *Hydrodinamica*, de Bernoulli, em 1738.

Um dos méritos da Teoria Cinética é que assume o modelo atômico da matéria. Contudo, a falta de evidência experimental do modelo atômico fez com que a teoria cinética tivesse pouco impacto na época. Basicamente, em seu corpo de hipóteses, a Teoria Cinética buscava a aplicação das leis de Newton, assim como as idéias de conservação de *momentum* e energia cinética, a cada molécula do sistema. O comportamento macroscópico seria resultado do comportamento médio dos componentes microscópicos.

Trabalhos de James Clerk Maxwell (1831-1879), Josiah Williard Gibbs (1839-1903) e Ludwig Boltzmann (1831-1879), especialmente na segunda metade do Séc. XIX, deram contribuições muito importantes à Teoria Cinética dos Gases, particularmente no que diz respeito ao cálculo das médias de grandezas relativas aos componentes microscópicos do sistema.

Num resultado da Teoria Cinética devido a Maxwell e Boltzmann, a temperatura é associada à energia de movimento das moléculas do sistema, por meio do comportamento médio das suas velocidades. Vem daí a idéia de que a temperatura está associada ao nível de agitação molecular, algo de que você provavelmente já ouviu falar, mas não sabia muito bem de onde havia saído.

A aplicação de métodos estatísticos e probabilísticos aos métodos da Teoria Cinética acabou levando ao desenvolvimento, a partir do final do Séc. XIX, de outra teoria mais abrangente que esta, a Mecânica Estatística. Nessa nova teoria, estudos de grandezas macroscópicas, como temperatura, pressão e volume, são considerados, inclusive alguns resultados da mecânica quântica, como o princípio de exclusão de Pauli.

Ainda hoje, os resultados da Mecânica Estatística têm servido para a interpretação microscópica de grandezas macroscópicas ligadas à termodinâmica, mais do que isso, esses métodos têm sido aplicados a sistemas como redes neurais ou ao complicado movimento de grãos de pólen numa folha úmida, um exemplo do movimento browniano. Trata-se da manifestação de um difícil caminho que começa com a tentativa de se entender os fenômenos relacionados à temperatura.

## ■ Referências

PRATES, J. P. Origens dos Ventos In: **Ciência Hoje**. Rio de Janeiro: SBPC, 1996.

## ■ Obras Consultadas

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os trópicos**. 10. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

CARVALHO, A. M. P. (org.): **Termodinâmica, um ensino por investigação**. São Paulo, Faculdade de Educação, 1999.

ROCHA, J. F. (org.). **Origens e Evolução das Idéias da Física**. Salvador: EDUFBA, 2002.

ROSS, J. L. S. (org.) **Geografia do Brasil**. 5.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

SANTOS, M. **Por uma Geografia Nova** – Da Crítica à Geografia a uma Geografia Crítica. 2.ed. São Paulo: Editora Hucitec, 1980.

SEARS, F. W.; SALINGER, G. L. **Termodinâmica, Teoria Cinética e Termodinâmica Estatística**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S. A., 1975.

SEGRÈ, G. **Uma questão de graus**: o que a temperatura revela sobre o passado e o futuro de nossa espécie, nosso planeta e nosso universo. Rio de Janeiro: Rocco, 2005.

TEIXEIRA, W. et al.(orgs.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: oficina do Texto, 2000.

TIPPLER, P. A. **Física**: Gravitação, Ondas e Termodinâmica. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1995.

## ■ Documentos Consultados *ONLINE*

<http://www.cetesb.sp.gov.br/inversaotermica> Acesso em: 01 set. 2006.



# MODELOS DE CALOR

■ Leunice Ramme<sup>1</sup>, Ezequiel Burkarter<sup>2</sup>

*V*ma das maiores conquistas do homem foi a descoberta do fogo.

Este que para muitas civilizações seria patrimônio dos deuses, ao ser descoberto, passa a ser utilizado pelo homem na alteração da matéria, em atos que vão desde o assar uma carne até o desenvolvimento de técnicas de fermentação, vitrificação e o manuseio de metais.

**Calor, energia, trabalho...**

**O que essas palavras têm em comum?**

<sup>1</sup>Colégio Estadual Padre Eduardo Michelis - Missal - PR

<sup>2</sup>Colégio Estadual Milton Carneiro - Curitiba - PR

## De onde vem o fogo?

Na Grécia Antiga, Heráclito (aproximadamente 500 a.C.) considerou o fogo como a substância fundamental do universo.

"Mas pode dizer-se que o fogo perde, na sua doutrina, todo o carácter corpóreo: é um princípio activo, inteligente e criador. 'Este mundo, que é o mesmo para todos, não foi criado por qualquer dos deuses ou dos homens, mas foi sempre, é e será fogo eternamente vivo que com ordem regular se acende e com ordem regular se extingue'. A mudança é, por isso, uma saída do fogo ou um regresso ao fogo. 'Todas as coisas se trocam pelo fogo e o fogo troca-se por todas, como o ouro se troca pelas mercadorias e as mercadorias pelo ouro". (DIELS. In: ABBAGNANO, 1999, p.33)

Já para Empédocles (490-430 a.C.), o fogo, juntamente com a água, o ar e a terra, era um dos quatro elementos que formavam o universo.

Aristóteles (384-322 a.C.) aceitava a teoria dos quatro elementos, acrescentando o éter. Para ele, o fogo busca o seu lugar natural: o céu e, por isso, sobe. Considerado um dos quatro elementos canônicos, o fogo agregava o quente e o seco.

Os gregos acreditavam que as substâncias inflamáveis continham o elemento fogo. Assim, durante a combustão, esse elemento era liberado.

A dominação do poder do fogo, por outro lado, também foi objeto de interesse dos renascentistas. Muitos modelos foram propostos, baseados na utilização do vapor como fonte de potência mecânica. O problema era o imenso poder do calor, perigoso de produzir e difícil de controlar. Um exemplo era a máquina térmica mais eficiente da época o canhão, que precisava de um cilindro de grossas paredes para conter a força produzida, usava uma substância caríssima, a pólvora, e funcionava intencionalmente ao contrário do que se esperaria de uma máquina térmica: a potência gerada era incontrolável e destrutiva – pelo menos do ponto de vista do inimigo. O imenso poder do fogo já era conhecido e admirado, mas precisava ser domado. (Quadros, 1996, p. 14)

Esse “domar” o fogo, que neste caso pode ser traduzido por domar o calor, foi motivado especialmente por questões ligadas à mineração do carvão. A disseminação do uso de máquinas, nessa época, provocou grandes transformações sociais e tecnológicas, destaca-se, por exemplo, a substituição da energia humana e animal pela força dessas máquinas. Ressalte-se, contudo, o uso do calor nesse processo.

Voltemos ao ato de “domar” o fogo ou o calor.

A idéia do fogo como um dos quatro elementos ainda estava presente no século das luzes, o século XVIII. Aceitando essa idéia, o químico George Ernest Stahl (1660-1734) elaborou uma teoria que explicava as reações químicas que ocorriam em presença do fogo. Para Stahl, uma espécie de espírito do fogo, o flogisto ou flogístico (do grego *phlogistos*, que significa queimando – íneo, combustível), estava presente nas substâncias e era liberado quando essas eram aquecidas. O calor era então, juntamente com a luz, efeito perceptível desse princípio do fogo.



Fonte: <http://www.sxc.hu>



## ATIVIDADE

O químico britânico Joseph Priestley (1733-1804), em 1774, aquecendo óxido de mercúrio, obteve um ar sem cor. Ele observou que esse ar tinha a propriedade de nutrir a chama de uma vela, fato já observado anteriormente por Robert Boyle (1627-1691) e Robert Hooke (1635-1703) no século anterior. Ao deparar com o aumento do fogo na presença desse ar, Priestley chamou-o de ar deflogisticado, por acreditar que a ausência do flogisto no ar fazia com que certa quantidade de flogisto saísse com mais intensidade do fogo para ocupar o espaço vazio existente nesse ar. (Adaptado de: BRAGA, et.al., 2000)

Agora, a partir da leitura acima, pense, discuta com seus colegas e responda: seria esse ar deflogisticado o mesmo ar da teoria dos quatro elementos? Justifique sua resposta.

## O homem tentando entender o fogo

Se por um lado a teoria do flogístico dava conta de muitos problemas químicos, por outro continha em sua estrutura muitos componentes metafísicos: a substância flogística era invisível e impossível de ser isolada, como uma espécie de espírito.

Por isso, a teoria passou a ser criticada pela Filosofia e, também, pelos iluministas. Esses, buscavam uma ciência baseada na razão, nos moldes da revolução científica do século XVII, não cabendo aspectos metafísicos. A influência iluminista, especialmente na França, fez com que muitos químicos começassem a desconfiar da existência do flogístico.

O químico francês Lavoisier (1743-1794) viveu na época em que se elaboravam as idéias iluministas, as quais seriam as bases filosóficas da sociedade que estava sendo construída. Nessa sociedade, o conhecimento científico seria livre de dogmas, superstições, autoridades (por exemplo, as eclesiásticas), mas pautada na racionalidade, descritas em modelos matemáticos.

A teoria do flogístico afirmava que os corpos, ao serem queimados liberavam uma certa quantidade de flogístico, diminuindo sua massa. No entanto, os químicos experimentais observaram que acontecia o contrário em alguns processos. Diante da impossibilidade de encontrar explicações que convencessem os cientistas, além dos filósofos, os químicos experimentais passaram a buscar novas explicações para o fogo.

### Mas qual foi a contribuição de Lavoisier?

Os físicos que desenvolveram a mecânica após Newton, dentre os quais Euler (1707-1783), d'Alembert (1717-1783) e Laplace (1749-1827), tiveram como objetivo principal eliminar os aspectos metafísicos do pensamento newtoniano.



■ Fonte: <http://www.sxc.hu>

O papel central da ação divina no sistema de mundo newtoniano era tido como uma evidência dessa contaminação “metafísica”, na toda poderosa Razão para rechaçar o “espírito do sistema”, assegurando a autonomia da Física em relação à Metafísica. Por outro lado, essas pesquisas visavam consolidar a universalidade, sucessivas vezes contestada, do princípio de gravitação universal. (ABRANTES, 1989, p. 9)

Lavoisier, juntamente com alguns físicos, como Laplace, defendia as idéias mecanicistas, acreditando que o comportamento dos corpos poderia ser explicado pelas leis da mecânica de Newton, inclusive as reações químicas.

E o fogo? Estudos de Lavoisier permitiram que se chegasse a compreensão mais aproximada desse “elemento”. Mostrou que o fogo era resultado de uma reação química chamada de combustão, na qual um material qualquer é combinado com o oxigênio, formando alguns tipos de óxidos, razão porque a reação também é chamada de reação de oxidação. Um duro golpe na teoria do flogístico!



## ATIVIDADE

Pesquise o processo da incandescência. Busque exemplos cotidianos onde seja possível observar a incandescência.

## Calor e Fogo, qual a relação?

Será que a construção de máquinas indica que já fizemos essa dominação? Pensando em termos de aplicações, é possível que alguém responda que sim. Mas e do ponto de vista da ciência? É suficiente encontrar uma aplicação? Mesmo as aplicações demandam conhecimento a cerca da natureza dos processos, o que se aplica inclusive no caso do calor.

O aperfeiçoamento das máquinas térmicas está, portanto, intimamente ligado aos conhecimentos científicos sobre a natureza do calor, desenvolvidos ao longo dos séculos XVII e XVIII, e as transformações econômicas e sociais da sociedade neste período.

**Mas permanece a pergunta: o que é o calor?**



## ATIVIDADE

Formule a sua própria teoria sobre o que vem a ser o calor. Procure escrever suas hipóteses, como se você fosse um cientista a registrar suas idéias antes de defendê-las diante de seus colegas (também cientistas). Lembre-se de que um cientista nem sempre tem noção da importância de suas anotações, portanto guarde bem os seus registros.

Na visão de Galileu Galilei (1564-1642) por exemplo, o “calor” estaria associado ao movimento de partículas. Não haveria calor, apenas uma sensação mental ligada ao movimento de partículas. A concepção de calor de Descartes, por sua vez, estava ligada ao fato de que tudo no mundo real resultava da interação de dois princípios: “extensão” (a matéria) e “movimento”.

Para dar conta do mundo como o vemos, Descartes propôs a existência de três tipos de partículas, distintas por sua extensão: partículas de fogo, as menores, algumas infinitamente pequenas; boules, intermediárias; e as partículas de matéria, os constituintes dos objetos... A dilatação dos objetos seria causada pela pressão de partículas de fogo e boules, comprimidas entre as partículas de matéria. A vibração das partículas de matéria causaria a sensação de calor, e esta vibração seria provocada pela agitação da ‘matéria sutil’, isto é novamente partículas de fogo e boules. Discípulos de Descartes fundiram mais tarde essas duas partículas em um ‘fluído sutil’ posteriormente denominado calórico. (Quadros, 1996, p. 38)

Boyle, discípulo de René Descartes (1596-1650), também defendia a idéia de que o calor estaria associado ao movimento, randômico de átomos, e poderia ser gerado por fricção, atrito ou percussão.

Como nenhuma das teorias dava uma explicação suficientemente consistente sobre a natureza do calor, ainda no século XVII, tínhamos duas teorias sobre a natureza do calor. Numa delas, o calor seria tal qual um fluido indestrutível, invisível e imponderável, o calórico, que passava dos corpos quentes para os corpos frios. Na teoria concorrente, a “Teoria do Movimento Molecular”, o calor estaria ligado às vibrações dos átomos ou moléculas que compunham o material. Como não havia, a essa época, uma teoria atômica da matéria, a idéia do movimento molecular perdeu força em relação à teoria do calórico, que recebeu destaque no século XVIII, inclusive com alguns experimentos.

Joseph Black (1728-1799), pensador influente do século XVIII, procurou medir o calor e suas consequências. É devida a Black a definição da quantidade calor, que obedecia a uma lei de conservação muito parecida com a lei da conservação do *momentum* de Isaac Newton (1642-1727). Dito de outra forma, dois corpos colocados em contato trocam calor e alteram suas temperaturas, da mesma forma que dois corpos têm suas velocidades alteradas após colidirem-se.

Assim como o *momentum* é conservado no caso de uma colisão, também a quantidade de calor é conservada no caso do contato entre dois corpos. A quantidade de calor que entra num corpo é igual à quantidade de calor que sai do outro corpo. Por conta dessa lei de conservação, a idéia de Black acabou fortalecendo a teoria do calórico.

Dentre outros experimentos, em 1761, Black estudou o ponto de fusão do gelo. De seus resultados, observou que a temperatura de uma mistura de água e gelo colocada numa sala quente varia mais rapidamente que a temperatura do gelo sozinho, que mantém-se por um bom tempo até que o processo de fusão esteja completo. A conclusão é que se flui calórico das vizinhanças para a mistura de água e gelo, mais ainda ocorrerá no caso do gelo sozinho. Portanto, segundo Black, a mistura de água e gelo continha mais calórico que o gelo sozinho.

Pelos experimentos mencionados, percebe-se uma tendência de se moldar as propriedades do calórico, aos fenômenos conhecidos. Contudo, em ciência, um modelo teórico não deve se limitar a explicar os fenômenos conhecidos, mas também deve, ser capaz de fazer previsões a respeito de eventos.



## ATIVIDADE

Em resumo, a teoria do calórico considera o calor como sendo uma substância pertencente ao corpo. Retome as suas anotações e compare a sua teoria com a teoria do calórico. Procure pontos comuns e pontos contraditórios entre as duas.

O problema é que a capacidade de se fazer previsões não apareceu na teoria do calórico. Além disso, as explicações dadas por essa teoria aos fenômenos conhecidos manifestam certas fragilidades, além dos aspectos metafísicos. Entretanto, como já dito, a falta de teoria atômica consistente impedia a refutação da teoria do calórico, que só foi ser derrubada no século XIX.

## Calor é Energia?

Em seu trabalho na fábrica de canhões, Benjamin Thompson (1753-1814), o conde de Rumford, observou fenômenos cuja explicação acabou representando um duro golpe contra a teoria do calórico.

A perfuração do ferro para a fabricação dos canhões aquecia tanto a broca quanto o próprio ferro. Para evitar a fusão, o metal precisava ser resfriado com água. De acordo com a teoria do calórico, o aquecimento era devido ao fato de serem arrancados pedaços do metal pela broca, durante a perfuração, quando o fluido era expelido.

O uso de uma broca “cega” (que não conseguia arrancar pedaços perfurando o metal) mostrou que o calor produzido era ainda maior, e não havia saída de calórico do material. Segundo Rumford, esse resultado só poderia ser explicado com a hipótese de o calor não ser fluido, mas uma forma de movimento, ou em outras palavras, uma forma de energia. O calor seria produzido pela agitação das partículas do metal, mediante o atrito com a broca.

Essa observação foi, em princípio, rejeitada pela comunidade científica, mas ganhou força com os trabalhos do médico alemão Julius von Mayer (1814-1878) e de James Joule (1818-1889).

Julius von Mayer percebeu que o sangue venal de pacientes na ilha de Java (Indonésia) apresentava uma coloração vermelha brilhante, característica do sangue arterial, que é mais oxigenado. Essa observação levou von Mayer a concluir que, em climas quentes, o corpo humano necessita de menos oxidação para manter-se aquecido.

É devido a Mayer, a idéia de que o corpo humano retira energia dos alimentos e a transforma em trabalho mecânico pelos músculos, ou em calor, nas reações de oxidação do sangue. O médico alemão foi ainda o primeiro a propor o “Princípio da Conservação da Energia”, segundo o qual a quantidade total de energia no universo seria constante, sofrendo transformações mediante processos físicos e químicos. Mayer tentou demonstrar esse princípio através do estabelecimento de um equivalente mecânico do calor, contudo seus resultados receberam pouco crédito da comunidade científica de então.

A descrença, em princípio, nos trabalhos de Rumford e Mayer, mostra quão lento e difícil pode ser o processo de superação de um modelo científico. O trabalho de Rumford, por exemplo, foi ignorado pelos cinqüenta anos seguintes a sua apresentação.

Na década de 1840, o trabalho de James Joule deu uma base consistente para a teoria da agitação molecular, através do estabelecimento de uma relação entre trabalho mecânico e calor. Joule estudou sistemas em que o calor era produzido por meio de dissipação de energia na viscosidade de líquidos, a fricção entre sólidos e a passagem de corrente elétrica por fios (como num chuveiro), por exemplo.

Uma idéia importante nos trabalhos de Joule vem justamente do que vimos sobre Mayer, a transformação de uma forma de energia em outra. Um exemplo disso pode ser visto quando um copo cai de uma mesa. No topo da mesa, o copo tem uma certa energia potencial gravitacional, enquanto cai, essa energia é convertida em energia cinética. Ao atingir o chão, parece que a energia se perde. Entretanto o que ocorre é que parte da energia mecânica é transformada em aquecimento do corpo e do chão e, a outra parte, é transformada em energia sonora. A energia total do processo permanece constante, temos apenas uma transformação em cada instante.



## ATIVIDADE

Provavelmente o trabalho mais conhecido de Joule, que inclusive aparece na maioria dos livros de termodinâmica, foi a obtenção experimental de um equivalente mecânico para o calor. Faça uma pesquisa buscando descrever esse famoso experimento e sua consequência no desenvolvimento do conceito de calor!



■ Julius von Mayer (1814-1878). Foi o primeiro a estabelecer o Princípio da conservação de energia, embora não tenha sido aceito na época devido à falta de evidências experimentais. Fonte: <http://en.wikipedia.org>

Assim como Mayer e Thompson, Joule também enfrentou dificuldades para convencer a comunidade científica a cerca de suas idéias, especialmente por não pertencer a uma sociedade acadêmica, ele era, na verdade, um cervejeiro.

Uma sólida base matemática para o princípio da conservação da energia, inclusive no que diz respeito ao conceito de calor como uma forma de energia, tem sua formulação atribuída a Hermann Helmholtz (1821-1894) e Josiah Willard Gibbs (1839-1909). Por serem feitos por acadêmicos, esses trabalhos acabaram recebendo considerável crédito ainda na metade do século XIX, quando foram publicados. Nesse contexto, o princípio da conservação da energia tornou-se conhecido como “Primeira Lei da Termodinâmica”, e as ciências do calor também passaram a ter uma base matemática.

Podemos dizer que depois de ser domado experimentalmente, a base matemática permitiu que o calor fosse “domado” também pelas explicações e previsões da teoria.

**Que tal, então, observarmos com mais detalhes os conceitos envolvidos na Primeira Lei da Termodinâmica? Que grandezas estão de fato envolvidas? Como o “calor energia” aparece nessa formulação?**

## ■ Calor, energia e trabalho, a história continua

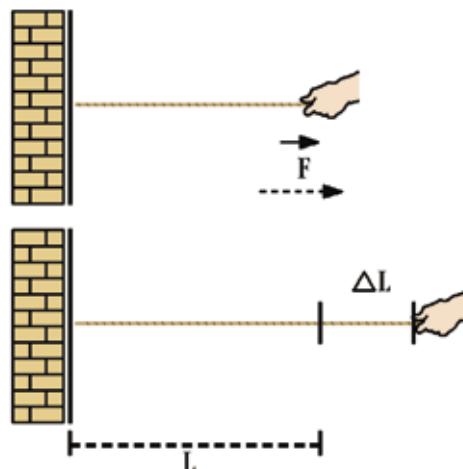
Como você já deve ter visto, a idéia de trabalho está enraizada nas leis de Newton para o movimento. Quando você puxa uma mesa, por exemplo, e a arrasta, está efetuando trabalho sobre ela. Contudo, se a mesa estiver imobilizada, talvez presa por parafusos, mesmo exercendo uma força, é possível que você não consiga movimentá-la, por isso não estará realizando trabalho sobre ela.

Você também deve ter ouvido falar que a idéia de trabalho está associada ao conceito de energia. Dizemos que o trabalho de uma força não conservativa é igual a variação da energia mecânica total do sistema, dito de outra forma, é igual a soma das variações na energia cinética e potencial.

Mas agora uma novidade! Pode-se realizar trabalho também em processos em que não há variação de energia cinética ( $K$ ) e nem potencial ( $U$ ). Quando você encher uma bexiga e colocá-la num congelador, poderá observar que, ao ser retirada de lá, ela parecerá um pouco murcha. Se não houve vazamento, um processo como esse é chamado de contração do gás, nesse caso o ar que está dentro da bexiga. Apesar de a bexiga ter permanecido em repouso, houve realização de trabalho, e, portanto, alguma variação de energia. Em termodinâmica, geralmente nos preocupamos com processos como esse.

Vejamos mais alguns exemplos.

A Figura (1) representa um processo em que um pedaço de fio de comprimento  $L$  é puxado. Uma das extremidades está fixa, enquanto a outra é puxada com uma força  $F$ . Se o fio sofre um pequeno “esticão”  $\Delta L$ , como mostra a figura, o trabalho da força é:  $W = F \Delta L$ . Note que a força  $F$  está na mesma direção do movimento, essa é uma condição imprescindível para a realização de trabalho: pelo menos uma das componentes da força deve estar na mesma direção do movimento.



■ Fig. 1: Pedaço de fio sendo esticado por uma força  $F$

**E quanto ao leite quando ferve, será que é a mesma coisa?** Observe a seqüência de fotos colocada a seguir:



■ Fig. 2:Fotos - etapas da fervura do leite.

Quando o leite ferve, sobe e derrama, há também a realização de trabalho. Note que no caso do leite, não temos um único “pontinho” mudando de posição, mas toda a superfície do leite sobe. Na verdade, o que ocorre é que o volume ( $V$ ) do leite aumenta  $\Delta V$ , quando ocorre a fervura.

Assim como no fio, no caso do leite é como se houvesse uma força sendo aplicada em cada ponto da sua superfície, ou uma força total sendo distribuída ao longo dessa superfície.

Esta força distribuída, ou dividida, ao longo da superfície, é o que chamamos de pressão ( $P$ ), e é quantitativamente definida desta forma:

$$P = \frac{F}{A}$$

A idéia de pressão será discutida com mais cuidado no texto Presão e Volume da Profª. Luiza Polak. Aqui nos interessa saber que o leite realizou um trabalho:  $W = P \Delta V$ .

A expansão de um sistema, como no caso do leite, foi de grande interesse no desenvolvimento das máquinas térmicas.

Olhando com mais atenção o caso do leite fervido, o que particularmente interessa nessa situação, é a expansão do leite durante a fervura. Não nos interessa se ao ferver, o leite sobe formando bolhas, ou se sua superfície sobe uniformemente. O trabalho no final é o mesmo. Por isso, dizemos: o que importa são os estados final e inicial, ou seja, no caso do leite, seu volume antes e depois da fervura.



## ATIVIDADE

Suponha um ciclista ou você subindo uma ladeira de bicicleta? Como fazer para cansar menos: subir em zig-zag ou em linha reta? Faria alguma diferença se subirmos em linha reta ou em zig-zag? Existe semelhança entre o leite fervendo e a subida da ladeira? Pense, compare e responda: Muda o trabalho final conforme a maneira que subimos?



Fonte: <http://k41.phase.com>

Em termodinâmica, essas mesmas idéias sobre trabalho podem ser sintetizadas em um enunciado conhecido como a Primeira Lei da Termodinâmica, que diz:

"Se o estado de um sistema isolado é alterado mediante a realização de trabalho; a quantidade de trabalho necessária dependerá somente dos estados inicial e final, e não dos meios através dos quais este trabalho foi realizado ou dos estados intermediários entre o início e o fim do processo".

Apenas por uma questão de convenção, estabelecemos que o trabalho realizado sobre o sistema, como no caso do fio que é puxado, é positivo. O trabalho realizado pelo sistema, como no caso do leite que ao subir empurra o ar que está sobre sua superfície, é negativo!

Mas o que essas idéias sobre trabalho têm a ver com o tal conceito de calor? É justamente nesse enunciado da primeira lei que surge a conexão.

## ■ Uma representação matemática para a Primeira Lei

Lendo com atenção, você pode observar que nesse enunciado da primeira lei não há muita referência a informações quantitativas, ou sobre a natureza desse trabalho. Muitas vezes a comunidade científica protesta contra esse tipo de enunciado, isso porque, na maioria das situações uma teoria só consegue adesões quando pode ser lida por meio de sentenças matemáticas.

Vamos então procurar uma sentença dessas para esse enunciado?

Como diz o enunciado, o trabalho em um sistema isolado é o mesmo independentemente da trajetória. Assim, em termodinâmica, definimos uma grandeza chamada de “energia interna do sistema” ( $U$ ), cuja diferença ( $U_f - U_i$ ) entre os estados final e inicial é igual ao trabalho ( $W_{iso}$ ) realizado num processo isolado. Como o processo é isolado, o trabalho é realizado pelo sistema. Matematicamente escrevemos:

$$\begin{aligned} U_f - U_i &= -W_{iso} \\ U_i - U_f &= W_{iso} \end{aligned}$$

Uma outra maneira de interpretar a equações precedentes, é considerar que o trabalho realizado num processo em que o sistema está isolado é igual ao decréscimo da energia interna do sistema.

Quando ocorre uma expansão, ou contração, de um gás, (sem a interferência de um meio externo) dizemos que houve realização de trabalho pelo sistema a custa da energia interna. Uma situação como essa pode ser visualizada quando o cheiro de um perfume se espalha por uma sala espontaneamente.

### Mas e quanto ao calor?

Em situações como a do leite fervendo ou do fio sendo esticado, a realização de trabalho implicou em variações de volume e comprimento. Note, entretanto, que o volume do leite não aumentou sozinho, mas tivemos que colocar a leiteira no fogo. Não foi um processo espontâneo, o leite, neste caso, não constitui um sistema isolado. Mas ao ser aquecido, o leite acaba realizando trabalho.

Assim, finalmente, o calor é compreendido em termos da diferença entre o trabalho total ( $W$ ) realizado durante o processo e o trabalho realizado num processo em que o sistema está isolado ( $W_{iso}$ ).

$$\Delta Q \equiv W - W_{iso}$$

No processo em que o leite sobe na leiteira e derrama, o trabalho para o aumento do volume é feito por causa do fluxo de calor para o sistema. O leite não ferveria se não estivesse sendo aquecido no fogo, não é um sistema isolado.

Numa outra leitura da equação anterior, podemos dizer que num processo em que o sistema está isolado, não há fluxo de calor para o sistema. O trabalho total ( $W$ ) é igual ao trabalho em processo isolado ( $W_{\text{iso}}$ ), por isso  $\Delta Q$  será igual a zero. Processos como esse, onde não há fluxo de calor para o sistema, são chamados de adiabáticos.

Notemos que tanto o fluxo de calor ( $\Delta Q$ ) quanto a energia interna ( $U$ ) são definidos em termos do trabalho mecânico, e portanto a unidade de medida dessas duas grandezas é a mesma do trabalho, ou seja, o Joule (J).

Em alguns processos, o trabalho total ( $W$ ) é maior que o trabalho adiabático ( $W_{\text{iso}}$ ), nesses casos o sinal de  $\Delta Q$  será positivo, e dizemos que houve fluxo de calor para o sistema. Se o trabalho  $W_{\text{iso}}$  for maior que o trabalho  $W$ , então o sinal de  $\Delta Q$  será negativo, caso em que houver fluxo de calor saindo do sistema. O valor de  $\Delta Q$  representará sempre o fluxo líquido de calor durante o processo.

O termo fluxo, usado neste texto, está ligado à nossa interpretação de calor como energia em trânsito, afastando-se da interpretação do calor como fluido. Note que o fato de haver realização de trabalho implica na transformação de um tipo de energia em outro.

O fluxo de calor ocorre de um objeto com temperatura maior para um objeto com temperatura menor. Ou ainda, se a temperatura das vizinhanças for maior que a temperatura do sistema, ocorre fluxo de calor das vizinhanças para o sistema. Em outras palavras, as mudanças de temperatura dos objetos podem ser interpretadas em termos de fluxo de calor ou de transferência de energia.

Temos definido calor ( $Q$ ) e energia interna ( $U$ ) em termos de realização de trabalho. Como essas duas grandezas estão relacionadas?

A variação da energia interna ( $U$ ) foi definida em termos do trabalho adiabático ( $W_{\text{iso}}$ ), como na equação seguinte, que chamaremos de (1):

$$\Delta U = -W_{\text{ad}} \quad (1)$$

O fluxo de calor foi definido como a diferença entre o trabalho total e o trabalho adiabático, como na equação (2):

$$\Delta Q = W - W_{\text{iso}} \quad (2)$$

Isolando  $W_{\text{iso}}$  na equação (2) e substituindo o resultado na equação (1), obtemos:

$$\Delta U = \Delta Q - W \quad (3)$$

Verifique agora, que temos na equação (3) uma relação entre o trabalho total realizado, o fluxo de calor e a energia interna. Tal equação é uma outra forma de se escrever a primeira lei da termodinâmica e é uma expressão do Princípio da Conservação da Energia, um dos princípios mais fundamentais da Física. Qualquer processo no univer-

so obedece a esse princípio: desde a queda de um copo de uma mesa até o aumento do volume do leite durante a fervura.

Existem ainda processos químicos em que o sistema absorve calor, mas tem sua pressão mantida constante. O calor absorvido por um sistema à pressão constante é representado de uma maneira especial, é chamado de variação da entalpia ( $\Delta H$ ) do sistema. Isolando  $\Delta Q$  na equação (3), podemos escrever a entalpia por meio da equação (4):

$$\Delta H = \Delta U - W \quad (4)$$

A definição de entalpia torna-se importante na medida em que muitas reações químicas ocorrem à pressão constante. Através do conceito de entalpia podemos associar o calor à energia absorvida numa reação que se dá à pressão constante.



## DEBATE

No momento em que você se pôs a escrever a sua teoria do calor, sentiu alguma dificuldade? Recebeu críticas de seus colegas? Perceba que em meio as dificuldades, ao longo da história, houve o desenvolvimento de um conceito de calor, aceito atualmente como científico. Diante das discussões feitas ao longo do texto, como você encara suas concepções sobre calor?

## Conseqüências da idéia do calor energia

A idéia de calor energia não pára por aqui, pois acabou tendo participação em outro processo que desencadeou uma verdadeira revolução na história da ciência. Na época da segunda revolução industrial (segunda metade do séc XIX), o controle da temperatura na produção de aço era de grande importância, tendo em vista a qualidade desejada para tal produto. Esse controle era dificultado pelas altas temperaturas envolvidas, as quais inviabilizavam a utilização de termômetros convencionais. Surgiu, então, a necessidade de se pesquisar um novo parâmetro que, ligado à energia desses corpos, servisse de base para medidas de temperaturas.

Quando um objeto está a uma temperatura muito alta, manifesta um certo brilho, uma incandescência, é o caso da lâmpada incandescente, das brasas do fogo e do Sol. Já se sabia que uma das formas de transferência de calor é a irradiação, assim buscava-se uma explicação científica que pudesse dar idéia da quantidade de energia liberada por um corpo aquecido, a chamada radiação térmica, como por exemplo, no processo de produção do aço.



Fonte: <http://imag.search.com>

Os resultados teóricos da termodinâmica, da mecânica e do eletromagnetismo, encontrados até então, estavam em desacordo com os resultados experimentais. Não se havia encontrado uma “fórmula” que pudesse prever com precisão a energia irradiada por um corpo aquecido. Na verdade, as previsões teóricas previam uma energia infinita, resultado que ficou conhecido como “catástrofe ultravioleta”.

Em dezembro de 1900, contudo, Max Planck (1858 – 1947), um professor de termodinâmica, apresentou um artigo sobre as propriedades da radiação térmica que, a princípio, atraiu pouca atenção da comunidade científica, mas acabou sendo um marco para a ciência. Em seus estudos, Planck descobriu que para se explicar a radiação térmica era preciso supor que a energia era emitida em pacotes, ou grãos de ondas eletromagnéticas. Tais grãos foram chamados de *quanta* (plural de *quantum*) de energia.

O artigo de Planck trouxe ao mundo da ciência as idéias da quantização da energia e da natureza dual da matéria, que sob certos aspectos pode se comportar como onda ou como partícula. Essa idéia também foi associada à luz nos trabalhos de Einstein sobre o efeito fotoelétrico. Foi o surgimento da mecânica quântica, e ainda hoje, estudos da estabilidade da matéria, átomos e moléculas são possíveis graças a essas considerações.

**E então, com toda a história contada até aqui, você é capaz de responder a nossa questão inicial?**

## ■ Referências

- ABBAGNANO, N. **História da Filosofia**. vol.1. Tradução de Antonio B. Coelho, Franco de Souza e Manuel Patrício. Lisboa: Editorial Presença, 1999.
- ABRANTES, C. C. P. Newton e a Física Francesa no Século XIX, in **História e Filosofia da Ciência**, Campinas, Série 2, 1 (1): 5-31, jan.-jun. 1989.
- BRAGA, Marco. *et al.* **Lavoisier** – E a ciência no iluminismo. São Paulo: Editora Atual, 2000.
- QUADROS, Sérgio. **A Termodinâmica e a Invenção das Máquinas Térmicas**. São Paulo: Scipione, 1996.

## ■ Obras Consultadas

- ADKINS, C. J. **Equilibrium Thermodynamics**. 3.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- CHASSOT, Ático. **A Ciência através dos tempos**. 2.ed. São Paulo: Moderna, 2004.

MENEZES, L. C. **A Matéria** – Uma Aventura do Espírito: Fundamentos e Fronteiras do Conhecimento Físico. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

RESNICK, R.; ROBERT, R. **Física Quântica**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1978.

RUSSELL, J. B. **Química Geral**. 2.ed. São Paulo, Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1994.

SEARS, F. W.; SALINGER, G. L. **Termodinâmica, Teoria Cinética e Termodinâmica Estatística**. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A., 1975.

TIPLER, Paul A. Tradução MACEDO, Horácio. **Física**. 3.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.



# **ANOTAÇÕES**



# VAPOR E MOVIMENTO

■ Luiza A. C. Polak<sup>1</sup>

*S*e é possível transformar carvão em cinza, por que a cinza não pode ser transformada em carvão?

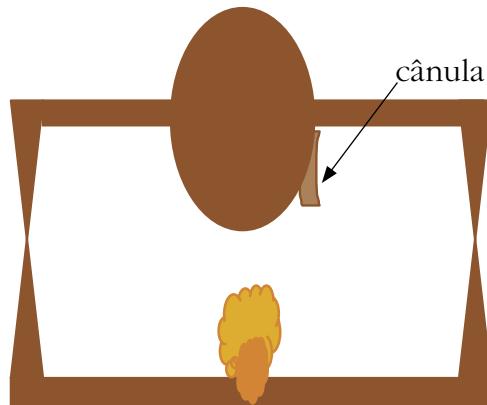


O princípio da conservação da energia estabelece que as diferentes formas de energia podem ser transformadas umas nas outras, mas nunca criadas ou destruídas, sendo que a energia total do universo é constante.

**O carvão transformado em cinzas, pela combustão, não retorna em carvão ao ser resfriado. Será que o princípio da conservação de energia não é universal?**

Para podermos responder a essas questões, torna-se necessário recuarmos um pouco no tempo para estudarmos as máquinas que transformam a energia térmica em outras formas de energia.

Instrumentos que transformavam energia térmica em energia mecânica existem desde a antigüidade, como, por exemplo, a máquina de Herão de Alexandria (50 a.C.-50 d.C.) (Fig. 1). Embora não tivesse nenhuma aplicação prática, pois sua utilização restringia-se a uma simples curiosidade, essa curiosidade mostrou que é possível produzir movimento através da energia térmica.



■ Fig. 1: Representação da máquina de Herão. Para o seu funcionamento, colocava-se a água na esfera provocando o seu aquecimento com fogo. O vapor saía pela cânula, movendo a esfera sobre o eixo.

Posteriormente, em 1698, Thomas Savery (1650-1715) criou uma máquina que funcionava como uma bomba d'água, da qual não se tem notícia de quantas foram construídas, nem de sua real eficácia na prática.

O precursor das máquinas a vapor com alguma aplicação prática foi o inglês Thomas Newcomen (1663-1729), em 1712. A máquina, por ele criada, necessitava de uma quantidade grande de material combustível para funcionar e a sua utilização ficava restrita ao bombeamento de água a grandes alturas. Para que você tenha uma idéia de sua utilidade, no ano de 1930 ainda existia uma máquina de Newcomen em funcionamento.

Apesar dos fatos citados acima, sobre os momentos iniciais de estudos das máquinas térmicas, quando pesquisamos sobre esse assunto, quase sempre o crédito da construção das máquinas térmicas é atribuído a James Watt (1736-1819), tanto que a unidade de potência, inicialmente ligada à potência do vapor, leva seu nome.

Watt, a partir de estudos da máquina de Newcomen, separou o pistão do reservatório de água em baixa temperatura, utilizada para resfriar o vapor e condensá-lo, mantendo-o sempre em uma temperatura elevada, economizando, assim, combustível.

Na máquina de Watt, Fig. 2, a água é transformada em vapor na caldeira através do calor cedido pela fonte quente. Esse vapor movimenta o pistão (energia térmica é transformada em energia mecânica) e o vapor não aproveitado é novamente transformado em água, cedendo calor para a fonte fria, reiniciando o processo.

Durante os séculos IV a XIII, na Europa Ocidental, a maioria do trabalho era executado através de tração animal. Nos séculos XV a XVIII, na Europa Ocidental, as máquinas movidas pela força da água ou dos ventos influenciaram o desenvolvimento dos meios de produção. Essas mudanças foram se estabelecendo gradativamente e tiveram uma grande importância na mudança da relação entre capital e trabalho.

A partir do final do século XVIII a Grã-Bretanha passa a utilizar as máquinas térmicas no desenvolvimento das indústrias de mineração.

É evidente que nenhuma economia industrial pode desenvolver-se além de um certo ponto se não possui uma adequada capacidade de bens de capital.

Felizmente essas desvantagens afetavam menos a mineração, que era principalmente a do carvão, pois o carvão tinha a vantagem de ser não somente a principal fonte de energia industrial do século XIX, como também um importante combustível doméstico, graças, em grande parte, à relativa escassez de florestas na Grã-Bretanha.

O crescimento das cidades, especialmente Londres, tinha causado uma rápida expansão da mineração do carvão desde o final do século XVI. Por volta dos princípios do século XVIII, a indústria do carvão era substancialmente uma moderna indústria primitiva, mesmo empregando as mais recentes máquinas a vapor (projetadas para fins semelhantes na mineração de metais não-ferrosos, principalmente na Cornualha) nos processos de bombeamento.

Portanto, a mineração do carvão quase não exigiu nem sofreu uma importante revolução tecnológica, suas inovações foram antes melhorias do que transformações de produção. Mas sua capacidade já era imensa e, pelos padrões mundiais, astronômica.

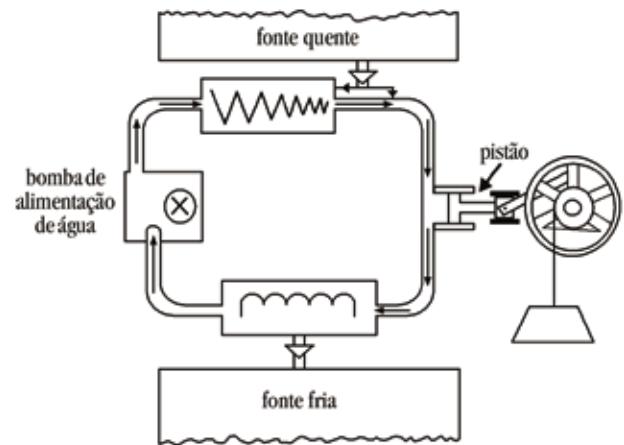


Fig 2: Representação da máquina de watt (adaptado de PINHO E ANDRADE. In: ROCHA, 2002, p. 152)

(Adaptado de HOBSBAWM, 2005)



## ATIVIDADE

Leia os textos a seguir. Após, reflita sobre os textos lidos e procure responder às questões colocadas:

**Texto 1:** “A dinamização da economia de mercado pelo capitalismo ganha impulso com a Revolução Industrial, que tem início na Grã-Bretanha, no último quartel do século XVIII. Ela consiste essencialmente na invenção de máquinas capazes de realizar tarefas que antes requeriam a mão do homem. Na manufatura, a operação é realizada pelo trabalhador com o auxílio da ferramenta. Na maquinofatura, a ferramenta é engastada numa máquina, que substitui o trabalhador na realização de uma tarefa. A máquina é mais “produtiva” do que o homem porque supera facilmente os limites físicos do organismo humano. Movida por força hidráulica e pouco depois pela energia do vapor, a máquina pode dar conta de trabalhos para os quais o homem é fraco demais”. (SINGER, 1987, p. 16-17)

**Texto 2:** No século XIX, as máquinas térmicas tornaram-se de grande importância para o desenvolvimento das indústrias de mineração da Inglaterra, as minas de carvão estavam no seu limite de exploração, a drenagem da água do interior das minas e a elevação do carvão eram muito difíceis, o que com a máquina tornou-se uma tarefa de mais fácil execução.

Mas, não foi só na mineração que as máquinas a vapor tiveram uma grande contribuição. As outras indústrias beneficiaram-se da mobilidade da máquina a vapor, pois podiam agora se instalar em qualquer lugar não dependendo mais da presença de quedas d’água ou ventos para mover seu maquinário.

A importância das máquinas a vapor foi tal que Carnot disse que a Inglaterra poderia prescindir até de sua esquadra naval, mas não de suas máquinas a vapor.

Carnot ressaltou que apesar de sua grande importância social, econômica e política muito pouco se sabia sobre o funcionamento destas máquinas. (Adaptado de: AURANI, 1985)

1. Carnot deixa a marinha inglesa em segundo plano, quando a compara com as máquinas térmicas. Entretanto, a marinha inglesa tinha uma função de proteção a este reino que é cercado de água. Por que então a marinha inglesa ficou em segundo plano?
2. Além da evolução científica, a máquina a vapor, como citado no texto anterior, teve também um grande papel social, político e econômico. Que vantagem representou o uso da máquina para o capital? E para o trabalhador?

A Revolução Industrial britânica contribuiu para a economia mundial no século XIX, com o desenvolvimento das máquinas e das ferrovias. A Grã-Bretanha já tinha assumido o lucro privado e o desenvolvimento econômico como objetivos políticos governamentais da maior importância. Mas, era preciso uma nova política e ideologia para que o capitalismo se consolidasse em escala mundial. Nesse sentido, a contribuição viria dos franceses, através da Revolução Francesa.

A revolução francesa não foi feita ou liderada por um partido ou movimento organizado, no sentido moderno, nem por homens que estivessem tentando levar a cabo um programa estruturado. Nem mesmo chegou a ter “líderes” do tipo que as revoluções do séc. XX nos tem apresentado, até o surgimento da figura pós-revolucionária de Napoleão. Não obstante, um surpreendente consenso de idéias gerais entre um grupo social bastante coerente deu ao movimento revolucionário uma unidade efetiva. O Grupo era a “burguesia”; suas idéias eram o liberalismo clássico, conforme formuladas pelos “filósofos” e “economistas” e difundidas pela maçonaria e associações informais.

Mais especificamente, as exigências do burguês foram delineadas na famosa Declaração dos Direitos do Homem e Cidadão, de 1789. Este documento é um manifesto contra a sociedade hierárquica de privilégios nobres, mas não a favor de uma sociedade democrática e igualitária. Os homens eram iguais perante a lei e as profissões estavam igualmente abertas ao talento; mas se a corrida começasse sem handicaps, era igualmente entendido como fato consumado que os corredores não terminariam juntos. (HOBSBAWM, 2005, p.90-91)

O capitalismo industrial adotou os ideais liberais que buscavam a unificação de todos os mercados, a não aceitação da intervenção do estado no funcionamento deste mercado, a propagação da liberdade dos indivíduos e a livre concorrência.

A Revolução Industrial, por estar voltada para problemas gerados na indústria, tornou-se um estímulo para a atividade científica no período entre os séculos XVIII e XIX. Nesse período, ocorreram profundas modificações na vida social e econômica com o estabelecimento da sociedade capitalista.

Você pode estar pensando que é a primeira vez na história que uma teoria científica nasceu da necessidade da sociedade. Pois, se pensa assim, está muito enganado: Lembra-se dos lançamentos verticais? Sabia que eles só foram estudados para melhorar a pontaria dos canhões, uma rudimentar máquina térmica, durante as guerras?



## ATIVIDADE

**Texto 1:** A maioria dos progressos tecnológicos foi obra de inventores e artífices que usavam os conhecimentos práticos e pouca ou nenhuma ciência teórica.

Segundo este ponto de vista, a Revolução Industrial foi desencadeada por fatores sociais e econômicos, não pela Ciência. A máquina a vapor, que utilizou as forças naturais do calor e do vapor para acionar máquinas para fabricação e transportes de mercadorias, foi inventada por empresários habilidosos que só empregaram ocasionalmente métodos científicos e tinham escassos conhecimentos científicos.

A Ciência tem sido freqüentemente estimulada por problemas e invenções tecnológicas. No século XIX, Carnot e Clapeyron usaram o trabalho de projetistas de máquinas a vapor. James Prescott Joule, co-descobridor da primeira lei da termodinâmica, voltou-se para o estudo do calor enquanto tentava projetar um motor eletromagnético. (Adaptado de: KNELLER, 1980, p. 249-251)



## ATIVIDADE

**Texto 2:** O extraordinário desenvolvimento das forças produtivas alcançado pelo capitalismo industrial resulta tanto do fomento da atividade científica como da estreita interligação dos laboratórios com as fábricas, estas recebendo, com rapidez, os resultados das pesquisas e os aplicando à produção e enviando de volta com igual rapidez os novos problemas suscitados pelo avanço técnico. (SINGER, 1996, p. 21)

1. Os seres humanos, ao longo da história, vem produzindo bens e serviços necessários à sua subsistência. Nessa produção, o homem interage através da sua força de trabalho com diversos instrumentos de produção (matéria prima, equipamentos, máquinas, etc...). Cada sociedade humana está associada a um modo de produção que é dominante. Pesquise e caracterize as transformações que as sociedades humanas sofreram em decorrência do modo de produção, desde o modo de produção presente no feudalismo até os dias atuais.
2. O texto 2 mostra uma associação entre ciência e técnica no desenvolvimento da sociedade capitalista. Que consequências essa associação trouxe para a produção de bens e serviços?

A termodinâmica evolui a partir de necessidades postas pela indústria capitalista que necessitava do desenvolvimento desta ciência para seu completo estabelecimento. Nesta evolução, Sadi Carnot (1796-1832), físico e engenheiro militar nascido na França, teria importância fundamental, conforme veremos a seguir.

Carnot utilizou como ponto de partida a busca pelo aumento da eficiência da máquina a vapor. O setor industrial dependia destas máquinas, pois seu aperfeiçoamento, com consequente aumento de eficiência, traria benefícios para a produção.

**Eficiência lembra ação, produzir um efeito.**

**Será que isso tem a ver com o fato do carvão transformado em cinzas não poder retornar em carvão?**



- Sadi Carnot (1796-1832). Propôs uma teoria para explicar o funcionamento das máquinas térmicas no seu livro *Reflexões sobre a potência motriz do fogo*. Fonte: <http://br.geocities.com/saladefisica9/biografias/carnot.htm>

Carnot, que aceitava a teoria do calórico, fez uma analogia do que acontecia na máquina com uma queda d'água: a água cai de uma altura maior para uma altura menor porque a água do alto possui maior energia potencial gravitacional, isto é, mais potência motriz. Da mesma forma, o calórico é transferido da fonte quente (que possui mais calórico) para a fonte fria (que possui menos calórico). Nesta transferência, a potência motriz do calórico é transformada em trabalho mecânico. Carnot observou que existia um equilíbrio entre o calórico cedido e recebido, o qual não era destruído e sim transportado do corpo quente para o corpo frio e demonstrou que é impossível acontecer essa transferência sem perdas.

Dizer que a transferência de calórico acontece com perdas significa que nem toda a potência motriz fornecida à máquina é usada para fa-

zer o trabalho para qual ela foi projetada. Isso quer dizer que não existe máquina térmica cujo rendimento seja de 100%.

### A lei da conservação da energia estaria errada?

Ao expor suas idéias, Carnot iniciou as bases para que se estabelecesse o que seria chamado mais tarde de “2<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica”. Além disso, foi capaz de perceber que a potência motriz do calórico dependia exclusivamente da temperatura das fontes quente e fria.

Querendo obter uma máquina mais eficiente, Carnot idealizou uma máquina térmica cujo rendimento seria o maior dentre todas. Essa máquina utilizaria não mais o vapor d'água, como a de Watt, e sim um outro gás.

### Como isso seria conseguido?

Através de seus estudos, ele pôde perceber que a máxima eficiência seria obtida unicamente quando a mudança de temperatura do gás no cilindro, onde encontra-se o pistão, fosse causada pela variação do volume desse gás. Isso se daria quando não houvesse contato entre as fontes fria e quente da máquina.

Entretanto, como conseguir a variação de volume (contração e dilatação do gás) sem o contato entre as fontes fria e quente? Pois é aí que entra a máquina idealizada por Carnot. Como poderíamos melhor visualizar esta máquina? Uma das formas seria a representação por meio de um esquema do funcionamento da máquina. Uma outra forma seria através de um diagrama ou gráfico, representando o ciclo completo da máquina de Carnot, mas isto fica para você.



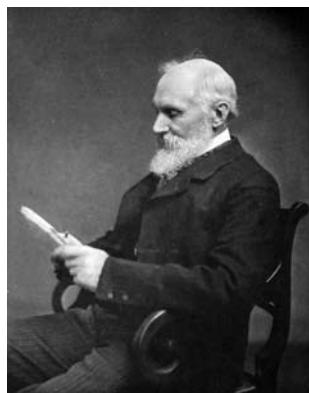
### PESQUISA

Que tal uma pesquisa em livros, revistas científicas e até na Internet a respeito da máquina de Carnot.

1. Faça um desenho esquemático do funcionamento da máquina e também a sua representação através de um gráfico. Que transformações térmicas acontecem durante o funcionamento da máquina?
2. Na máquina idealizada por Carnot, não existe contato entre a fonte fria e a fonte quente. Que tipo de processo físico ocorre?
3. Procure responder à seguinte questão: é possível utilizar a máquina de Carnot em uma situação real?

A representação gráfica do ciclo teórico de Carnot e do seu funcionamento foi feita por Émile Clapeyron (1799-1864). Esse cientista também incorpora uma formulação algébrica ao trabalho de Carnot. O procedimento adotado por Clapeyron confere maior clareza à obra de Carnot, sendo de fundamental importância para o estudo da termodinâmica.

A esta época, muitos pesquisadores já relacionavam o calor com outras formas de energia (conversão de energia cinética em calor através da fricção e liberação de energia em reações químicas), existindo



■ Lorde Kelvin (1824-1907).  
Fonte: <http://hsci.cas.ou.edu>

já alguns princípios para explicar o Trabalho nas máquinas térmicas, dentre os quais destacamos:

- **Princípio de Carnot-Kelvin: O Trabalho produzido depende da diferença de temperatura entre a fonte fria e a fonte quente.**
- **Princípio de Mayer-Joule: O Trabalho produzido é proporcional ao Calor**

Mas não existia ainda uma formulação matemática para a termodinâmica. Essa necessidade estava posta para a época, pois o determinismo newtoniano instituído por Joseph Louis Lagrange (1736-1813) e Pierre Simon (1794-1827), o Marquês de Laplace, era predominante na comunidade científica. Uma ciência, sendo apenas experimental, sem formulação matemática, tinha sua aceitação dificultada.

Os estudos feitos por Mayer, Joule e Helmholtz, ligados à idéia da conservação de energia, previam que a quantidade de calor recebida pelo corpo de menor temperatura deveria ser menor que aquela cedida pelo corpo de maior temperatura. A diferença entre as duas temperaturas seria equivalente à quantidade de trabalho produzida.

Nesse contexto, Sir William Thomson (1824-1907), cientista inglês também conhecido como Lorde Kelvin, suscita uma questão:

### **Como a condução de calor entre dois corpos compensa o efeito mecânico que pode ser obtido da diferença de temperatura inicial?**

Para responder a esta questão, Rudolf Clausius (1822-1888) estudou a produção de trabalho pelo calor através de processos cíclicos, como proposto por Carnot. O problema real era que sem a idéia do calórico não era possível justificar a assimetria existente entre processos reversíveis e irreversíveis. Leia o texto colocado na seqüência que poderá ajudá-lo a entender essa assimetria.

Os processos irreversíveis são aqueles que possuem uma direção preferencial no tempo, não podendo ser executados “de trás para frente”. Quando um mergulhador pula em uma piscina, sua energia cinética é convertida em calor, aquecendo a água. É um processo irreversível: o resfriamento súbito da água não devolveria o mergulhador ao trampolim. Já pensou na fumaça voltando pela chaminé, enquanto a sala se resfria e a lenha reconstitui-se a partir das cinzas? É um absurdo, mas perfeitamente possível se encarado unicamente sob a óptica da conservação da energia.

Mas o que se verifica é uma clara assimetria: energia mecânica pode ser transformada em calor sem restrições, mas a conversão de calor em energia mecânica só ocorre sob circunstâncias especiais. Por quê?

A teoria de Carnot também tem problemas com os processos irreversíveis. Em tais processos, parece haver uma inegável produção de calórico, como nos canhões do conde Rumford. Surge a necessidade de uma teoria do calor que justifique a existência desses processos, até porque representam a grande maioria dos processos físicos. O mundo real possui uma clara ordenação temporal. Qualquer filme visto de trás para frente exibe situações absurdas. Essa tendência natural ao imperfeito, implícita na ordem temporal, precisa de uma justificativa teórica. (Adaptado de: QUADROS, 1996)

**Será que esses processos irreversíveis têm alguma coisa a ver com o fato do carvão transformado em cinzas não poder ser revertido em carvão com o resfriamento?**

Em seus estudos, Clausius buscou a conciliação entre a universalidade da Primeira Lei da Termodinâmica e a separação entre os processos reversíveis e irreversíveis. Ele postulou que:

**“O calor não pode nunca passar de um corpo mais frio para um corpo mais quente sem que ocorram ao mesmo tempo mudanças associadas”.**

Tudo que sabemos em relação à troca de calor entre dois corpos de temperatura diferentes confirma isso, pois o calor em toda parte manifesta uma tendência em igualar diferenças de temperatura e, consequentemente, em passar numa direção contrária, isto é, do corpo mais quente para o mais frio.

O postulado anterior consiste no que hoje chamamos de Segunda Lei da Termodinâmica, versão de Clausius. Na prática, se esse postulado não fosse verdadeiro, seria possível refrigerar um ambiente com um refrigerador, sem o uso de eletricidade, por exemplo.

**Mas como equacionar essa lei? Comecemos pensando no objetivo de uma máquina térmica: converter uma certa quantidade de calor em trabalho. Bem, e daí?**

Na verdade, a Segunda Lei não invalida a primeira, a consideração é apenas de que a história toda ainda não foi contada. Na prática, o reservatório térmico que aparece no ciclo de Carnot, pode ser, por exemplo, a atmosfera ambiente ou grandes massas de água, e como os estados final e inicial do fluido são os mesmos, a energia interna pode ser considerada constante ( $\Delta U = 0$ ). Assim, a Primeira Lei da Termodinâmica pode ser reescrita como na Equação (1):

$$W = \Delta Q = Q_q - Q_f \quad (1)$$

Esse  $\Delta Q$  é o calor absorvido no processo, dado pela diferença entre o calor fornecido pela fonte quente ( $Q_q$ ) e o calor rejeitado ( $Q_f$ ) para a fonte fria, que vai para o reservatório frio.

O rendimento ( $\eta$ ) de uma máquina é definido como a razão entre o trabalho efetuado e o calor absorvido do reservatório quente:

$$\eta = \frac{W}{Q_q} \quad (2)$$

A combinação das Equações (1) e (2) leva a:

$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_q} \quad (3)$$

No caso do rendimento máximo (100%), todo o calor absorvido do reservatório quente seria transformado em trabalho, e a rejeição de calor à fonte fria seria nula ( $Q_f = 0$ ). Mas para que o rendimento de uma máquina térmica seja de 100%, ela não pode perder energia por meio de atrito entre as peças, viscosidade, ou qualquer força que produza calor. Mas você já deve ter percebido que a carcaça de um condicionador de ar aquece, então, nesse caso, essa condição não é satisfeita.

### Como equacionar esse problema de rendimento, sem se esquecer da questão da reversibilidade ou não dos processos?

Com base nas idéias de Carnot, Clausius associou o trabalho realizado pelas máquinas térmicas com a diferença entre a Potência Motriz da fonte quente ( $P_q$ ) e da fonte fria ( $P_f$ ). Para ele essa potência seria dada pelo produto de uma grandeza, a qual chamou de entropia (S), pela temperatura, como na Equação (4).

$$W = S_q T_q - S_f T_f \quad (4)$$

Comparando as equações (4) e (1), você pode perceber que elas serão iguais somente se a entropia for a razão entre o calor trocado e a temperatura:

$$S = \frac{Q}{T}$$

**Você deve estar se perguntando: “mas que vantagem temos com isso?”**

Com essa formulação, Clausius constatou que se um processo é reversível, ou se uma máquina tem rendimento de 100%, a entropia do sistema se conserva. Se, por outro lado, o sistema não é reversível ou se uma máquina não tem rendimento de 100%, a entropia do sistema aumenta ( $\Delta S > 0$ ).

Assim, a Segunda Lei da Termodinâmica pode ser escrita em termos da entropia do sistema:

**“Em qualquer processo, a entropia do universo nunca diminui”.**



## DEBATE

No caso do carvão sendo transformado em cinzas, seria possível diminuir a entropia espontaneamente? Como? Que tipo de processo ocorre com o carvão e o que isso tem a ver com a diminuição ou aumento da entropia?

**Você deve estar curioso, afinal, o que vem a ser essa tal de entropia?**

Por enquanto, vamos pensá-la apenas como parâmetro usado para descrever a reversibilidade ou não de um processo, mas fisicamente a mensagem da entropia é mais importante ainda. Não deixe de ler o capítulo 7 (Verso e Reverso – A ordem do Universo), onde essa grandeza receberá um tratamento mais aprofundado.

Voltando à questão das máquinas térmicas, Lord Kelvin tratou da irreversibilidade, observando que não é possível uma máquina térmica cíclica, em que todo o calor seja transformado em trabalho. Ele postula o que chamamos segunda lei da termodinâmica, versão Kelvin:

**“Não existe uma máquina térmica cujo rendimento seja 100%”.**

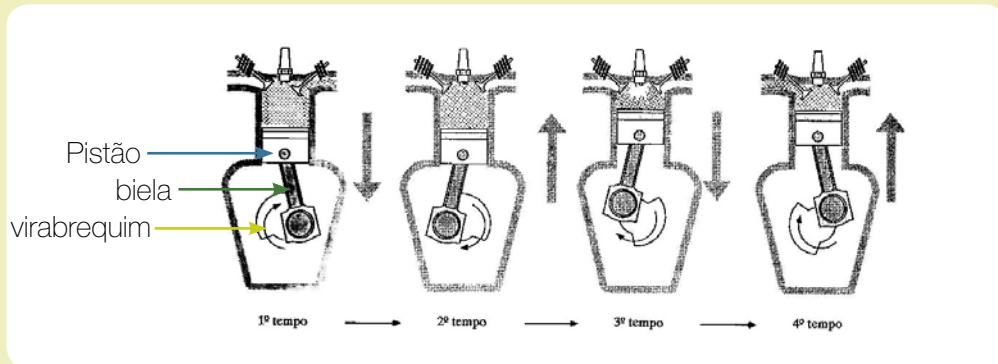
### Lembra do que foi dito a respeito da entropia neste caso?

Podemos observar que sem a conservação da energia e sem o calor ser visto como uma forma de energia, as leis da termodinâmica não teriam a forma que tem hoje, ficando talvez restritas a enunciados qualitativos.

Além dos refrigeradores domésticos, os motores dos automóveis ou dos aviões também são máquinas térmicas. Esses motores funcionam em quatro tempos. Nos automóveis existem de 4 a 8 cilindros, nos aviões chegam até 24 cilindros. Veja a representação do funcionamento de um destes motores:

- 1º tempo-admissão: O pistão acionado pela biela e pelo virabrequim afasta-se do fundo do cilindro e cria uma queda de pressão. Abre-se a válvula Y e produz-se uma mistura gasosa (vapor de combustível e ar).
- 2º tempo-compressão: Chegando a extremidade do cilindro, o pistão volta para o fundo, a válvula agora fechada. O gás aspirado reduz-se ao volume da câmara de combustão. A compressão favorece a inflamação da mistura detonante.
- 3º tempo-explosão: Uma faísca produzida pela vela ocasiona a explosão da mistura de gases. A alta pressão e temperatura dos gases que se expandem propiciam o fornecimento de trabalho exterior.
- 4º tempo-escape: A válvula X é aberta, resfriando-se e anulando a pressão. O pistão volta ao fundo do cilindro expelindo os gases queimados. Recomeça-se o ciclo.

Note que o processo é nada mais que compressão e expansão de gases.



(Adaptado de GREF, 2005)

Nestes motores, devemos resfriar o cilindro para que a alta temperatura dos gases não carbonize o óleo usado na sua lubrificação, o que ocasionaria a aderência do pistão ao cilindro. Faz-se a refrigeração por meio da circulação de água e radiador.

A mistura de gás combustível e ar é dosada no carburador. O combustível líquido é pulverizado por corrente de ar aspirado pelo pistão, e como o líquido é volátil, as gotas arrastadas vaporizam-se rapidamente.

Mesmo com os carros modernos que utilizam injeção eletrônica e muitas outras inovações o motor ainda não sofreu modificações. Ele continua com os quatro tempos: ignição, compressão, explosão e escape. O que mudou foram as imediações do motor, não o próprio motor.



## DEBATE

1. Discuta com seus colegas se realmente os meios de transporte, que tem como responsável pelo movimento as máquinas térmicas, foram uma solução para o transporte da população em comparação com a tração animal. Quais as vantagens de um sobre o outro?
2. Há algum meio de transporte moderno que não dependa ou não seja uma máquina térmica?
3. Quais seriam as consequências na atualidade se deixássemos de utilizar os modernos meios de transporte e voltássemos a usar a tração animal como meio de locomoção a longas distâncias?

Neste estudo vimos que a aparente violação da lei da conservação da energia nos processos irreversíveis foi explicada pelas Leis da termodinâmicas através das resolução dos problemas levantados no âmbito da temática das máquinas térmicas.

Neste instante, a título de uma conclusão, você poderia responder ao questionamento inicial: **Conseguimos transformar carvão em cinzas. Por que então não conseguimos transformar cinza em carvão?**

## Referências

- AURANI, K. M. **Ensino de Conceitos**: estudo das origens da 2<sup>a</sup> Lei da termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII. São Paulo, 1985. Dissertação de mestrado. USP.
- GREF. **Física 2**. São Paulo: Edusp, 2005.
- HOBSBAWM, E. J. A. **Era das Revoluções 1789-1848**. São Paulo: Paz e Terra, 2005.
- KNELLER, J. **A Ciência como construção humana**. São Paulo: Edusp, 1980.
- QUADROS, S. **A Termodinâmica e a invenção das máquinas térmicas**. São Paulo: Editora Scipione, 1996.
- SINGER, P. **O Capitalismo sua Evolução sua Lógica e sua Dinâmica**. São Paulo: Editora Moderna, 1987.

## Obras Consultadas

FEYMMAN, R.P.; SANDS, M.; LEYGTON, R. B. **The Feynman Lectures on Physics - V I**. Palo Alto: Addison-Wesley Publishing Company, 1964.

ROCHA, J. F. M. (org). **Origens e Evolução das Idéias em Física**. Salvador: EdUFBa, 2002.

SEARS, F. W.; SALINGER, G. L.: **Termodinâmica, Teoria Cinética e Termodinâmica Estatística**. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A., 1975.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. **A Física Moderna**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.

TIPLER, P.. **Física Para Cientistas e Engenheiros**. Vol. 2. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.



### ANOTAÇÕES

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

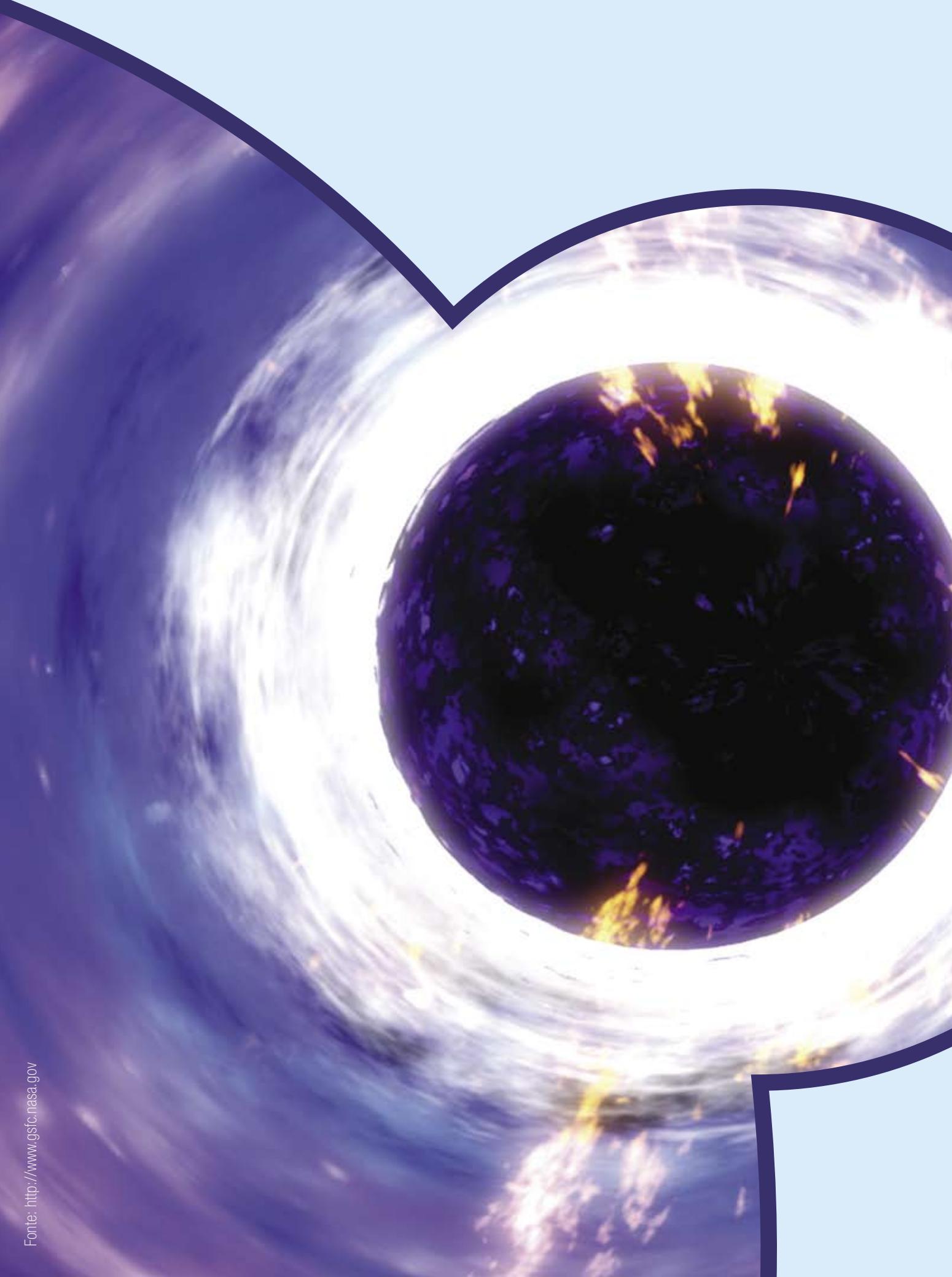
---

---

---

---

---



# VERSO E REVERSO: A ORDEM NO UNIVERSO

■ Luiza A. C. Polak<sup>1</sup>

Quem se tornou sábio em origens antigas, vede, esse acabará por procurar por fontes do futuro e por novas origens.

Ó meus irmãos, ainda não falta muito, e surgirão novos povos e novas fontes correrão murmurantes para novas profundezas.

O tremor de terra, sim – esse soterra muitos mananciais, provoca muita sede; mas também traz forças íntimas e segredos à luz. O tremor de terra torna patentes novas fontes. No tremor de terra de velhos povos irrompem novas fontes. (Nietzsche, 1999, p. 236)

**P**ara Nietzsche um conhecimento somente é verdadeiro enquanto servir aos propósitos ou, no caso da Física, enquanto prever os fenômenos. Ele nos diz que o conhecimento não deve ser visto como estagnado, mas em constante mutação.

**Parafraseando-o: o Universo está em constante transformação. Em se tratando de Física, o que seria esta transformação? Ela é passível de ser expressa em uma equação, se existir?**

O advento das máquinas térmicas em meados do século XIX, e a descoberta simultânea da conservação de energia entre 1842 e 1847, abriram as condições para que Rudolf Julius Clausius (1822-1888) formulasse o conceito de entropia em seu terceiro artigo sobre as leis da termodinâmica, em 1897.

Clausius teve como base, também, os conceitos sobre calor e temperatura de Sadi Carnot (1796-1832), dos quais teve conhecimento através de trabalhos de Clapeyron (1799-1864) e William Thompson (1824-1907).

Clausius, por meio da formulação do conceito de entropia, uniu duas teorias sobre o trabalho produzido pelas máquinas térmicas (Carnot-Kelvin e Mayer- Joule). Na primeira, o trabalho produzido dependia da qualidade (temperaturas da fonte fria e quente), e na segunda, o trabalho produzido dependia da quantidade (a quantidade de calor).



## ATIVIDADES

1. Pesquise, em dicionários, o significado das palavras energia e entropia. Faça um quadro com as definições encontradas. Sintetize estas definições em uma única palavra.
2. De acordo com a pesquisa realizada, foi encontrada alguma relação entre energia e entropia?
3. Compare o que encontrou com a etimologia da palavra entropia.

Para-se chegar a essa nova grandeza física, várias mudanças de conceitos tiveram que ser efetuadas, tais como: o calor teve que evoluir de um fluido presente nos corpos para uma forma de energia.

Também as leis da termodinâmica tiveram que ser expressas matematicamente. Até então, essas leis eram somente enunciados qualitativos, e antes de enunciar o conceito de entropia, Clausius escreveu de forma matemática a segunda lei da termodinâmica somente assim, conseguindo chegar ao conceito de entropia. Mas qual o significado de se escrever matematicamente uma lei física?

Até que fossem expressas matematicamente, as Leis da Termodinâmica sofreram inúmeras críticas. Quem criticava? E por que criticava?

Nietzsche, em seu livro *Crepúsculo dos Deuses*, diz que o homem é histórico e que ao isolarmos este de seu momento histórico estaremos cometendo uma falta grave. O sujeito é o produto de seu meio e suas vivências.

De fato, para compreender não só a Termodinâmica, mas qualquer teoria científica é necessário recorrer ao momento histórico em que ela se desenvolveu.

Então, se você não leu o capítulo 6 – Vapor e Movimento – deste livro leia! Ele ajuda você a compreender uma fase de mudanças sociais e econômicas que ocorreram na Europa, no período entre os séculos XVIII e XIX, que se concretizou com o estabelecimento da economia capitalista.

A máquina a vapor teve papel de destaque na Revolução Industrial e, esse fato, torna-se um estímulo ao desenvolvimento científico que volta-se para os problemas surgidos na indústria e, assim, a Termodinâmica evolui.

Era preciso matematizar não só a entropia, mas toda a Termodinâmica, nos moldes da física newtoniana. Este fato reflete-se na Física da seguinte forma, as leis qualitativas (não matematizadas), passíveis de serem mal interpretadas, perdem seu poder de fogo, as leis quantitativas (matematizadas) tornam-se soberanas. O único modo de se chegar a explicar casos particulares, um fenômeno, é através de princípios gerais, onde a matemática, que vista como universal, exerce um papel preponderante.

Usando este exemplo, Nietzsche, afinal, não tem razão?

### **Os cientistas, em se tratando da entropia, poderiam enunciá-la utilizando como técnica o uso dos sentidos?**

#### **Tempo, Vida e Entropia**

A segunda lei da termodinâmica é, talvez, a lei natural mais fascinante. Em sua versão mais simples, proposta no século 19 por um médico alemão chamado Rudolf Clausius e pelo físico inglês Lord Kelvin, ela afirma que o calor sempre flui de um corpo quente para um corpo mais frio. 'Que lei mais óbvia', imagino que você esteja pensando.

Vamos por partes, começando com fatos que são familiares para todo mundo. Quando você põe um cubo de açúcar no café, o cubo dissolve. Uma vez dissolvido, você não verá os grãos de açúcar voltarem a formar o cubo.

Mais um exemplo: você quebra um ovo e prepara uma omelete. Jamais você verá a omelete se transformar de volta em um ovo. Todos esses processos mostram que existe uma direção preferencial para a passagem do tempo. Se você visse uma omelete se transformando em um ovo, você imediatamente concluiria, por mais estranho que fosse, que o tempo estaria andando para trás.

Os exemplos acima têm um aspecto em comum: todos eles começam em um estado organizado (o cubo de açúcar, e o ovo) e terminam num estado muito mais desorganizado (o cubo dissolvido e a omelete). Esse aumento inevitável da desordem não é uma propriedade exclusiva de cubos de açúcar, ou ovos.

Ele ocorre com todos os sistemas que não trocam energia com o exterior. (No caso do ovo, o sistema tem de incluir a panela e a colher que bate o ovo e, se você quiser, o calor do fogão e a energia que você gasta.)

A quantidade de desordem de um sistema é representada pela sua entropia: quanto mais organizado o sistema, menor é a sua entropia.

O cubo e a xícara de café do exemplo acima têm entropia menor do que os grãos de açúcar espalhados por todo o volume do café. Esse crescimento da entropia é outra expressão da segunda lei da termodinâmica: em um sistema isolado (que não troca energia com o exterior), a entropia nunca decresce, podendo apenas crescer ou permanecer constante.

E, como a segunda lei também está relacionada com a direção da passagem do tempo, podemos dizer que o tempo vai para frente porque a entropia cresce.

Não existe escapatória: um sistema deixado aos seus afazeres irá sempre ficar mais desorganizado (e, consequentemente, mais ‘velho’). O que seria de sua casa se você nunca a limpasse?

Sempre que discuto a segunda lei, as pessoas me perguntam se ela não contradiz a teoria da evolução. Afinal, segundo essa teoria, a vida na Terra começou com seres unicelulares bastante simples e, com o passar do tempo, foi ficando cada vez mais complexa, cada vez mais organizada.

Qualquer animal depende de um influxo constante de energia e de alimentação para viver. A vida não é possível para um ser que exista completamente isolado dos outros animais e do mundo.

Ela só é possível quando existe um decréscimo local de entropia, um aumento local de ordem. Mas, quando consideramos as fontes de energia (o Sol, os alimentos), a entropia total sempre cresce. E o tempo, para o cosmo como um todo, continua sempre marchando avante, indiferente às nossas inquietações existenciais.

(Adaptado de Gleiser, 2002)

A partir da leitura do texto anterior, responda as atividades propostas a seguir:



## ATIVIDADES

1. A entropia é passível de medida?
2. Por que conseguimos nos lembrar do passado e não do futuro?
3. Como você responderia a pergunta feita, pelo autor do texto, Tempo vida e entropia, sobre a teoria da evolução?

Dois dos limites físicos aceitos pela física hoje são a velocidade da luz no vácuo ( $c = 3 \times 10^8$  m/s), para mecânica, e o zero absoluto (zero Kelvin), para a termodinâmica. Quando nos aproximamos destes limites, o mundo físico muda de perspectiva. A massa que para baixas velocidades (presentes no nosso cotidiano) é considerada constante, já não é quando as velocidades aproximam-se da velocidade da luz no vácuo.

**O que será que ocorre com a natureza quando nos aproximamos do zero absoluto? Que grandeza manifesta mais intensamente esse limite?**

É aí que entra a entropia e a 3ª Lei da Termodinâmica!

"Na vizinhança da temperatura do zero absoluto todas as reações em um líquido ou sólido em equilíbrio interno passam sem mudança da entropia."

(Enunciado de Planck para a 3<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica)

### Mas a entropia não aumenta sempre?

Agora que já temos formada uma idéia qualitativa do que seja a entropia, que mede a desordem do sistema, quanto maior a desordem mais próximo do equilíbrio o sistema está, vamos expressá-la de forma matemática.

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Onde:

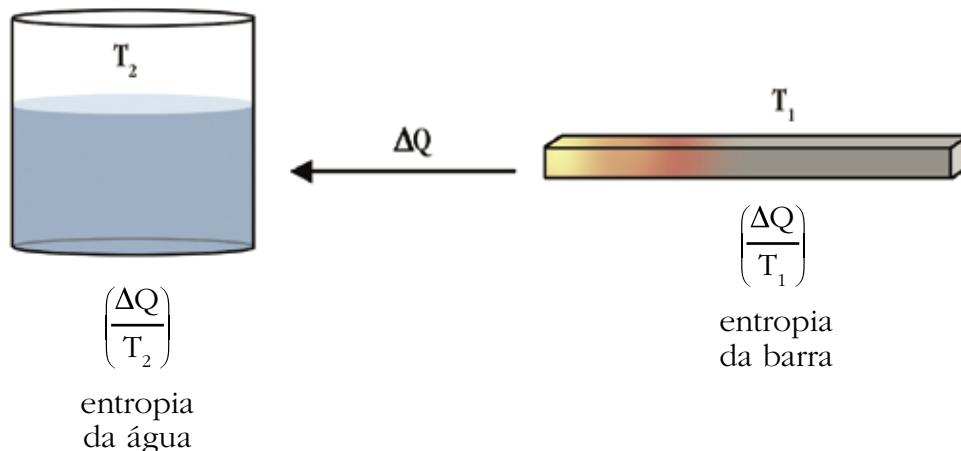
$\Delta S$  = é a variação de entropia

$\Delta Q$  = é a variação do calor ( $Q_2 - Q_1$ )

T é a temperatura

Vamos tentar entender o conteúdo desta expressão matemática, no caso de um sistema que é irreversível, ou seja, que não volta ao seu estado inicial espontaneamente.

Supondo que se coloque uma barra de metal em alta temperatura ( $T_1$ ) em contato com água gelada ( $T_2$ ). Uma certa quantidade de calor ( $\Delta Q$ ) é transferida do corpo com maior temperatura para o corpo de menor temperatura, até que entram em equilíbrio térmico. Na água, a entropia cresce, e na barra de metal, a entropia decresce, assim a variação de entropia do sistema aumenta ( $\Delta S > 0$ ), pois  $T_1 > T_2$ .



A entropia depende exclusivamente dos estados inicial e final do sistema. O que ocorre neste ínterim não interessa em termos do cálculo da entropia.



## ATIVIDADES

1. Discuta, em grupos, o que acontece com a variação da entropia nos seguintes casos:
  - Fusão do gelo.
  - Solidificação da água.
2. Pode existir entropia negativa na termodinâmica? Justifique.

### Importante!

Cada Lei da Termodinâmica está associada a uma variável.

Lei Zero: temperatura ( $T$ );

1<sup>a</sup> Lei: energia interna ( $U$ );

2<sup>a</sup> Lei: entropia ( $S$ )

**Usamos o calor para obtermos a variação de entropia. Calor é uma forma de energia. Como será que podemos relacionar a entropia com as outras formas de energia?**

No caso dos processos reversíveis, o sistema retornando ao seu estado inicial, a variação de entropia é nula, já que a entropia é uma função de estado dependendo unicamente dos estados final e inicial do sistema. Nesse caso nenhuma energia do sistema foi degenerada, toda a energia está disponível para realizar trabalho. O sistema pode então usar esta energia para retornar ao seu estado inicial.

A entropia, assim como a energia, não pode ser destruída, mas, ao contrário da energia, pode ser “produzida” a partir dos processos irreversíveis.

Assim, a Primeira e a Segunda Leis da Termodinâmica podem ser resumidas da seguinte maneira:

A energia do universo é constante.

A entropia do universo tende ao máximo.

Caso a entropia aumente, a quantidade de energia disponível para realizar trabalho útil diminui ou a quantidade de informação que possuímos a respeito do estado interno de um sistema diminui. A segunda Lei é uma afirmação pessimista: essencialmente, afirma que, no universo como um todo, as coisas só podem piorar! (NOLSON, 1981, p.164)

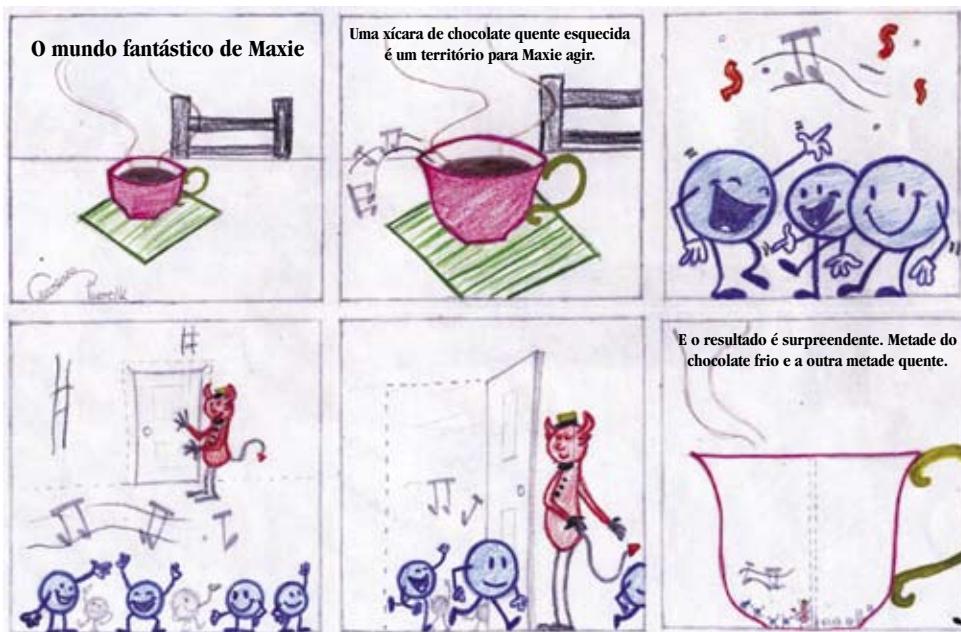
**Então o Princípio da conservação da energia não é universal?  
Esta aparente violação desse Princípio (degradação da energia) acontece nos processos reversíveis. E nos irreversíveis?**

**Como os sistemas naturais e espontâneos funcionam se deixados ao acaso? E se esses sistemas sofressem uma intervenção inteligente?**

### E Maxwell tentou burlar a lei!

Vamos comparar essa situação com o caso de você ordenar as roupas de seu armário, das cores claras para as escuras. Por mais que no

dia-a-dia o armário seja desarrumado, o que podemos associar a um aumento de entropia, você pode voltar a deixá-lo organizado. Nessa situação você estaria diminuindo a entropia do armário.



■ Autor: Cristiano Portela (Aluno do Ensino Médio no Colégio Estadual São José,Lapa – Paraná)

Foi bem assim que o cientista inglês J. C. Maxwell (1831-1879) pensou. Criando um ser teórico e minúsculo, Maxie ou Demônio de Maxwell, capaz de manipular as moléculas de um gás pelo abrir e fechar de uma porta imaginária, usada para separar as moléculas em razão de suas velocidades. Como se estivesse contornando a 2<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica. O que seria este contornar a Segunda Lei?

Entretanto, foi mostrado posteriormente que, para reduzir a entropia do gás, Maxie, causaria um aumento de entropia em outros lugares, já que, para enxergar as moléculas, precisaria de alguma fonte luminosa extra, permanecendo, então, válida a segunda lei.

### Por que a fonte luminosa causaria um aumento na entropia?

Além do aumento na entropia do ambiente causada pela “fonte luminosa extra”, é preciso considerar, também, o aumento da entropia interna, para o próprio Maxie, as enzimas perdem sua função, desnaturando-se. Maxie assim paga o preço de suas ações .

O nosso amiguinho Maxie serve para nos dar uma idéia de como as enzimas trabalham. As enzimas têm a função de catalizar os processos bioquímicos, em outras palavras, acelerá-los.

Para que uma substância transforme-se em outra, é necessário que agreguemos ou retiremos destas elétrons ou átomos, e isto requer energia.

Nos sistemas vivos, as enzimas é que fazem com que a molécula esteja pronta (organizada) para que possa ser transformada em outra, sem que para isso necessite de energia extra.

Uma enzima ou proteína de catálise (amilase, maltase e a pepsina, entre outras) não se transforma, apenas facilita a passagem dos átomos de um lugar para outro. Feito isso, a enzima está pronta para fazê-lo com a próxima molécula, como uma máquina em uma fábrica.

Maxie também é este facilitador, ele deixa com que certo tipo de molécula possa passar de um lugar para outro sem que esta necessite de uma carga extra de energia.

Existem, aproximadamente, 3700 diferentes tipos de enzimas classificadas atualmente. Algumas destas enzimas estão presentes em um único tipo de célula, como o caso das enzimas que convertem tyrosina em dopamina, um neurotransmissor das células nervosas.

Mas também existem enzimas que estão presentes na maioria das células, como a que participa da conversão de glucose e oxigênio em dióxido de carbono e água.

As reações de que as enzimas participam e que ocorrem com facilidade na natureza são extremamente difíceis de serem reproduzidas em laboratório.

Estas ocorrem somente em condições de altas temperaturas, pressão, ou baixos valores de pH. Entretanto, as enzimas funcionam efetivamente em ambientes de temperatura de 37° C, 1 atm de pressão, e pH 7 (pH Neutro), ou seja, um valor nem básico nem ácido.

Aquecendo-se ou variando-se o pH (potencial hidrogeniônico) das enzimas, certa forma de proteína, podemos provocar a destruição de sua estrutura terciária (forma da proteína). Com isso, as enzimas perdem sua ação biológica. Esse fenômeno é chamado desnaturação da proteína.

Ex: aquecendo-se a clara de ovo, a albumina é desnaturada (o processo é irreversível).

As proteínas possuem as estruturas primárias, secundárias e terciárias. A estrutura primária de uma proteína é determinada pela seqüência de aminoácidos em sua cadeia. Relacionada com a disposição espacial das estruturas primárias, que podem ser em forma de hélice ou folha pregueada, está a estrutura secundária. A forma espacial de uma proteína, ocasionada pelo enrolamento de suas estruturas secundárias, é chamada de estrutura terciária da proteína. Esse enrolamento não é aleatório, mas direcionado a função da proteína.

Algumas proteínas, como a hemoglobina, apresentam estruturas formadas pela associação de duas ou mais cadeias de polipeptídios, constituindo-se uma estrutura quaternária. (adaptado de JUNQUEIRA & CARNEIRO, 2005)

## Boltzmann e a Probabilidade

No mundo macroscópico, podemos medir com um grau bem elevado de exatidão a posição e velocidade de um caminhão, por exemplo. Quando ingressamos no mundo microscópico, devemos estar cientes que apenas uma destas grandezas nos será possível conhecer com exatidão. A outra grandeza nos será apresentada por meio da probabilidade. Este é o Princípio da incerteza de Heisenberg.

**Sócrates, com sua frase “só sei que nada sei”, nos dá a falsa impressão de que ele, assim como Nietzsche, não acreditava na verdade absoluta. Porém, muito pelo contrário, ele não só acreditava nessa verdade, mas a buscava incessantemente.**

**Embora haja uma declarada divergência entre Nietzsche e Sócrates em relação a verdade, a utilização dos sentidos é usada por ambos para justificar seus pontos de vista.**

**Sócrates buscava a verdade através da razão, falseabilidade dos sentidos. O que não é o caso de Nietzsche, para quem a verdade é relativa ao discurso: quem contar uma mentira convincentemente pode torná-la “uma verdade”. Portanto, a incerteza como princípio é anterior a Heisenberg.**

Abandonamos as exatidão das medidas para ingressarmos no terreno da probabilidade. Neste caso, para o físico Ludwig Boltzmann, a entropia de um sistema de partículas seria passível de calcular através da seguinte equação, onde a probabilidade está presente através de  $\Omega$ :

$$S = k \ln \Omega$$

onde:

$S$  é a entropia

$$k \text{ é a constante de Boltzmann} \left( K = \frac{R}{N_A} = 1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K} \right)$$

$\Omega$  é o número de microestados possíveis

O número de microestados, distribuições das partículas em níveis de energia, igualmente prováveis, de um sistema macroscópico, é chamado probabilidade termodinâmica do macroestado.

No caso do zero absoluto, somente existe um único estado possível para as partículas de um sistema, o nível fundamental, ou nível de menor energia, então temos que  $\Omega = 1$  ( $\ln 1 = 0$ , todo número elevado a zero é 1), portanto a entropia ( $S$ ) é igual a zero (3<sup>a</sup> Lei).

**Mas e se a temperatura não for o zero absoluto? Que valor terá  $\Omega$ ?**

Vamos imaginar que temos em uma sala de aula 4 estados principais, possíveis para os alunos.

- 1º - Todos sentados e conversando.
- 2º - Todos em pé e conversando.
- 3º - Todos sentados e em silêncio.
- 4º - Todos em pé e em silêncio.

O estado em que o aluno despende menos de energia é sentado e calado. Supondo que estejam todos os alunos muito cansados e esteja muito frio, o único estado possível é este estado onde o gasto de energia será menor, portanto  $\Omega = 1$ .

Mudando-se a temperatura do ambiente e o nível de cansaço dos alunos as possibilidades de outros estados acontecer aumentam.

Podendo, inclusive, ocorrer inúmeros estados com diferentes proporções dos 4 estados principais.

Obtendo-se a soma destes inúmeros possíveis estados, teremos o valor de  $\Omega$ .

Para tentarmos entender um pouco mais sobre a probabilidade, vamos dar uma olhada num trecho do musical *Guys and Dolls*, onde dois personagens Big Jule e Nathan vivem a seguinte situação: Big Jule, que tem um conjunto de dados totalmente branco, exige, com o uso da força de uma arma, que Nathan o use. Acompanhe o diálogo.

- (Nathan) Mas esses dados não têm bolinhas!
- (Big Jule, segurando a arma) Não tem problema, eu me lembro onde elas estão.
- Nathan joga os dados.
- (Big Jule) Sete!
- (Nathan, sarcasticamente) Qual é o seis e qual é o um?
- (Big Jule) Qual a diferença?

Big Jule estava brincando ou existe algum fundo de verdade em sua afirmação? Veja o quadro abaixo e tire suas conclusões.

Os dados de Big Jule fornecem-nos apenas 21 resultados possíveis, dos quais três dão a soma sete, portanto a probabilidade de obtermos a soma sete é de três em vinte um, ou de  $\frac{1}{7}$ .

Já nos dados normais ela é de  $\frac{1}{6}$ , pois todos os lados têm a mesma probabilidade de cair para cima,  $6 \cdot 6 = 36$ , seis dessas configurações terão a soma sete, de modo que a possibilidade de obtermos um sete é de seis em 36.

Os cálculos dos dados de Big Jule não são reais, referem-se a dados onde as faces são indistinguíveis entre si. (adaptado de: SPEYER, 1995)



## ATIVIDADE

Bom, agora que você já leu o subtítulo “Boltzmann e a Probabilidade” (inclusive o texto da caixa anterior, adaptado de Speyer), responda:

1. As partículas usadas como exemplo, em cada caso, são distingúíveis ou indistinguíveis? Justifique sua resposta.
2. Se pudéssemos mudar a condição das partículas, usadas no exemplo, de distingúíveis para indistinguíveis ou vice - versa, o valor de  $W$  aumentaria ou diminuiria?

De acordo com MENEZES (2005), uma violação do princípio de conservação da energia significa uma não uniformidade no fluir do tempo. Ao vermos um vidro quebrado subitamente regenerar-se, sabemos que estamos assistindo a um filme em ordem inversa. A irreversibilidade dos processos espontâneos é responsável por haver um sentido privilegiado para o tempo.

No momento da elaboração da Terceira Lei da Termodinâmica não se tinha conhecimento da existência de um ente cosmológico chamado Buraco Negro. E mesmo sendo uma das mais importantes Leis da Física, a 2<sup>a</sup> lei da termodinâmica parecia tornar-se irrelevante para os Buracos Negros.

Em princípio, entendia-se que uma porção de matéria sumindo ou transformando-se em um buraco negro, faria com que a entropia do universo diminuisse.

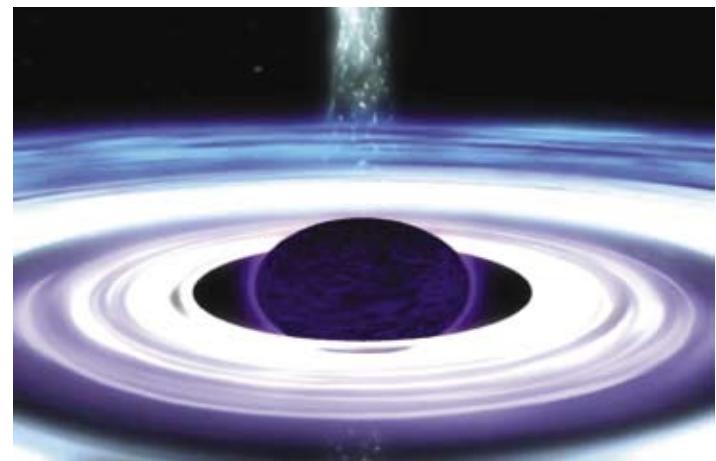
John A. Wheeler buscava uma solução para esta aparente violação da 2<sup>a</sup> Lei da Termodinâmica. Em 1970, Demetrious Christodoulou e Stephen W. Hawking, independentemente, provaram que na fusão de buracos negros a área total do horizonte de eventos nunca diminui.

Então, em 1972, Jacob D. Bekenstein propôs a Segunda Lei generalizada (GSL) que diz que deve-se incluir na quantidade total de entropia do universo a entropia de todos os Buracos Negros. Dito de outra forma, se um objeto cai em um buraco negro, a entropia do universo decresce. Mas a entropia do Buraco Negro aumenta, aumentando também seu horizonte de eventos. O horizonte de eventos pode ser entendido como uma fronteira, que faz a divisa, em um Buraco Negro, de onde a luz escapa ou não escapa. Ou seja, se a luz estiver no horizonte de eventos, ela não escapa do Buraco Negro.

O que são Buracos Negros? São estrelas que colapsaram, isto é, a sua massa, que é muito grande, fica como que concentrada em um único ponto, atraindo com força muito grande objetos que se aproximam dele.

O termo Buraco Negro foi introduzido, em 1967, por John A. Wheeler. Mas, em 1783, o inglês John Michel (1724-1793) propôs que uma estrela com massa suficientemente grande impediria a luz de escapar de seu campo gravitacional.

**Você poderia responder às questões propostas inicialmente: O Universo está em constante transformação. Em se tratando de física, o que seria esta transformação? Ela é passível de ser expressa em uma equação, se existir?**



■ A figura mostra um buraco negro. Fonte: <http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/20020626bhlght.html>

## ■ Referências

- GLEISER, M.. **Tempo, Vida e Entropia**. Folha de São Paulo, 19 de Maio de 2002, p. 22. Folha Mais.
- JUNQUEIRA, L. C. & CARNEIRO, J. **Biologia Celular e Molecular**. São Paulo: Editora Guanabara-Koogan,2005.
- MENEZES, L. C. **A Matéria: uma aventura do espírito**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.
- NICOLSON, I. **Gravidade, Buracos Negros e o Universo**. Rio de Janeiro: Editora Francisco Alves, 1981.
- NIETZSCHE, F. **Os Pensadores**. São Paulo: Nova Cultural, 1999.
- SPEYER, E. **Seis caminhos a partir de Newton**: as grandes descobertas da física. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1995.

## ■ Obras Consultadas

- AURANI, K. M. **Ensino de Conceitos**: estudo das origens da 2<sup>a</sup> Lei da termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII. São Paulo, 1985. Dissertação de Mestrado. USP.
- CHAUÍ, M. **Convite a Filosofia**. São Paulo: Ática,1995.
- FEYMMAN, R.P.; SANDS, M.; LEYGTION, R. B. **The Feynman Lectures on Physics**. V I.. Palo Alto: Addison-Wesley Publishing Company. 1964.
- FEYMMAN, R.P. **Física em Seis lições**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2001.
- SHARIPOV, F. **Termodinâmica e Mecânica Estatística**. Curitiba: UFPR, 1999. Texto digitalizada.



## ANOTAÇÕES

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

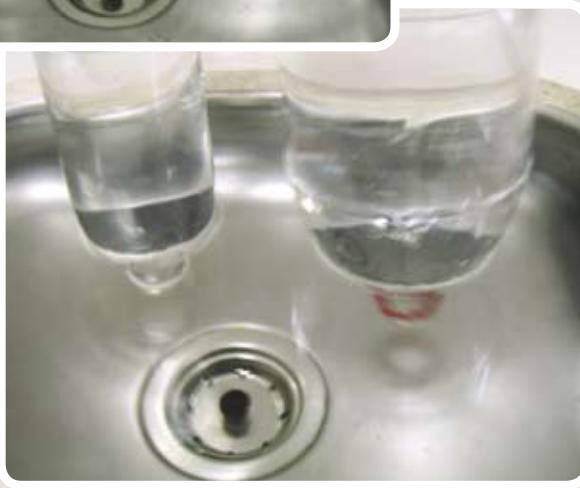
---

---

---

---

---



# PRESSÃO E VOLUME

■ Luiza A. C. Polak<sup>1</sup>, Ezequiel Burkarter<sup>2</sup>

**A**lgumas vezes, quando embarcamos uma garrafa cheia de líquido, este escoa lentamente. Em outros momentos, o líquido escoa rapidamente.

**Por que isso acontece?**

<sup>1</sup>Colégio Estadual São José - Lapa - PR

<sup>2</sup>Colégio Estadual Milton Carneiro - Curitiba - PR

## Vácuo: vazio de verdade?

Antes de Evangelista Torricelli (1608-1647), uma das questões que intrigava os cientistas da época era: como a água só subia uma determinada altura não importando o método utilizado para isso acontecer.

Nessa época, uma idéia que nos dias atuais pode nos parecer absurda era considerada como verdadeira:

A natureza tem horror ao vazio. (Bassalo, 1996, p.97)

A frase acima foi sentenciada pela escolástica da Idade Média e foi inspirada por Aristóteles (384-322 a. C.), para quem o vácuo não seria passível de existir, pois se existisse, o movimento não aconteceria. Na concepção de Aristóteles, o ar era o responsável pelo movimento porque impulsionava os corpos. Diante da impossibilidade de retirada do ar, o vácuo não seria provável.

Entretanto, idéia de não existência do vácuo nos fenômenos naturais não era uma unanimidade entre os que se dedicavam ao assunto. Outra corrente contrária a de Aristóteles defendia que para a existência de movimento o vazio deveria também existir; caso contrário, por onde o corpo poderia passar se o espaço todo fosse ocupado? Deste grupo fazia parte Sextus Empírico (341-270 a. C.), que deixou sua posição registrada em seu livro *Contra os Lógicos*.

Será que esta celeuma acaba aí?

Pode parecer uma bagunça geral. Havia ainda outros, como Platão, que dizia que o vácuo só existiria produzido pelo homem, não na natureza. Na natureza existiria, além da atmosfera, um ar mais tênue, o éter, e também um pequeno espaço vazio entre as últimas partículas dos corpos.



### ATIVIDADE

Dizemos que a luz é uma onda eletromagnética, ou seja que combina campos elétricos e magnéticos. Portanto, a luz propaga-se no vácuo. E é por este motivo que a luz do Sol e das estrelas, em geral, chegam até a Terra, apesar da não existência de um meio para sua propagação.

- Com relação ao texto acima, discuta, em grupos, a existência do vácuo.
- Será que no espaço interplanetário existe realmente o vácuo absoluto, ou seja, a ausência total de matéria?
- Será que existem diferentes tipos de vácuo?

## Mas o que a existência ou não do vácuo influí na medida de temperatura?

Os primeiros instrumentos para medida de temperatura, chamados termoscópios, eram imprecisos, pois a coluna do material termométrico subia ou descia alturas diferentes para uma mesma temperatura, dependendo da pressão atmosférica do local onde a medida era feita.

Mas não foi a diferença obtida na medida dos termoscópios o problema que levou ao conceito de pressão atmosférica, e sim a impossibilidade, na época, de elevar-se uma coluna d'água através de bombas aspirantes a uma altura acima de 10 metros.

Um dos cientistas que se preocupou com o assunto foi Galileu Galilei (1564-1642).

Galileu, em seu Discurso relativo a duas novas ciências, publicado em 1638, adotou uma atitude mais moderada. Acreditava em um horror da natureza ao vácuo, mas pensava que esse horror tinha limites (admitia pois *in fine* a sua possibilidade). Galileu se interessou pela questão do vácuo depois que um jardineiro de Florença lhe disse que sua bomba completamente nova era incapaz de elevar a água acima de dez metros: "O jardineiro acrescentou", escreveu Galileu, "que não era possível, nem com as bombas, nem com as outras máquinas que fazem a água subir por atração, fazer com que ela subisse o mínimo que fosse além de 18 braças [aproximadamente dez metros], quer as bombas fossem largas ou estreitas". Galileu explicou esse fenômeno pelo fato de que o valor de dez metros representava o limite de resistência da coluna de água: ultrapassando esse limite, a força de coesão exercida pela natureza se tornava inoperante e a coluna de água se rompia. (RIVAL, 1997, p. 18)

Galileu acreditava que com a água deveria acontecer o mesmo que acontecia com outros materiais, como, por exemplo, os fios metálicos, que rompiam após certo comprimento devido ao próprio peso.

Da mesma forma que Torricelli, Galileu já tinha também aventado a possibilidade de materiais diferentes apresentarem alturas diferentes.

Já se sabia que a altura do líquido do termoscópio seria menor ou maior dependendo da temperatura, ou seja, já se relacionava aumento de volume com aumento de temperatura. Faltava somente considerar a pressão, o que aconteceu somente após o trabalho de Torricelli.

Um conterrâneo de Torricelli, Gaspar Berti, realizou um experimento semelhante ao que aquele realizou, com uma diferença: ele utilizou água no lugar do mercúrio

O aparato da experiência de Berti tem duas aberturas, A e B, conforme figura 1. No entanto, mesmo lacrado o ponto A, ainda fica a abertura do recipiente superior por onde o ar pode entrar, influindo na descida da coluna do líquido. E, portanto, Berti não conseguiu derrubar a tese de horror ao vácuo.

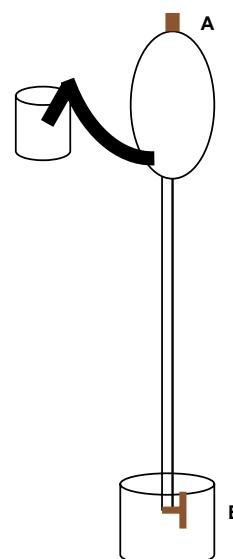


Fig. 1:Aparato utilizado por Berti. O tubo era completamente cheio pela abertura (A), e colocado em um recipiente completamente cheio, do mesmo líquido que o tubo. A abertura (A) era então lacrada e a torneira (B) aberta. Uma parte do líquido escoava, mas uma outra parte ainda ficava no tubo, quando o lacre da abertura (A) era retirado, todo o líquido escoava pelo tubo.

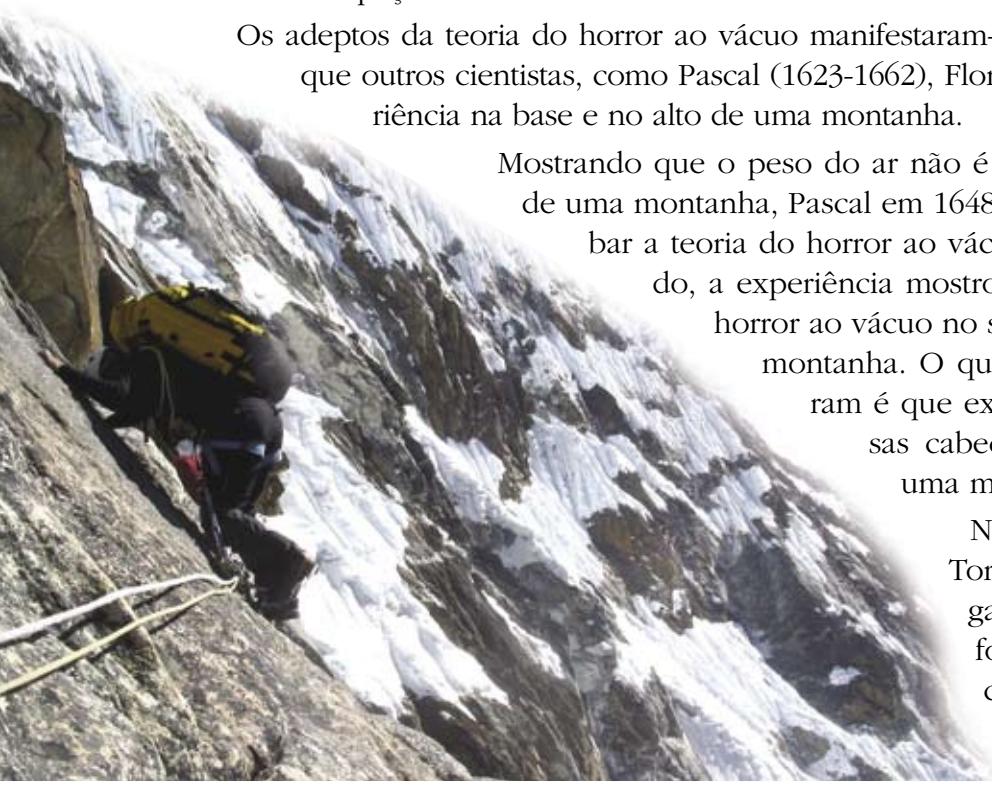
Em 1643, dois discípulos de Galileu, Evangelista Torricelli e Vincenzo Viviani (1622-1703), retomam o experimento utilizando o mercúrio, que é aproximadamente 14 vezes mais denso que a água. Estes tinham o conhecimento da experiência de Berti. Torricelli considerou que o mercuríco subiria 14 vezes mais alto do que a água. O experimento foi confiado por Torricelli a Viviani.

Viviani encheu de mercúrio um tubo e tapou uma das suas extremidades. Em seguida, selou com um de seus dedos a outra extremidade e embarcaram o tubo uma bacia cheia de mercúrio. Curiosamente, o mercúrio do tubo desceu para a bacia deixando uma coluna de 76 cm no tubo. No restante do tubo havia vácuo.

Qual seria a explicação desse fenômeno? Torricelli concluiu que as camadas de ar exerciam, com seu peso, uma verdadeira pressão sobre o mercúrio da bacia, e que essa pressão mantinha a coluna de mercúrio em suspensão no tubo. Foi por essa razão, disse ele, e não por causa de um hipotético limite de resistência ao vácuo, que a altura das colunas de água estava limitada a dez metros. E provou isso mostrando que a altura da coluna de mercúrio (14 vezes mais denso que a água) correspondia a 1/14 da altura máxima das colunas de água. Aliás, notou ligeiras variações cotidianas da altura do mercúrio na coluna, e concluiu que elas deviam a variações da pressão atmosférica. Torricelli acabava de demonstrar o peso do ar e de inventar o barômetro, que permite medi-lo. Mas ainda, obteve o vácuo em um recinto fechado, o que provou que a natureza não tinha nenhum horror a ele! (RIVAL, M., 1997, p. 18)

Relatando sua experiência Torricelli, afirmava que a coluna de mercúrio era sustentada por uma força externa ao tubo. Acima da coluna de mercúrio ficava um espaço vazio, dizia Torricelli. Esse espaço vazio ficou conhecido como vácuo Torricellano.

Os adeptos da teoria do horror ao vácuo manifestaram-se furiosamente, e foi preciso que outros cientistas, como Pascal (1623-1662), Florin e Périer repetissem a experiência na base e no alto de uma montanha.



Mostrando que o peso do ar não é o mesmo na base e no topo de uma montanha, Pascal em 1648, finalmente conseguiu derrubar a teoria do horror ao vácuo. Ao contrário do apregoado, a experiência mostrou que a natureza teria maior horror ao vácuo no sopé do que no cume de uma montanha. O que em síntese eles demonstraram é que existe muito mais ar sobre nossas cabeças no sopé que no alto de uma montanha.

No entanto, nem Pascal nem Torricelli teriam conseguido chegar a essas conclusões se já não fossem familiarizados com o conceito de pressão do ar de Beeckam e Galileu, entre outros.

■ Fonte: <http://www.sxc.hu>

Atualmente, sabemos também que a densidade do ar muda com a altura, ou seja, o ar é mais rarefeito no alto de uma montanha do que na sua base. Por isso os alpinistas levam oxigênio quando a escalada é de grande porte, isto é, quando a montanha é íngreme, como o caso do paranaense Waldemar Nicleivicz, em suas escaladas ao Everest e K2.

Densidade é razão da massa pelo volume do objeto. Assim, considerando dois objetos de mesmo volume, o de maior massa terá uma densidade maior.



## ATIVIDADE

Após ler os textos, responda as questões:

**Texto 1:** Em regiões da África, da Ásia e da América do Sul, muitas pessoas vivem permanentemente em locais muito altos, e nas montanhas andinas algumas vivem até 5000 m acima do nível do mar. As pessoas em geral não viveriam confortavelmente nessas condições, mas as que nascem e vivem ali sofrem modificações no corpo que lhes permitem continuar saudáveis. O tórax cresce mais, aumentando assim a capacidade pulmonar; além disso, o sangue contém mais glóbulos vermelhos do que a capacidade normal do sangue de outras pessoas, podendo carregar, portanto, mais oxigênio. (WARD, 1988, p. 44)

**Texto 2:** Os pulmões dos seres humanos funcionam como se fossem um fole ou uma gaita, o diafragma faz o papel da mão que pressiona e solta esse fole.

No momento da inspiração, os pulmões aumentam de tamanho e a pressão dentro deles diminui. Os corpos sempre se movimentam na direção da menor pressão, portanto o ar entra nos pulmões.

Na expiração ocorre o inverso, o diafragma pressionando os pulmões faz com que estes se contraiam, diminuindo seu tamanho e aumentando a pressão interna destes. Nesse caso, o ar é expelido, pois a pressão fora dos pulmões é menor. (Adaptado de WARD, 1988)

1. Charles Darwin (1809-1882), em sua Teoria da Evolução, diz que os indivíduos, os seres, adaptam-se ao ambiente em que vivem e que estas adaptações são transmitidas para as gerações seguintes. Lamarck (1744-1829), um antecessor de Darvin também tratou da evolução. A diferença entre eles é que para Lamarck as adaptações são transmitidas para a geração seguinte; já Darwin fala de seleção natural, em que os mais aptos sobrevivem e tendem a ter maior número de descendentes, e estes descendentes terão também um maior grau de adaptação. No caso dos seres humanos que vivem em regiões inóspitas como no texto 1, poderiam ser usados para corroborar a teoria de Darwin ou de Lamarck? Justifique sua resposta.
2. A pressão do meio externo sendo baixa pode ocasionar algum problema respiratório no caso dos seres humanos? Por quê?



■ Cama de pregos de um faquir.  
Fonte: [www.cearh.com.br](http://www.cearh.com.br)

## ■ Pressão: uma distribuição da força

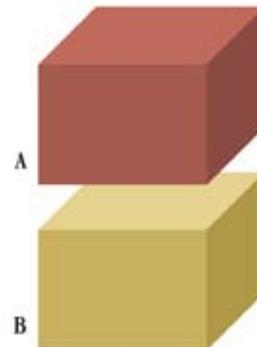
**Mas qual é a relação entre a densidade do ar no alto ou na base de uma montanha com a pressão?**

**Você já ouviu falar em faquir? E em cama de um prego? Ou, ainda, em cama com muitos pregos?**

**Pois é, o faquir é o cara que deita em uma cama com muitos pregos! Como isso é possível?**

O faquir, está submetido a ação de força Peso. Esta força, distribuída sobre um prego, concentraria sua atuação em uma área muito pequena, a cabeça do prego, causando um grande impacto e até dor. Se, no entanto, fossem vários pregos, essa força se distribuiria neles, diminuindo o impacto sobre o corpo do faquir. Esse impacto é o que chamamos de pressão, ou seja, é a força distribuída, ou dividida, ao longo da superfície, quantitativamente definida desta forma:  $P = F/A$ . A cama com muitos pregos aumenta a área em que a força é aplicada, por isso diminui a pressão.

Por exemplo, se sobrepuséssemos dois cubos idênticos pintados de cores diferentes de lados 10 cm, e de massas 2 kg, (conforme Figura 2), qual seria a pressão exercida pelo cubo A sobre o cubo B?



■ Fig. 2. cubo A sendo colocado sobre o cubo B, numa ilustração da pressão interfacial.

Inicialmente devemos saber que a força que atua sobre o cubo B, é a força peso do cubo A, isto se ninguém estiver pressionando o cubo A. É preciso saber também que peso é massa multiplicada pela aceleração da gravidade. Portanto, a força sobre o bloco B, supondo que a aceleração da gravidade é  $10 \text{ m/s}^2$ , é 20 N (vinte newtons). Como cada lado do cubo tem dez centímetros a área de qualquer lado do cubo, visto que tem lados iguais, é de  $100 \text{ cm}^2$ , portanto, a pressão exercida no cubo B pelo cubo A é de  $0,2 \text{ N/cm}^2$  ( $P = 20 \text{ N} \div 100 \text{ cm}^2$ ).

No caso da montanha, podemos considerar que a área é a mesma tanto no alto como na base. No entanto, no alto teremos menos ar que na base, o que diminui sua pressão. Daí a necessidade de adaptação dos alpinistas.

O holandês Isaak Beeckmam (1588-1637), em 1614, propôs que o ar, assim como a água, pressiona os objetos; alguns objetos não parecem afetados, pois a compressão é uniforme. Galileu em seu *Discorsi e Dimostrazione Matematiche*, de 1638, dizia que a ruptura aconteceria em alturas diferentes para fluidos diferentes.

Note que a idéia de Beeckmam parece-se muito com o enunciado do princípio de Pascal, que diz:

A pressão exercida em um ponto de um fluido ideal em equilíbrio é transmitida integralmente a todos os pontos deste fluido.



## ATIVIDADE

Leia o texto e responda as perguntas colocadas na seqüência:

Os alpinistas executam uma adaptação gradual para a escalada, este é o motivo de existirem acampamentos bases em várias altitudes até chegar-se ao último antes do ataque final ao cume da montanha. Os mergulhadores de grandes profundidades também o fazem, só que através das câmaras hiperbáricas (locais onde a pressão é manipulada, pode-se aumentá-la ou diminuí-la gradualmente) tanto na descida como na subida, quando mergulham a grandes profundidades.

1. Por que a adaptação dos alpinistas é feita de maneira diferente da dos mergulhadores ?
2. Quais as consequências para o mergulhador se ele não fizer a adaptação e for mergulhar a uma grande profundidade rapidamente?
3. Os dois, mergulhadores e alpinistas, levam oxigênio. O motivo é o mesmo?
4. Os peixes têm um sistema respiratório diferente dos seres humanos. Sua respiração não é pulmonar e sim branquial, isto é, feita através das brânquias. Peixes bentônicos, que vivem em grandes profundidades oceânicas, sob alta pressão, sobreviveriam se fossem transportados, rapidamente, até à superfície? Justifique sua resposta.

A principal consequência da descoberta de Pascal e Torricelli foi que os termoscópios, agora chamados termômetros, foram fechados para escaparem da influência da pressão atmosférica.

Será que você já tem uma idéia do que aconteceu com as garrafas? Por que o líquido escoa mais rapidamente em uma do que em outra garrafa, que é aparentemente idêntica à primeira? Existe alguma diferença entre elas?

Guillaume Amontons (1663-1705), físico francês, em 1699, demonstrou que, nas mesmas condições de pressão, a água sempre fervia a uma mesma temperatura. E que em um gás, mantendo-se constante seu volume, dependendo da pressão, obtinha-se uma temperatura.

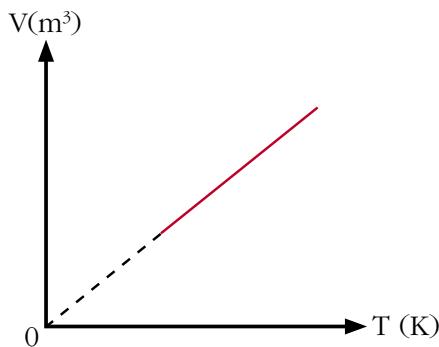
Anteriormente, Robert Boyle (1627-1691), em 1661, enunciou uma lei, que relaciona o volume à pressão após estudar o comportamento dos gases em várias situações de pressão e volume mantendo a temperatura constante.

O volume de um gás é inversamente proporcional à pressão, mantendo-se uma mesma temperatura.

Edmé Mariotte (1620-1684), padre e físico francês, alguns anos após, também estudando os gases, chegou à mesma conclusão que Boyle, por esse motivo é que o enunciado acima é conhecido como Lei de Boyle-Mariotte atualmente.

O químico Gay-Lussac (1778 – 1850), em 1801, também francês como Amotons e Mariotte, observou, assim como Amontons já o tinha feito, que os gases mudam a sua pressão em função de sua temperatura, quando seu volume é mantido constante.

Você pode estar se perguntando, mas não foi isso que Boyle e Mariotte disseram? E estará com a razão, mas existe uma diferença: no caso de Amontons e Gay-Lussac, a pressão é que era mantida constante. Graficamente podemos representar assim:



■ Note que a extrapolação da curva, quando a temperatura é absoluta, é o próprio zero Kelvin.

Esta extrapolação confirmava, na época, o que Amontons pensava: “deveria haver uma temperatura mínima onde os gases teriam sua pressão e volume reduzidos a zero”. Calculando esta temperatura, Amontons chegou a um valor, bem próximo da temperatura absoluta na escala Kelvin, de -239,5°C. (adaptado de Medeiros, 1999)

**Existe realmente a possibilidade do volume de uma certa quantidade de gás ser reduzida a zero? E volume negativo é possível de existir?**

### Como posso fazer uma extrapolação?

Se tivermos um gráfico que seja uma reta inclinada, como o gráfico ao lado, isto é possível. Uma função afim é descrita pela equação ( $Y = ax + b$ ), onde o coeficiente **a** representa a inclinação da reta (tangente do ângulo formado pela reta e o eixo horizontal) e o coeficiente **b** é o ponto onde a reta corta o eixo vertical. Então, para determinar a equação da reta, precisaremos de **a** e **b**.

Vamos usar os valores do gráfico ao lado para descobrir sua função (fórmula). No ponto i temos o conjunto de valores (3,8), e no ponto h o conjunto (2,5). Na função  $Y = ax + b$  representada pelo gráfico a seguir, no qual V representa Y e T representa X, temos:

$$3 = 8a + b \text{ e } 2 = 5a + b$$

Resolvendo o sistema de equações pelo método da subtração:

$$\begin{aligned} 3 &= 8a + b \\ 2 &= 5a + b \\ \hline 1 &= 3a - 0 \end{aligned}$$

Portanto:  $3a = 1$ , isto significa que:

$a = \frac{1}{3}$ , substituindo em qualquer das equações este valor, obtemos o valor de b:

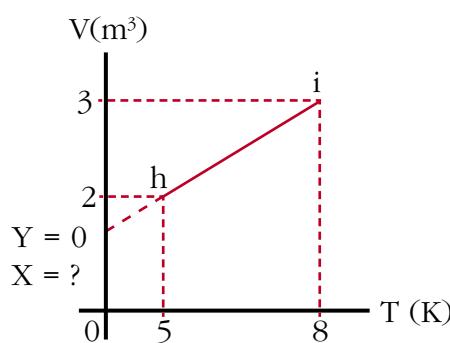
$$2 = \frac{1}{3} \cdot 5 + b \text{ ou } b = 2 - \frac{5}{3}$$

$$b = \frac{6 - 5}{3}, \text{ ou seja, } b = \frac{1}{3}$$

Logo a equação desta reta será:

$$V = \frac{1}{3} T + \frac{1}{3}$$

Agora podemos obter o valor para V quando T for zero.



E aí, conseguiu entender a questão colocada anteriormente?

## ■ Equação para os Gases “ideais”

Em 1834, o engenheiro e físico francês Emile Clapeyron (1799-1864) publicou um trabalho no qual aparece pela primeira vez o ciclo de Carnot e os fenômenos gasosos, representados graficamente em um sistema de eixos ortogonais, hoje chamado diagrama PV. Nesse trabalho, além das figuras de transformações dos gases, também se encontra uma equação que nos dias atuais é escrita da seguinte forma:

$$PV = nRT$$

P = pressão

V = Volume

T = Temperatura

n = número de moles

R = constante universal dos gases ideais (8,31J/mol.K)

Você pode observar que se mudarmos a temperatura para o outro lado da igualdade ficará uma constante ( $nR$ ) no lado oposto. Portanto podemos escrever esta equação desta forma:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Ou seja, o produto da pressão pelo volume em razão da temperatura no início do processo é igual ao do final, isto é, mantém-se constante.

Os índices 1 e 2 representam dois estados do gás, o estado inicial e o estado final respectivamente. Portanto a equação geral dos gases é uma função de estado, pois depende unicamente dos estados final e inicial não importando o que acontece para que o sistema passe de um estado para o outro.

### Será que as equações acima sempre são válidas?

As equações acima são válidas para os gases ideais, ou seja, gases que se mantêm sempre no estado gasoso, e obedecem rigorosamente as leis acima.

Os gases reais são considerados perfeitos para pequenas variações de temperatura e pressão. Entretanto, os gases que não são facilmente levados do estado gasoso ao líquido têm uma variação maior de temperatura e pressão, para esses as equações acima podem ser usadas.



## ATIVIDADE

Uma função constante ( $Y = a$ ) é representada por uma reta paralela a um dos eixos, e uma função do 1º grau ( $y = ax + b$ ) é representada por uma reta inclinada.

1. Com base na equação acima, obtenha as equações e gráficos ( $p \cdot V$ ) dos gases ideais nos seguintes processos:
  - a) Isovolumétrico ou isocórico (volume não muda);
  - b) Isotérmico (temperatura não muda);
  - c) Isobárico (pressão não muda).
2. Existe algo em comum entre esses gráficos? O que?

## ■ Uma equação mais abrangente

Na derivação da equação dos gases ideais, estudada até aqui, devemos considerar que não aparece nenhuma referência ao tamanho das moléculas do gás. Como o nome diz, é uma idealização!

**Ora, um gás de verdade tem muitas moléculas, e se considerarmos que essas moléculas têm volume nulo, então o gás também deveria ter volume nulo!?**

Clausius (1822-1888) sugeriu que na equação dos gases ideais não se deveria apenas usar o volume do recipiente, mas o volume realmente acessível a uma molécula. Tal volume deveria ser um pouco menor que o volume total, devido a presença de outras moléculas no recipiente. Duas moléculas não podem ocupar o mesmo lugar ao mesmo tempo. Se representarmos o volume “inacessível” (associado às outras moléculas) por “b”, então a equação para um gás que contenha “n” mols de molécula pode ser escrita conforme sugere Hirn (1815-1890):

$$P(V - nb) = nRT,$$

$n$  = número de moles

$b$  = volume inacessível

Dividindo ambos os lados pelo número de mols, obtém-se:

$$P(v - b) = RT$$

$v$  é o volume específico do gás:  $v = \frac{V}{n}$

Além de desconsiderar o tamanho das moléculas, a equação dos gases ideais também não considera a possibilidade de interação entre as moléculas.

Em 1873, Van der Waals (1837-1923) incluiu um segundo termo de correção na equação dos gases ideais. Por quê? Uma molécula é composta por átomos, que por sua vez possuem cargas elétricas. Van der Waals propôs, então, que as moléculas no interior de um recipiente interagem entre si por meio de forças atrativas e de natureza eletrostática. De fato, por uma questão de simetria, as forças entre as moléculas no interior do recipiente se cancelam. Contudo, as forças sobre as moléculas que se encontram nas camadas externas não são canceladas, há uma força resultante para o interior do gás.

Devido a essa força resultante, Van der Waals propôs que a pressão média das moléculas contra a parede do recipiente seria um tanto menor que a mostrada na equação dos gases ideais. A pressão da equação Hirn sofreria a redução:

$$P = \frac{RT}{(V - b)} - \left(\frac{a}{V^2}\right)$$

$\frac{a}{V^2}$  = é uma pressão que surge das interações entre as moléculas.

É importante, contudo, que se saiba que a questão ainda não está fechada, a natureza e a dinâmica dessas interações têm sido alvo de muitas pesquisas desde então. Num dos modelos teóricos para a descrição de propriedades macroscópicas de gases, a aplicação das leis de Newton às moléculas individuais foi usada como base para a descrição macroscópica de algumas propriedades de alguns gases, trata-se da “teoria cinética dos gases”.

Já em meados do séc. XX alguns insucessos do modelo da teoria cinética levaram a uma outra hipótese, a de que sistemas microscópicos não obedecem necessariamente as mesmas leis que sistemas macroscópicos. Algumas hipóteses que pareciam uma evolução foram, sob alguns aspectos, um retrocesso. A teoria quântica e os modelos estatísticos davam os primeiros passos.

Mesmo com as considerações presentes na equação de Van der Waals, não se tem um modelo pronto. Os atuais modelos apontam até para uma releitura dos conceitos como pressão e interações.

Mas voltando à questão inicial: **Algumas vezes quando emborcamos uma garrafa cheia de líquido, este escoa lentamente. Em outros momentos, o líquido escoa rapidamente . Por que isso acontece?**

**Será que agora você pode respondê-la?**

## ■ Referências

BASSALO, J. M. F. Nascimentos da Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física.** v 18, n 2, 1996.

MEDEIROS, A. **A termometria de Galileu a Fahrenheit.** Recife: Editora Líber, 1999.

RIVAL, M.. **Os grandes experimentos científicos.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar editores, 1997.

WARD, B. R. **Os pulmões e a respiração.** Série O Corpo Humano. São Paulo: Editora Scipione, 1988.

## ■ Obras Consultadas

ADKINS, C. J. **Equilibrium Termodynamics.** 3.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

FEYMMAN, R.P; SANDS, M; LEYGTION, R. B. **The Feynman Lectures on Physics.** v I. 1964. Palo Alto/Califórnia: Addison -Wesley Publishing Company.

LONGUINI, M. D.; NARDI, R. Origens Históricas e Considerações Acerca do Conceito de Pressão Atmosférica. In: **Revista Caderno Brasileiro de Ensino de Física.** Vol. 19, N.º 1, 2000.

SEARS, F. W.; SALINGER, G. L. **Termodinâmica, Teoria Cinética e Termodinâmica Estatística.** 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1975.



## ANOTAÇÕES

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

*I**n**t**r**O**d**u**c**ã**o*

## Eletromagnetismo

Pense na palavra **Eletromagnetismo**

Se você pensou na junção de duas palavras, eletro, de eletricidade, + magnético, de magnetismo, acertou. Mas poderíamos te perguntar: o que a eletricidade tem a ver com o magnetismo? Talvez você não tenha ainda se questionado sobre esses assuntos. Por isso, nós o convidamos a ler os textos colocados neste livro.

Agora pense no seguinte: o Sol exerce força sobre a Terra, mesmo estando distante dela, não é? O mesmo acontece com cargas elétricas, umas exercem forças sobre outras.

Mas como entender algo que não se vê? Como quantificar esses efeitos?

Esses questionamentos levaram a lei do inverso do quadrado para a eletricidade, o que levou a formulação do que hoje conhecemos como Lei de Coulomb.

Desde 1820, quando Hans Orsted (1777-1851), durante a realização de seus experimentos, percebeu que uma agulha magnética sofria alterações quando sujeita a correntes elétricas, sabe-se que Eletricidade e Magnetismo não são “coisas” totalmente isoladas. Segundo historiadores, não se sabe ao certo se a descoberta foi prevista por Orsted ou se aconteceu por acaso. Contudo, a partir daí, deu-se a unificação desses dois importantes grupos de estudo da Física.

Dentro do contexto da Eletricidade, o conceito básico é o de carga elétrica, e o **Eletromagnetismo** nos conta como essa “dona carga” se comporta.

Não nos cabe aqui relatar toda a História da Eletricidade. Importa colocar que esses estudos deram origem ao entendimento do conceito de carga elétrica e eletrização, campo elétrico, raios, materiais isolantes e condutores, força elétrica, bateria elétrica e outros.

Além do campo elétrico, no âmbito do **Eletromagnetismo** é importante a discussão sobre campo magnético, ou ainda, campos eletromagnéticos, o que nos levam ao estudo das ondas eletromagnéticas. Ufa!

E quanto aos circuitos elétricos? A instalação elétrica da sua casa? É em série ou em paralelo? Aqui, precisamos entender todos os conceitos envolvidos, como: corrente elétrica, voltagem, resistência elétrica, entre outros, sempre o todo, e não como se fossem fenômenos que ocorrem totalmente separados.

E não paramos por aqui! Chegamos na eletrodinâmica.

Já ouviu falar em Mecânica Quântica? Então, quando ela é adicionada ao Eletromagnetismo, vira eletrodinâmica quântica.

Entre as idéias da Mecânica Quântica, está a de que a luz é composta por partículas, os fótons. Mas a luz não seria onda?

Tudo bem, as partículas também se comportam como ondas.

E que tal o Princípio da incerteza! Esse princípio obrigou os físicos a reverem suas certezas advindas da visão mecanicista e determinista de mundo desde a formulação da Mecânica clássica, estabelecida a partir do *Principia*, de Newton

Posso afirmar, com certeza, alguma coisa - por exemplo, o *momentum* de uma partícula - mas a outra não - por exemplo a sua posição. Ou seja, sempre vai existir uma incerteza em uma medida em detrimento de uma certeza na outra medida.

Veja, isso é importante: a Mecânica Quântica não anula a Mecânica Clássica, ela apenas a complementa, prevendo novos fenômenos não explicados pela teoria anterior. Aliás, “se a teoria quântica só descrevesse o que já se sabe, não teria mesmo muita graça”<sup>1</sup>.

Como você, estudante, já deve ter percebido, muitas são as possibilidades de tratamentos dentro do estudo do **Eletromagnetismo**. No entanto, não é possível, neste livro, tratar de todas essas possibilidades. O que fizemos foi escolher alguns conteúdos que consideramos importantes para a construção do seu conhecimento. Infelizmente, muitos outros ficaram de fora.

Para iniciar, o Professor Robson Lima de Oliveira escreveu o Folhas “Carga Elétrica”, discutindo a evolução desse conceito. Apresenta, também, a evolução do modelo atômico, numa relação com a Química e, é neste momento que a Física contemporânea se manifesta, com a discussão do modelo atômico atual. O texto dialoga com a Filosofia, remetendo-se a idéia primordial do átomo.

Os Professores Ezequiel Burkarter, Juliana Loch e Marina de Lurdes Machado elaboraram o Folhas “Transformação mais Geração igual Conservação”, o qual trata da indução eletromagnética, com ênfase no princípio da conservação de energia. A descoberta da radioatividade e os elementos radioativos permitiram a utilização da energia nuclear, cujos conteúdos levam a uma interdisciplinariedade com a Química. Para entender as contribuições que as novas descobertas científicas trouxeram à indústria capitalista, o texto trata da Segunda Revolução Industrial, numa relação interdisciplinar com a História. A contemporaneidade se manifesta com a abordagem da fusão de átomos em usinas nucleares.

F  
Í  
S  
I  
C  
A

A Professora Juliana Loch e o Professor Ezequiel Burkarter escreveram o texto “Campos Eletromagnéticos”, o qual permite a discussão de campos elétricos e magnéticos e as ondas eletromagnéticas. Numa relação interdisciplinar com Filosofia, o Folhas discute a provisoriade da Ciência. Num diálogo com a Biologia, o texto discute como o campo magnético pode influenciar os seres vivos, em especial as abelhas e formigas.

O Professor Otto Henrique Martins da Silva produziu o folhas “A Natureza da Luz e suas propriedades”, no qual discute os fenômenos Luminosos, fazendo relações com a Filosofia e Arte. Numa relação com a Arte, o Folhas propõe a realização de uma peça teatral, discutindo a iluminação no teatro, através da fala de três personagens: Newton, Huygens e Einstein, os quais discutem alguns conceitos físicos. A Física contemporânea se manifesta com a Natureza Dual da Luz.

A Professora Teresinha Aparecida Soares Albuquerque escreveu o texto: “Natureza da Luz”. O Folhas traz a Física contemporânea, abordando a dualidade onda – partícula numa relação interdisciplinar com a Química e a Língua Portuguesa.

Conforme já mencionamos, não são abordados todos os desdobramentos possíveis, e nem era essa a nossa pretensão. Esperamos contribuir para o seu aprendizado.

<sup>1</sup>Gonick, L.; Huffman, A. **Introdução Ilustrada à Física**. São Paulo: Harbra, 1994.



# CARGA ELÉTRICA

■ Robson Lima Oliveira<sup>1</sup>



D

o que são feitas as coisas que compõem a matéria?

Pense num tijolo! Sua casa, provavelmente é feita de tijolos. De que são feitos os tijolos?

E as árvores, as folhas e os metais, de que seriam feitos?

Uma coisa é certa. Todas as coisas existentes são compostas por algo que lhes dá forma, o que torna possível nossa observação.

Aposto que em uma brincadeira, ou em uma experiência na escola, você já atraiou um pente ou até mesmo uma régua no cabelo e percebeu que um ou outro atrai objetos pequenos, como por exemplo pedacinhos de papel, não é?

E aí conseguiu entender o que aconteceu? Será que essa atração tem alguma coisa a ver com a constituição da matéria?

## A busca de um princípio único...

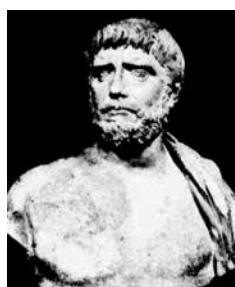


Fig. 1: Tales de Mileto, o primeiro filósofo a observar fenômenos físicos associados a eletricidade.

Os olhares acerca de fenômenos da natureza hoje associados à eletricidade, aparecem desde a antigüidade. As primeiras observações (a princípio casuais) de que se tem conhecimento, foram feitas pelo filósofo grego Tales de Mileto (século VI e V a.C.).

Tales é considerado o primeiro filósofo da história, ainda que não tenha recebido esse título, pois o termo foi criado mais tarde. Ele viveu em Mileto, no período pré-socrático. Esse filósofo observou que o âmbar (em grego *elektron*), certo tipo de resina vegetal, utilizado na confecção de jóias e objetos de decoração, quando atritado com peles de animais adquiria a propriedade de atrair pequenos objetos materiais. Diante de tais fatos, Tales teria se perguntado sobre a composição da matéria.

### Existiria um princípio para todas as coisas?

Tales, Anaximandro e Anaxímenes são três dos primeiros filósofos pré-socráticos. Todos eles nasceram na mesma cidade (Mileto) e viveram no mesmo período (século VI antes da era cristã). Eles possuíam um ponto em comum: ensinavam que todas as coisas se originam em uma única matéria primordial, que seria o “princípio” (em grego, *arche*). A idéia básica pode ser esclarecida por meio de uma comparação. Suponhamos que só existisse argila no mundo e que, a partir dela, fossem continuamente modelados diferentes tipos de objeto, que depois seriam desmanchados para dar origem a outros objetos. Essa argila seria o *arche* – o princípio e o fim de tudo. (MARTINS, 1997, p.37)

### Leu com atenção? E então, já sabe dizer do que a matéria é composta?

Outro pré-socrático, Anaximandro (610-547 a.C.) pensava que existia um princípio, que comporia o todo, o indefinido (em grego, *apeiron*), do qual derivariam todas as coisas e, todas as coisas voltariam ao princípio ao serem destruídas. Mas o que seria o *apeiron*?

Essa substância primordial, o *apeiron*, seria indestrutível, ou “imortal”: ela não deixa de existir quando, a partir dela, se formam as diferentes substâncias e coisas do universo, mas continua a existir dentro delas, tendo apenas adquirido uma nova aparência. Essa idéia elimina, portanto, a possibilidade de um início absoluto de tudo: o *apeiron* não tem início, ele sempre existiu. Pelo contrário, o universo provém do *apeiron* e pode não ser eterno. (...) O *apeiron* seria infinito, preenchendo todo o espaço. Não existiria nenhum lugar vazio ou com outro tipo de substância. O *apeiron* existiria dentro de tudo o que conhecemos. (MARTINS, 1997, p. 37)

**Você deve estar se perguntando: o que isso tem a ver com a composição da matéria? Ou talvez ainda: o que a atração entre alguns materiais tem a ver com tudo isso?**

É interessante como idéias que surgiram em outras épocas ainda são importantes, e muitas dessas são responsáveis pelo conhecimento que hoje temos a respeito da matéria. Continue a leitura, você vai se surpreender!

Outros filósofos pensaram sobre o assunto. A idéia da substância única aparece também com o grego Anaxímenes (550-480 a.C.), para o qual o princípio seria o ar. Já para Empédocles (490-435 a.C.), o princípio não seria único, mas formado por quatro elementos: terra, água, ar e fogo.

Os contemporâneos de Empédocles, os atomitas Leucipo (metade de séc. V a.C.) e Demócrito (nascido talvez por volta de 460 a.C.) são os primeiros a admitirem o vácuo, lugar onde se moviam os átomos, os quais eram eternos, imutáveis e indivisíveis como a própria palavra indica.

Leucipo e Demócrito, durante o século V a.C, acreditavam numa variedade de átomos e foram os primeiros gregos a admitir a existência de um espaço vazio. Antes deles, acreditava-se que todo o espaço era preenchido de matéria. Aparentemente, eles, Leucipo e Demócrito, não teriam discutido detalhadamente a estrutura do átomo. No entanto, conforme MARTINS (1994), esses dois filósofos afirmavam que: “No caso do fogo, seus átomos seriam esféricos, pois essa é a forma mais móvel e penetrante e, também a alma seria constituída por ‘átomos especiais’”, pois não existe nada além dos átomos e do vazio. Aparece assim, o primeiro sistema materialista, tudo é composto por vazio ou corpos, estes podem ser simples (átomos) ou compostos (agregação dos átomos).

Outros filósofos atomistas, num período posterior também defendiam a idéia do átomo, o qual seria a menor porção da matéria que não se poderia dividir, portanto, indivisível. Entre eles estão os gregos Epicuro (341-270 a.C.) e Lucrécio (98-55 a.C.), cujas idéias são conhecidas porque dois documentos importantes foram conservados: uma carta escrita por Epicuro, com suas idéias a respeito da natureza e outro, o livro “Sobre a natureza das coisas” do Romano Lucrécio.

Para Epicuro nada surge do nada e, quando algo termina não se acaba no nada. O que isso significa?

### Você já viu uma flor nascer do nada? Ou uma árvore nascer de uma flor?

Por isso, para ele, quando algo termina não acaba. Da mesma forma a origem de algo é sempre a mesma. Em outras palavras, os átomos, continuam.



## ATIVIDADE

1. Como se formavam as coisas a partir dos elementos de Empédocles?
2. Como seriam formadas as coisas do universo a partir da idéia de Leucipo e Demócrito?
3. O que tem em comum a idéia dos quatro elementos de Empédocles com os átomos dos gregos Leucipo e Demócrito e o atomismo de Lucrécio e Epicuro? E com a idéia de um princípio único para todas as coisas?
4. Apesar de teorias distintas, tanto o atomismo de Leucipo e Demócrito como o de Lucrécio e Epicuro são teorias materialistas. Qual é o ponto em comum destas teorias, que nos permite considerá-las como tal? Explique.

## Carga elétrica: um conceito em evolução...

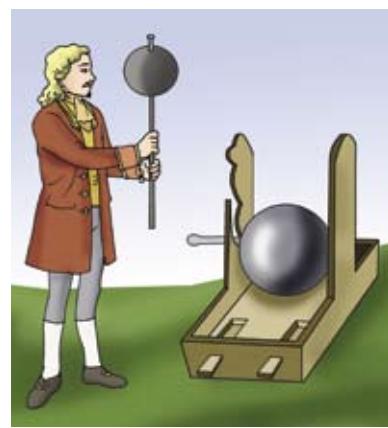
Mais de 2.000 anos se passaram até que, em meados do século XVI o estudo dos fenômenos observados por Tales voltassem então a serem focalizados com mais atenção, e condições técnicas muito mais elevadas.



■ Fig. 2: William Gilbert (1540-1603) Fonte: <http://en.wikipedia.org>

O médico inglês William Gilbert (1540-1603), Figura (2), retomou as experiências e descobriu que outros tipos de materiais também apresentavam comportamento semelhante ao âmbar, isto é, quando atritados entre eles, esses materiais passavam a atrair os demais, comportando-se como o âmbar. Ao realizar a experiência do atrito com outros materiais além do âmbar, Gilbert percebeu que, após o atrito, podia acontecer além da atração, também a repulsão. Propôs então que estes materiais emitiam um eflúvio, o qual era o responsável pelo fenômeno. Da mesma forma que a atmosfera era o eflúvio que puxava os corpos para a Terra, a atmosfera elétrica era o eflúvio responsável pela força elétrica exercida nos corpos leves.

Uma outra contribuição veio de Otto von Guericke (1602-1686), prefeito da cidade de Magdeburgo, mas que também se interessava pela Ciência. Guericke desenvolveu as primeiras máquinas eletrostáticas, como a que é ilustrada na Figura (3), as quais eram constituídas de esferas compostas de minerais fundidos, que ele julgava ser a composição da terra. Essas esferas eram fixadas em torno de um eixo que podia girar. Guericke verificou que se esfregasse a esfera com a mão ao girá-la, ela adquiria propriedade de atração e eliminava centelhas.



■ Fig. 3: Guericke e sua máquina eletrostática.

## Por que a esfera apresentava essa propriedade?

Stephen Gray (1666-1736) percebeu que era possível transportar a eletricidade por meio de fios. Dependendo do material desse fio, a condução era melhor ou pior, chegando em alguns casos, a se comportar como isolante (não transportavam eletricidade).

A partir da idéia de condução elétrica, Charles Du Fay (1698-1739), propôs que havia dois tipos de eletricidade, pois enquanto alguns materiais se atraíam depois de atritados com panos, outros se repeliam. Aos que se comportavam como o vidro associou à eletricidade vítreia, aos que se comportavam como resina, associou à eletricidade resinosa.

Mais tarde Benjamin Franklin (1707-1790) definiu como positiva a vítreia e negativa a resinosa, e é assim que as chamamos até o momento. Ele defendia a idéia de que a eletricidade consiste de apenas um tipo de fluido. Foi a idéia do “fluido único”, surgida, a princípio, em 1747. Todo corpo não eletrizado possui uma quantidade natural de fluido. Essa quantidade seria proporcional ao tamanho do corpo. Um corpo que possuísse excesso de fluido foi chamado por Franklin de “positivo”, e se tivesse falta (sempre em relação à quantidade natural), era chamado “negativo”.

É possível que a idéia de conservação de cargas tenha origens nas teorias de fluido elétrico.



### ATIVIDADE

1. Selecione alguns materiais como, seda, balões de festa, canudinhos e papel toalha. Verifique o que acontece quando você fricciona o papel toalha com os balões cheios. Os balões se atraem? Repelem-se? Se ao invés de balões você usar canudinhos? Percebe alguma semelhança ou é completamente diferente?
2. Adotando o mesmo procedimento, mas fazendo uso da seda ao invés de papel toalha, repita a experiência e compare os resultados obtidos agora, com aqueles do primeiro experimento.
3. Atrite os balões no cabelo do seu colega, o que aconteceu? Por quê?

Pelo que se observou do texto até aqui, que tipo de eletricidade poderíamos associar a esses materiais? Discuta com seus colegas!

Da observação do comportamento dos corpos quando eletrizados, notava-se que alguns se atraíam ou se repeliam com maior ou menor intensidade. Assim, uma preocupação estava em medir a intensidade da força com que os corpos eletrizados eram repelidos ou atraídos, e ainda, que agentes seriam responsáveis por tal intensidade e suas variações.

## Carga: Não mais um fluido, mas uma partícula!

A idéia de fluido era muito presente ainda no início do século XIX, época em que predominava a idéia da continuidade da matéria, a qual seria formada por diversos fluídios. No entanto, evidências experimentais foram fazendo com que a idéia do fluido elétrico perdesse adeptos.

### Do que seria então formada a matéria?

As primeiras evidências da relação entre matéria e eletricidade se deram a partir de experimentos de eletrólise. No início do século XIX, Michael Faraday (1791-1867) estabeleceu algumas leis para a eletrólise, conhecidas como “leis de Faraday” para a eletrólise, a quais utilizam corrente elétrica para produzir uma reação química, que não pode ocorrer espontaneamente.

Os resultados de Faraday podem ser resumidos em dois enunciados:

1. O peso de uma determinada substância, depositada por uma dada quantidade de eletricidade, é sempre o mesmo.
2. Os pesos de diversas substâncias depositadas, libertadas ou dissolvidas num eletrodo por uma dada quantidade de eletricidade, são proporcionais aos pesos equivalentes destas substâncias.

O segundo enunciado é especialmente revelador, se nos lembrarmos que o peso equivalente de uma substância qualquer contém a mesma quantidade de moléculas ou múltiplos inteiros dela. Assim, vemos que as leis da eletrólise são análogas às da combinação química, que inicialmente levaram à idealização da existência do átomo. Se um número definido de átomos reage somente com uma quantidade definida de eletricidade, parece razoável supor que a própria eletricidade seja composta de partículas. (MAHAN, 1972, p. 303)

Em resumo, esses trabalhos davam indícios de que a matéria é constituída de partículas fundamentais, em princípio os átomos, dotadas de “carga elétrica”, porque a reação ocorre mediante o fornecimento de energia elétrica.

### IMPORTANTE

- Um corpo é neutro quando apresenta mesma quantidade de carga positiva e negativa;
- Um corpo está eletrizado negativamente quando apresenta excesso de carga negativa (elétrons), ou seja, durante um processo de eletrização ele recebeu elétrons;
- Um corpo está eletrizado positivamente quando possui prótons em excesso, ou seja, num processo de eletrização ele perdeu elétrons.

A quantidade de carga elétrica que um corpo adquiriu após o atrito é determinada pelo excesso ou falta de elétrons presentes neste corpo. Esta quantidade de carga  $q$  seria então um múltiplo inteiro da quantidade de carga do elétron.

## ■ Modelos e modelos para o átomo

A idéia de átomo foi motivo de conflito durante muito tempo, pois alguns pensadores defendiam a indivisibilidade do átomo, outros afirmavam que a matéria era infinitamente divisível, e ainda, mais tarde havia quem defendesse a inexistência do átomo, como René Descartes (1596-1650), já no século XVII.

As bases da Química foram restabelecidas, em 1807, pelo físico e químico inglês John Dalton (1766-1844), que propôs um modelo mais consistente para o átomo. Veja sua hipótese atômica:

1. Todos os átomos de um dado elemento são idênticos.
2. Os átomos de diferentes elementos têm massas diferentes.
3. Um composto é uma combinação específica de átomos de mais de um elemento.
4. Em uma reação química, os átomos não são criados nem destruídos mas trocam de parceiros para produzir novas substâncias. (ATKINS; JONES, 1999, p.45-46)



■ John Dalton (1766-1844)  
Cientista inglês que realizou longo estudo sobre a teoria atômica. Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

Joseph John Thomson (1856-1940), durante a investigação de “raios catódicos” (raios emitidos quando é aplicada entre dois eletrodos uma alta tensão), mostrou que estes raios eram feixes de partículas carregadas negativamente, vindas do cátodo. Independente do material deste, as partículas eram sempre iguais, logo, ele conclui que essas eram partes dos átomos, as quais chamou de elétrons. Para o modelo de Thomson:

“os elétrons carregados negativamente estariam localizados no interior de uma distribuição contínua de carga positiva. Supõe-se que a forma da distribuição de carga positiva fosse esférica...devido à repulsão mútua, os elétrons estariam uniformemente distribuídos na esfera da carga positiva”. (EISBERG; RESNICK, 1979, p.123)

Esse modelo de Thomson ficou conhecido como “pudim com passas”, mas foi substituído quando o seu ex-aluno Ernest Rutherford (1871-1937), experimentalmente, mostrou que a carga positiva está concentrada em uma região, o núcleo, no centro do átomo.

No modelo de Rutherford para a estrutura do átomo, todas as cargas positivas desse átomo, e consequentemente toda sua massa, são supostas concentradas em uma pequena região no centro chamada núcleo. (EISBERG; RESNICK, 1979, p.127)



## DEBATE

Não era o átomo indivisível? Como o próprio nome sugere?

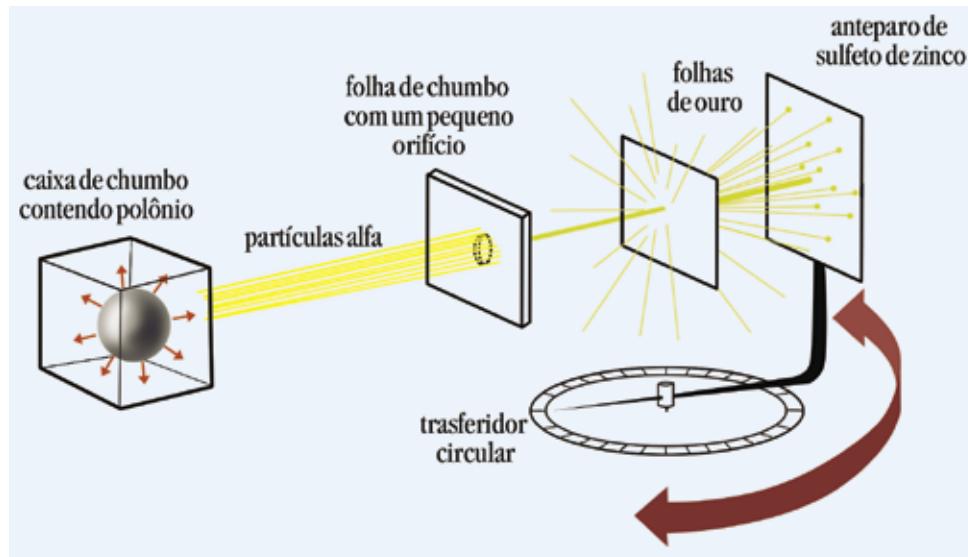
Discuta com seus colegas e professor.



■ Ernest Rutherford (1871-1937)  
Fonte: <http://en.wikipedia.org>

### ■ Como Rutherford chegou a essa conclusão?

Rutherford, em 1908, aproveitando-se do fenômeno da radioatividade, para a realização de seus experimentos bombardeou partículas alfas (são núcleos de átomos de hélio emitidas de material radioativo) em uma placa metálica fina, como esquematizado na Figura (4). Ele observou que a maioria dessas partículas atravessavam a placa, praticamente sem desvio, no entanto, uma parcela pequena dessas partículas eram rebatidas para a fonte. Concluiu então, que o átomo tinha uma região central pequena, o núcleo, onde a carga positiva estava concentrada. Contudo, deveria existir um espaço vazio no átomo (a maior parte), ao redor do núcleo, onde as partículas atravessavam com facilidade, esta é a região onde se encontram os elétrons.



■ Fig. 4: Esquema da experiência de Rutherford.

Tal qual a Terra orbita em torno do Sol ou a Lua em torno da Terra, também o elétron orbitaria em torno do núcleo do átomo.

A teoria de Rutherford tinha evidências experimentais, no entanto não era plenamente aceita devida a teoria eletromagnética de Maxwell, a qual prevê que uma carga acelerada perde energia, na forma de radiação. Isso não estava de acordo com o modelo de Rutherford, o qual propõe: “que os átomos eram instáveis...e ao girarem os elétrons deve-

riam ir perdendo, continuamente, a sua energia e, portanto, colapsar, ao se aproximar do núcleo atômico". (ROCHA, 2002, p.317- 318)

Ao contrário do que foi dito acima o átomo deveria ser estável, então a conclusão foi que a Física Clássica não dava conta de explicar os experimentos, e ainda precisava-se de uma resposta do porque os átomos emitiam e/ou absorviam certas freqüências de radiação.

Em setembro de 1911, Niels Henrik David Bohr (1885-1962) começa a trabalhar no laboratório da Universidade de Cambridge, o qual era dirigido por J.J. Thomson (1856-1940). Através desse laboratório, Bohr conheceu Rutherford, o qual o levou para Manchester, universidade que ele trabalhava.

A mútua colaboração entre estes dois cientistas marca a história da Física Quântica e surge o modelo do Átomo Bohr.

Bohr, longe de descartar o modelo planetário, procurou corrigí-lo naquilo que ele apresentava de mais constrangedor – a estranha instabilidade do átomo. Para isso, ele incorporou ao modelo de Rutherford o conceito quântico de energia... ele conjecturou que o elétron só poderia se mover em determinadas órbitas, as quais estavam afastadas a distâncias definidas do núcleo atômico, não havendo radiação de energia. Assim nascia o denominado "átomo de Bohr". (ROCHA, 2002, p. 221)



■ Niels Bohr (1885-1962)  
Físico dinamarquês que trouxe importantes contribuições para o desenvolvimento do modelo atômico, aperfeiçoando o modelo de Rutherford. Fonte: <http://en.wikipedia.org>

Então a proposta de Bohr, afirma que cada elétron tem energias específicas, e que cada uma dessas energias corresponde a uma órbita circular. Quanto maior a energia do elétron no átomo, mais afastada sua órbita se encontra do núcleo.

Bohr explica seu modelo através dos seguintes postulados:

- I. um elétron se move em órbita circular, devido a sua atração coulombiana com o núcleo;
- II. apenas algumas órbitas são permitidas, as quais estão a distâncias definidas do núcleo, em que o elétron não irradie energia. Nessas órbitas o momento angular deve ser números inteiros da razão entre a constante de Planck e  $2\pi$  ( $h/2\pi$ );
- III. um elétron que se move em uma dessas órbitas permitidas não emite radiação eletromagnética;
- IV. a radiação eletromagnética é emitida ou absorvida se um elétron muda de uma órbita para outra.

Além de órbitas circulares propostas por Bohr, Arnold Sommerfeld (1868-1951) propõe órbitas elípticas, tentando explicar o caso de átomos mais complicados.

A partir da experiência de Rutherford temos mais evidências de que a matéria é constituída de átomos, os quais seriam constituídos por um núcleo e por uma eletrosfera. No núcleo está concentrada praticamente toda a massa do átomo e se encontram prótons (carga positiva) e nêutrons (não possuem carga). Na eletrosfera estão os elétrons (cargas negativas), os quais se movem em torno do núcleo e estão presos a ele devido interações elétricas. Tais forças são atrativas, já que elétrons e prótons possuem cargas diferentes.

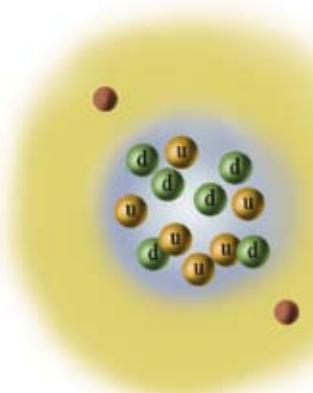
Em geral as porções de matéria que vemos possuem quantidades aproximadamente iguais de cargas positivas e negativas, por isso estão eletricamente neutras, isso de maneira alguma significa não possuir cargas, mas sim ter um “balanço” entre prótons e elétrons.

Nos processos de eletrização, as partículas trocadas entre os átomos são os elétrons. A quantidade de prótons permanece constante, pois as energias associadas ao núcleo são muito grandes, pelo que é muito difícil arrancar prótons (já que estão situados no núcleo do átomo) de um material, enquanto que os elétrons estão mais superficialmente presos na eletrosfera.

Veja a explicação dada a Alice ao visitar o País do Quantum:

“Os prótons e os nêutrons que habitam o núcleo (conhecidos genericamente como nucleons) são exemplos de partículas com interação forte, também conhecidas como hadrons. Existem muitos outros hadrons, apesar de nem todas as partículas participarem da interação forte. A classe de partículas conhecidas como leptons não sente a interação forte. Os elétrons pertencem a essa classe e por isso não estão presos dentro do núcleo junto com os nucleons. Eles percebem o núcleo apenas como uma carga positiva que os mantém frouxamente presos dentro do átomo”. (GILMORE, 1998, p. 166-167)

A Figura 5 mostra o modelo atual para o átomo. Note que na região mais superficial do átomo, como uma espécie de nuvem, aparecem os elétrons e no núcleo, concentram-se os prótons e os nêutrons, os quais são constituídos por partículas ainda menores, os quarks.



■ Fig. 5: Modelo atômico atual.



## ATIVIDADE

A idéia de partícula elementar estava presente no atomismo grego. Agora se tem evidências experimentais a respeito da menor partícula da matéria, os átomos. Existem semelhanças entre as idéias dos filósofos atomistas e o modelo adotado a partir das experiências? Em que se aproximam? Em que se distanciam? Pesquise, discuta com seus colegas e elabore um painel mostrando as possíveis aproximações e os possíveis distanciamentos.

## A carga do Elétron

Foi aproveitando os efeitos provocados pelo campo elétrico (perturbação causada no espaço por uma carga elétrica) presente em corpos que apresentam carga elétrica que Robert Andrew Millikan (1868-1953), por volta de 1908, conseguiu medir com razoável precisão, o valor da carga de um elétron.

Para chegar a tal valor, Millikan utilizou um aparato na forma de câmara onde eram introduzidas gotículas de óleo entre placas metálicas com cargas contrárias, como mostra a Figura 6. Com um microscópio, podia observar as gotas caindo sob a ação da gravidade.

Millikan irradiou o espaço entre as placas com raios X, que chocavam-se com as moléculas de ar. Essas moléculas de ar desprendiam elétrons de seus átomos e eram atraídas pelas gotas de óleo, que ficavam eletrizadas.

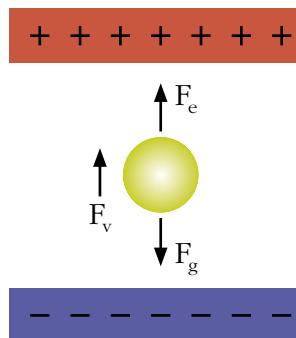


Fig. 7: Forças que atuam durante o movimento da gota de óleo na experiência Millikan.

O campo elétrico entre as placas era controlado por meio de ajustes na carga a elas associada. Esse aparato permitiu a determinação da carga da gota de óleo.

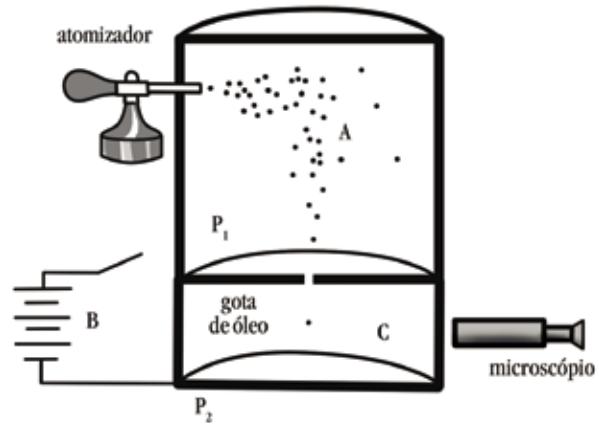


Fig. 6: Aparato experimental utilizado por Millikan. O aparelho da gota de óleo de Millikan para medir a carga elementar  $e$ . O movimento de uma gota de óleo é observado na câmara C, onde atuam sobre a gota a gravidade, o campo elétrico gerado pela bateria B e, se a gota estiver em movimento, uma força de arraste viscoso.

Carregando a placa superior positivamente e a placa inferior negativamente, Millikan aproveitava-se dos efeitos do campo elétrico para parar a queda da gota. Quando em movimento, a gota de óleo sofre ação da força de gravidade  $F_g$ , força de arraste viscoso  $F_v$  e a força elétrica  $F_e$ . Em estado de repouso, a gota de óleo fica em equilíbrio sob a ação apenas das forças de gravidade e elétrica, representado na Figura (7).

O campo elétrico entre as placas era controlado por meio de ajustes na carga a elas associada. Esse aparato permitiu a determinação da carga da gota de óleo.

A repetição do experimento permitiu a determinação da carga de muitas gotas de óleo, como estas eram sempre carregadas por números múltiplos de  $-1,6 \times 10^{-19}\text{C}$  e que uma gotícula capturava números inteiros de elétrons, ele concluiu que a carga do elétron é de  $-1,6 \times 10^{-19}\text{C}$ .

Os elétrons estão presentes em toda a matéria, sendo um dos constituintes fundamentais da matéria. Além disso, todos os elétrons têm a mesma carga e a mesma massa.

Os prótons têm a carga de  $1,6 \times 10^{-19}\text{C}$  e os elétrons têm carga  $-1,6 \times 10^{-19}\text{C}$ . A quantidade de carga  $Q$  de um corpo, e o número  $n$  de elétrons em excesso ou falta, estão relacionados na Equação 1:

$$Q = n e \quad (1)$$

onde  $n$  é um número inteiro e  $e$  é a carga elementar igual a  $1,6 \times 10^{-19}\text{C}$  ( $\text{C}$  é a unidade de carga elétrica, o coulomb).

Pelo que se viu desta história, da busca pelo conhecimento da estrutura da matéria surgiu um conceito importantíssimo para o nosso tempo, o da carga elétrica. Para se ter idéia da importância deste conceito, basta ver a quantidade de aplicações da eletricidade na nossa sociedade.

Convém lembrar ainda, que a busca maior pelos “tijolos” que constituem a matéria não parou, as mais recentes pesquisas têm relevado que além dos elétrons, existe ainda um verdadeiro “zoológico de partículas” com as mais variadas propriedades (uma discussão adicional sobre as descobertas e conceitos que permeiam o estudo de partículas fundamentais, aparece no epílogo deste livro “As três interações fundamentais”).

**Mas ainda fica a pergunta: do que será que é feita a matéria?**

## Referências

ATKINS, P; JONES, L. **Princípios de Química** – Questionando a vida moderna e o meio ambiente. Porto Alegre: editora Bookman, 2001.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica** - Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1979.

GILMORE, R. **Alice no País do Quantum**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998.

MAHAN, M . **Química** – um curso universitário. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1972.

MARTINS, R. De A. **O Universo**: teorias sobre sua origem e evolução. São Paulo: Editora Moderna, 1997.

ROCHA, J. F. (org.): **Origens e Evolução das Idéias da Física**. Salvador: EDUFBA, 2002.

## Obras Consultadas

ARANHA, M. L. de A. & MARTINS, M. H. P. **Filosofando**: introdução à filosofia. São Paulo: Moderna, 1993.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física**. Vol. III. 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2004.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física** Vol. IV 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2004.

JACKSON, J. D. **Eletrodinâmica Clássica**. 2<sup>a</sup> ed. Trad. Annita Macedo e Horácio Macedo. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1983.

REALE, G; ANTISERI, D. **História da Filosofia** – Filosofia pagã antiga. Vol.:1. São Paulo: Editora Paulus, 2003.

RUSSELL, B.J. **Química Geral**. São Paulo: Editora McGraw – Hill do Brasil Ltda, 1982.



Fonte: <http://www.itaipu.gov.br>



# GERAÇÃO MAIS TRANSFORMAÇÃO IGUAL A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

■ Ezequiel Burkarter<sup>1</sup>, Juliana Loch<sup>2</sup>, Marina de Lurdes Machado<sup>3</sup>

*V*ocê já andou de bicicleta? E já instalou um farol na sua bicicleta? Você sabe por que a lâmpada acende quando você pedala?

<sup>1</sup>Colégio Estadual Milton Carneiro - Curitiba - PR

<sup>2</sup>Colégio Estadual do Paraná - Curitiba - PR

<sup>3</sup>Instituto de Educação do Paraná Prof. Erasmo Pilotto - Curitiba - PR

## ■ Como começou...

A utilização da força das águas substituiu a força muscular e a força dos ventos em torno do século III a.C., e hoje ainda é de grande importância. O surgimento da roda d'água horizontal (Nora) possibilitou o uso da energia hidráulica, a qual foi indispensável para a revolução industrial juntamente com o surgimento da máquina a vapor, viabilizando a construção de indústrias em locais com inexistência de queda de água.

Atualmente, ao invés do uso das máquinas a vapor, as indústrias e a própria população têm utilizado a energia elétrica em suas atividades. Devido às condições atuais, já não conseguimos pensar num mundo sem a eletricidade, contudo, todos os avanços tecnológicos e o aumento da população têm desencadeado um significativo aumento no consumo de energia.

Por incrível que pareça, algumas das tentativas de se amenizar o problema da falta de energia, do ponto de vista físico, se parece muito com a situação do nosso dínamo.

No começo do século XIX, a investigação do italiano Alessandro Volta (1745-1827) deu origem à pilha eletroquímica, que consistia de discos de cobre e discos de zinco empilhados um sobre o outro e separados entre si por um disco de pano embebido em solução ácida. Os discos externos eram ligados por fios condutores, que são os terminais da pilha. Esse invento recebeu o nome de “pilha de volta” ou pilha elétrica, pois viabilizou a transformação de energia química em elétrica. Volta descreveu o seu trabalho como sendo a “(...) montagem de um certo número de bons condutores de diferentes tipos... São necessárias 30, 40, 60 ou mais peças (discos) de cobre ou... de prata”. (Rocha, 2002, 207)

Como se vê, pela descrição anterior, a pilha de Volta não oferece tanta praticidade quanto às pilhas encapsuladas que temos hoje, contudo, esse invento representa um marco, pois é a primeira fonte de eletricidade construída pelo homem.



■ Fig. 1: Modelo da Pilha de Volta. A pilha inventada pelo físico italiano possibilitou um meio para produzir corrente elétrica para fins práticos. (Deutsche Museum – Munique).Fonte: [www.copel.com/pagcopel.nsf/](http://www.copel.com/pagcopel.nsf/)

No começo do século XIX, Alessandro Volta inventou a pilha eletroquímica, iniciando assim a unificação entre os fenômenos químicos e elétricos, e a unificação entre o magnetismo e a eletricidade foi iniciada por Hans Christian Oersted, mostrando a deflexão de uma bússola pela corrente elétrica. Logo em seguida, a ação magnética de uma corrente sobre outra foi percebida por André Marie Ampère. Foi, contudo, Michael Faraday quem ampliou a unificação da eletricidade com o magnetismo, ao descobrir a indução eletromagnética, ou seja, que o movimento de um ímã pode gerar corrente num circuito condutor (...). (MENEZES, 2005, p. 20-21)

## Usina Hidroelétrica

Você pode estar pensando o que isso tudo tem a ver com a produção de energia elétrica. Pois saiba que esses estudos e a ampliação da unificação proporcionada por Michael Faraday (1791-1867) permitiram a construção, em torno de cinqüenta anos mais tarde, de geradores que são responsáveis pela produção de grandes quantidades de energia elétrica. Essa energia pode ser obtida através de quedas de água nas usinas hidroelétricas, da queima de carvão nas usinas termoelétricas, dentre outras formas.

Vamos pensar um pouco no funcionamento de uma usina hidroelétrica.

Inicialmente, é preciso um rio com grande capacidade e fluxo de água corrente e quedas d' água.

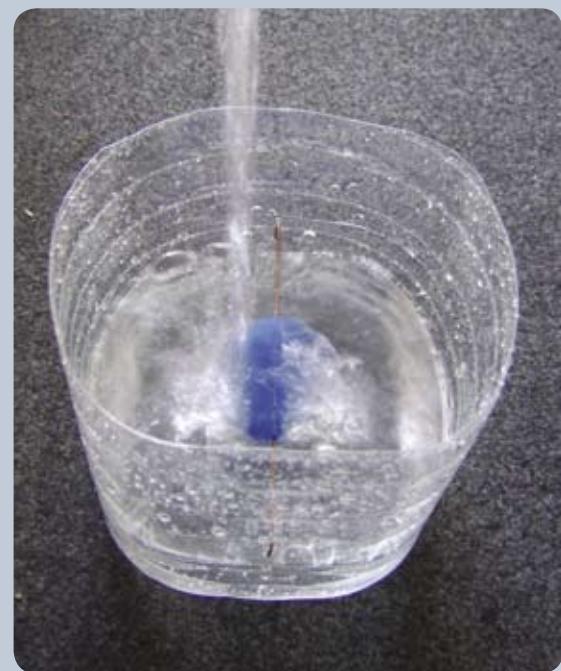
Você já observou que não temos hidroelétricas em regiões de planície, como, por exemplo, a região do rio Amazonas. Pois é, em um rio de planície, a água pode correr para qualquer lugar. Dizemos então que esse movimento é caótico. É o que achamos que acontece com os elétrons livres em um metal. Por isso, os rios mais adequados à construção de usinas localizam-se em regiões de planalto onde existem as maiores quedas de água.

### Como ordenar o movimento da água em um rio utilizando-a para produção de energia?

#### **Uma experiência interessante:**

Você vai precisar de três ou mais garrafas pet, um pedaço de fio duro (pode ser cobre), um balde e água.

1. Pegue uma das garrafas e recorte fazendo pequenas hélices nas quais você fará um furo no meio. Ou, utilize uma tampa de garrafa pet conforme figura ao lado.
2. Pegue outra garrafa e faça dois furos diametralmente opostos. Encaixe uma das extremidades do fio de cobre em um dos furos. Coloque uma hélice no fio e encaixe a outra extremidade no outro furo, conforme figura. Coloque o conjunto no balde.
3. Encha uma garrafa com água e faça com que a água caia sobre as hélices no conjunto montado, conforme o item dois. Varie a altura da queda d' água e observe o que acontece.
4. Faça um relatório e discuta com seus colegas o resultado.

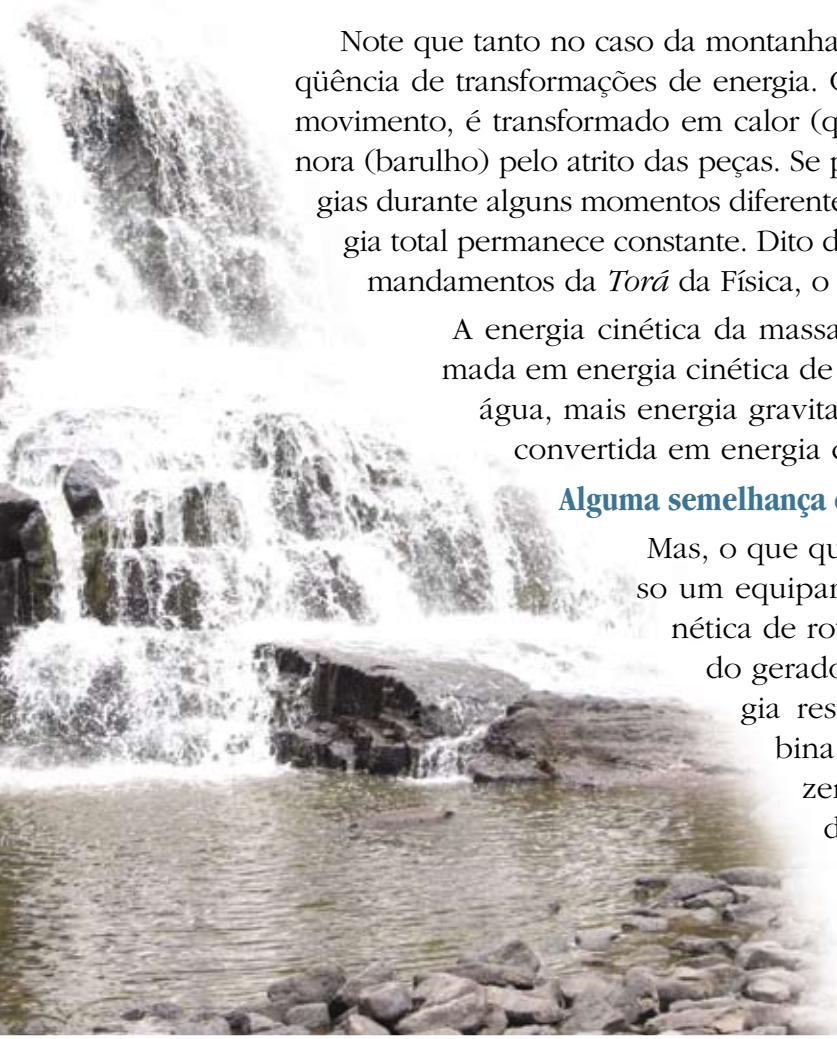


Para orientar o movimento das águas, é preciso represar o rio. Assim, constróem-se barragens represando as águas do rio, provocando um desnível de água que será utilizado para movimentar as turbinas. A energia potencial gravitacional da água contida numa represa elevada corresponde à energia primária de uma hidrelétrica, que através do trabalho da força peso faz a água cair livremente para o nível mais baixo, onde se localiza a turbina. Durante a queda, a energia potencial gravitacional é transformada em energia cinética e a água tem a sua velocidade aumentada devido ao efeito da gravidade.

Como já comentamos, uma forma de energia pode ser transformada em outra. Veja como isso é explicado à Alice, na alegoria de Gilmore (1998), quando ela observa uma montanha russa no país do Quantum:

“Aquele carrinho, como você está vendo, não está em movimento agora e por isso tem energia cinética nula. Mas ele está no alto, e sua posição lhe confere energia potencial. Quando começa a descer, ele perde altura e por isso perde também um pouco de energia potencial, que é convertida em energia cinética. É isso que faz ir mais e mais rápido enquanto desce”.

(Gilmore, 1998, p. 28, 29)



Note que tanto no caso da montanha russa quanto no da usina, temos uma seqüência de transformações de energia. O que não é transformado em energia de movimento, é transformado em calor (que também é energia) ou em energia sonora (barulho) pelo atrito das peças. Se pudéssemos somar os valores dessas energias durante alguns momentos diferentes do processo, perceberíamos que a energia total permanece constante. Dito de outra forma, conserva-se. Esse é um dos mandamentos da *Torá* da Física, o Princípio da Conservação da Energia!

A energia cinética da massa de água ao atingir a turbina é transformada em energia cinética de rotação. Quanto mais alta for a queda da água, mais energia gravitacional o sistema terá disponível para ser convertida em energia cinética de rotação, através da turbina.

### Alguma semelhança com a experiência que você realizou?

Mas, o que queremos é energia elétrica. Então é preciso um equipamento que transforme aquela energia cinética de rotação em energia elétrica. Esse é o papel do gerador, um dispositivo que transforma a energia resultante do movimento rotatório da turbina em energia elétrica. Aliás, podemos dizer que o gerador transforma qualquer tipo de energia em energia elétrica. Por isso, qualquer tipo de usina destinada à produção de energia elétrica apresenta um gerador de eletricidade.



## ATIVIDADE

E o farol da sua bicicleta, o que tem a ver com tudo isso? Dissemos no início que o dínamo é um pequeno gerador de eletricidade, como você leu até aqui, certamente já pode responder a pergunta colocada a seguir:

A lâmpada não acende sozinha, você percebe alguma transformação de energia nesse processo?

**Você sabia que o primeiro dínamo foi construído por Faraday durante investigações sobre a indução eletromagnética?**

Vamos entender um pouco melhor o trabalho de Faraday...

## A Indução Eletromagnética

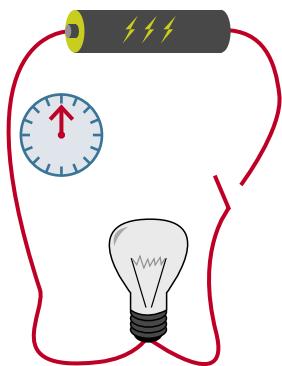
O gerador é um dispositivo que funciona segundo as leis da indução eletromagnética de Faraday, descobertas por ele a partir do resultado de experiências realizadas em 1831.

Em 1820, Hans Orsted (1777-1851) publicou seus trabalhos que iniciaram a unificação entre o magnetismo e a eletricidade, ao perceber a deflexão de uma bússola ocorrida pela passagem de uma corrente elétrica. Isso parece ter motivado os estudos de Faraday a respeito do eletromagnetismo, que a esta altura já trabalhava no laboratório do químico inglês Humphry Davy (1778-1829).

### Uma atividade experimental

Com alguns materiais fáceis de serem encontrados, você poderá refazer a experiência de Orsted: pilha, uma bússola, uma lâmpada (do tipo utilizado em pinheiro de natal), uma chave liga-desliga (se não encontrar, improvise com o próprio fio de ligação) e fios para ligação. Monte o circuito conforme o esquema ao lado.

1. Ao fechar o circuito, a lâmpada se acende devido a passagem de uma corrente elétrica. O que acontece com a agulha da bússola?
2. E se inverter o sentido da corrente elétrica? O que acontece com a agulha agora?
3. Mantenha a agulha da bússola paralela ao fio. Repita os itens 1 e 2. E agora, o que aconteceu?
4. O que é possível dizer quanto ao ângulo de deflexão da agulha? O que sinalizava a deflexão da bússola? Discuta a experiência com os seus colegas. Faça um relatório.



Nesta época, influenciados pelas idéias da mecânica de Isaac Newton (1642-1727), os fenômenos físicos eram explicados por meio de forças. A observação do fenômeno da indução mostrava que, quando o circuito era fechado, a agulha se movimentava até ficar perpendicular ao fio. Por outro lado, o mesmo acontecia quando o circuito era fechado, mas o sentido da corrente elétrica era invertido. Nesse caso, o sentido do movimento da agulha se invertia. Por isso, Oersted considerou que uma força perpendicular ao fio surgia enquanto existia corrente elétrica passando por ele.

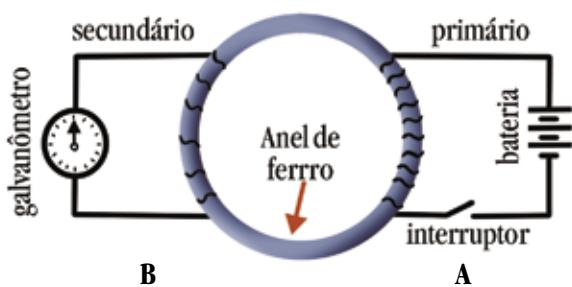
**Por que o pólo magnético da agulha tendia a girar em torno do fio condutor? O que tinha em comum a eletricidade e o magnetismo? O que ainda não estava entendido?**

Para realizar o seu experimento Faraday, enrolou fios em dois lados de um núcleo de ferro doce. Em um fio ele ligou uma bateria e, no outro, um galvanômetro, que é um aparelho usado para detectar e medir correntes elétricas. Motivado por outras experiências por ele realizadas e por estudos de outros cientistas, entre os quais o francês André-Marie Ampère (1775-1836), Faraday acreditava que a passagem de corrente no fio ligado à bateria induziria uma corrente que seria detectada no galvanômetro.

O texto colocado na seqüência, traduzido por Dias (2004), apresenta a descrição de como Faraday construiu o seu aparato experimental.

Foi feito um anel de ferro [ferro doce] circular, com 7/8 de polegada de espessura e 6 polegadas de diâmetro externo. Várias espiras de fio de cobre foram enroladas ao redor de uma metade do anel, as espiras sendo separadas por barbante e algodão – existiam três extensões de fio, cada um com aproximadamente 24 pés de comprimento e eles poderiam ser ligados como uma só extensão ou usados como pedaços separados, cada um isolado do outro. Chamarei esse lado do anel de A. No outro lado, mas separado por um intervalo, foram enrolados fios em dois pedaços juntos, contabilizando aproximadamente 60 pés em comprimento, a direção sendo como uma das primeiras espiras; este lado chamarrei B. (FARADAY. Citado por DIAS, 2004, p.44)

O esquema ao lado representa o aparato experimental utilizado por Faraday. Contrariamente ao que ele esperava, Faraday observou que só aparecia algum efeito no galvanômetro (lado B) quando se abria ou se fechava a chave do circuito (lado A). Faraday realizou outras experiências, mas o resultado era sempre o mesmo: só aparecia algum efeito no lado B quando a corrente elétrica no lado A era iniciada ou interrompida, isto é, quando o circuito do lado A era fechado ou aberto. Mantendo o circuito fechado, nada se observava no lado B.



Através de seus experimentos, Faraday, pôde concluir que um campo elétrico é gerado na região do espaço sempre que houver a variação temporal de um campo magnético nessa região. Logo, a corrente elétrica que surge no circuito fechado ocorre devido ao campo elétrico criado por um campo magnético variável na região do circuito.

Um desses experimentos fez com que ele obtivesse corrente elétrica induzida, agora pela ação de um ímã permanente. Para tanto, utilizou-se de um anel triangular de ímãs permanentes. Para realizar o experimento Faraday estabelecia o contato físico entre os ímãs. Depois repetia a operação rompendo o contato. Ao realizar os dois procedimentos (encostar ou afastar os ímãs) ocorria uma variação magnética rápida no cilindro central.

Faraday já estava ciente de que era possível produzir correntes elétricas tanto a partir de uma outra corrente elétrica (a indução volta-elétrica) como pela variação magnética brusca. Embora ele já estivesse tentado obter efeitos pela aproximação e afastamento de ímãs, não tinha obtido resultados, mas tais efeitos deviam existir.

Por isso ele insistiu e, no dia 17 de outubro de 1831, Faraday realizou o seu experimento mais conhecido, aquele da indução de corrente, somente movimentando uma barra magnética dentro de uma bobina.

O experimento consistia de um cilindro de papel oco, coberto por 8 enrolamentos de fio de cobre, todos com a mesma direção e, separados por algodão. Em cada uma das extremidades, juntou os oito enrolamentos formando um feixe. Essas duas extremidades foram conectadas a um galvanômetro, através de fios de cobre.

Um ímã foi inserido dentro da hélice e, em seguida, rapidamente empurrado em todo o seu comprimento. No galvanômetro observava-se o movimento da sua agulha. Retirando o ímã para fora, novamente, a agulha movia-se, porém em sentido contrário. Faraday sugeriu uma regra para determinar a direção da corrente induzida por ímã, versão hoje conhecida como regra da mão direita.

O princípio descoberto era que o movimento de um ímã gera uma corrente elétrica no condutor. Este princípio evoluiu, por uma longa história, até chegar aos modernos geradores elétricos. O trabalho realizado por Faraday, no final de 1831, complementou a descoberta do eletromagnetismo por Orsted, mostrando a existência do fenômeno inverso, ou seja, a produção de efeitos elétricos pelo magnetismo.

Sua conclusão é conhecida como “Lei de Faraday da Indução Eletromagnética” e se constitui como uma das quatro leis fundamentais do eletromagnetismo. A corrente que surgiu no circuito fechado foi chamada por ele de corrente induzida, provavelmente, em analogia a eletrização por indução, fenômeno já conhecido na época.

É inquestionável a importância dos trabalhos de Faraday. O caminho da sua descoberta, no eletromagnetismo, foi o da experimentação, ou seja, ele foi levado à teoria pelos experimentos. Sua lei da Indução é, antes de tudo, uma lei empírica. Seus trabalhos exibiram pouco da Matemática, talvez pela sua precária formação básica, aprendendo somente o necessário para ler, escrever e um pouco de Matemática. Sua atenção estava quase exclusivamente voltada para os próprios fenômenos e para sua explicação em termos quase fenomenológicos, sem tentar realizar grandes vôos teóricos.

(Adaptado de: DIAS, 2004)

Colocando de outra forma, quando o ímã era aproximado da espira circular, aumentava o fluxo magnético aparecendo a corrente induzida, o mesmo acontecia com o afastamento do ímã, o fluxo diminuía, mas nesse caso o sentido da corrente era invertido.

A explicação desse comportamento da corrente induzida surgiu após os trabalhos de Faraday, com a Lei de Lenz, proposta por Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865). Segundo esse resultado, o sentido das correntes induzidas se opõe a variação do fluxo que a provocou. Dito de outra forma, no caso da aproximação do ímã, o sentido da corrente parece ser tal que tenta impedir essa aproximação. Quando o ímã é afastado, o sentido da corrente tenta impedir o afastamento.

Se a corrente não tivesse esse comportamento, o ímã se aproximar ia ou se afastaria indefinidamente (não pararia nunca), aumentando a corrente infinitamente. Assim, o sentido da corrente manifesta a conservação da energia no sistema. Do contrário, a aproximação levaria a um aumento da corrente sem uma fonte de energia para tal.



■ Faraday (1791-1867) Seus estudos levaram a formulação do conceito de indução eletromagnética que possibilitou a produção de energia em grande escala. Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

## A “produção” de energia elétrica

Até os trabalhos de Faraday e de Joseph Henry (1797-1878), a produção de energia elétrica era através de pilhas (como você leu no início deste texto), o que não seria viável para produção de energia em grande escala, se as únicas fontes de fem fossem de natureza química para a produção de energia elétrica em grande escala.

### Fem, o que é isso?

### Você já ouviu falar em geradores de força eletromotriz?

Esses geradores efetuam um trabalho sobre as cargas que passam através dele, fazendo com que entre seus terminais apareça uma diferença de potencial. Um exemplo: num gerador, (não esqueça: bateria é um gerador, pois estes são dispositivos que transformam qualquer forma de energia em energia elétrica), de 8 V, significa que a fem vai realizar um trabalho de 8 J, “um esforço”, para transportar uma única carga, de 1 C, de um polo (extremidade) para outro.

Para você entender melhor, vamos fazer uma analogia com uma bola que rola num plano inclinado. A mão que vai colocar a bola no topo do plano, cada vez que ela chega à base, representa a força eletromotriz. Num circuito magnético, como é o caso dos geradores com os quais estamos lidando, essa força eletromotriz é induzida no processo de variação de fluxo magnético e, também, obedece a Lei de Lenz.

O gerador utilizado nas usinas hidroelétricas consiste de uma parte fixa, chamada de estator, que é constituída de enrolamentos onde a corrente será gerada. Uma outra parte, chamada rotor, é móvel e é o local onde é criado o campo magnético. O rotor gira acoplado à turbina que fornece a energia ao sistema.



■ Friedrich Emil Lenz (1804-1865).  
Fonte: <http://en.wikipedia.org>

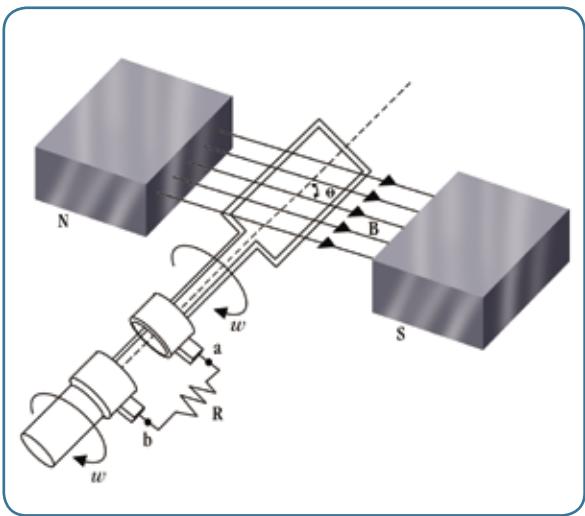


## ATIVIDADE

E no caso do dínamo da bicicleta, quem fornece energia?

A figura ao lado representa o esquema de um gerador: basicamente, ele consiste de uma espira retangular que fica imersa num campo magnético uniforme e gira em torno de um eixo perpendicular às linhas do campo magnético.

O fenômeno da indução eletromagnética ocasionou uma verdadeira revolução na produção de energia elétrica, que até então só era obtida através da energia química de pilhas ou baterias. A importância dos estudos de Faraday está entre as cinco datas importantes que o historiador Eric Hobsbawm cita ao analisar, no seu livro a Era das Revoluções, o período 1789-1848.



No todo, as clássicas ciências físicas não foram revolucionadas, isto é, permaneceram substancialmente dentro dos termos de referência estabelecidos por Newton, ou continuando as linhas de pesquisa já seguidas no século XVIII ou expandindo as antigas descobertas fragmentárias e coordenadas em sistemas teóricos mais amplos. Assim, o mais importante dos novos campos abertos, e o único que teve imediatas consequências tecnológicas, foi o da eletricidade, ou melhor, do eletromagnetismo. Cinco datas importantes - quatro delas em nosso período - marcam seu progresso decisivo: 1786, quando Galvani descobriu a corrente elétrica; 1799, quando Volta construiu sua bateria; 1800, quando a eletrólise foi descoberta; 1820, quando Oersted descobriu a conexão entre eletricidade e magnetismo; 1831, quando Faraday estabeleceu as relações entre todas estas forças, e por acaso se viu como o pioneiro de um enfoque da física (em termos de "campos", em vez de impulsos mecânicos) que se antecipava à era moderna. (HOBBSAWM, p.388)

## A Eletricidade causa uma revolução...

No século XVIII, a revolução industrial ocorreu pelo surgimento do sistema fabril (no texto Vapor e movimento, da professora Luiza Polak, você poderá encontrar mais informações sobre o assunto). Essa revolução ocorreu mais pelo trabalho e dedicação de técnicos do que de cientistas. O século XIX seria o tempo das grandes sínteses do eletromagnetismo, o que contribuiu para o surgimento de uma segunda revolução industrial.

A diferença dessa segunda revolução em relação à primeira é que agora ela acontece devido o desenvolvimento científico, propiciado

pelo desenvolvimento industrial que reaplicava seus lucros em novos investimentos para a produção. Em termos de energia, o motor a combustão interna, que utiliza como combustível o petróleo e a energia elétrica, são mais potentes e apresentam maiores rendimentos em relação ao vapor, intensificando o desenvolvimento tecnológico capitalista.

O dínamo possibilitou a substituição do vapor, utilizado para produzir movimento nas máquinas, pela eletricidade, como força motriz destas máquinas utilizadas nas indústrias. O uso da eletricidade viabilizou a mecanização dos meios de produção dando origem à produção em série.

### **Mas o que aconteceria se fosse possível iluminar fábricas e escritórios? E as residências?**

Numa época em que a ciência se desenvolvia esplendidamente, houve os que pensaram nisso, especialmente os que desejavam aumentar seus lucros. Dentre esses, podemos citar o americano Thomas Edison (1847-1931), a quem é atribuído o invento da lâmpada elétrica. A título de ilustração, a foto abaixo mostra uma das primeiras ruas iluminadas a partir de energia elétrica nos Estados Unidos.



■ Uma das primeiras ruas a receber iluminação pública, Massachusetts, Estados Unidos. Foto: Francisco Burkarter.

Edison também foi o primeiro a dedicar-se à fonte de energia elétrica, ou seja, o dínamo ou gerador, tendo fundado importantes companhias de iluminação pública nos Estados Unidos e também na Europa. Em setembro de 1882, a primeira usina, com sistema elétrico, criada pelo seu grupo empresarial, começou a funcionar em Manhattan, Nova Iorque.

Além das formas de transformação discutidas até aqui, existem, ainda, outras formas de obtermos energia elétrica, como por exemplo, usinas termoelétricas, que utilizam o calor para mover turbinas. A usina nuclear se encaixa nesse grupo (o das termoelétricas), a qual aquece água através da fissão de material radioativo, processo utilizado nas Usinas de Angra 1 e Angra 2, no Rio de Janeiro.

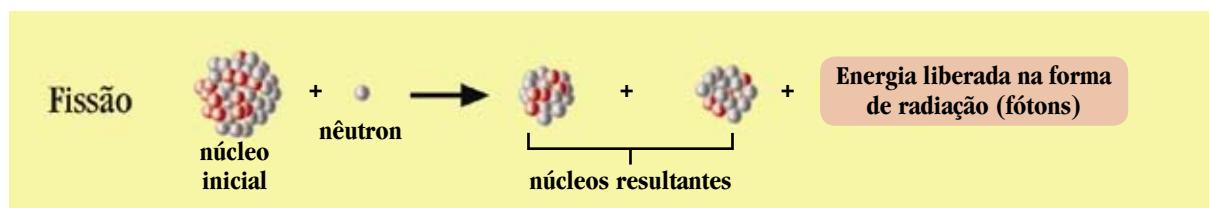
A energia nuclear tornou-se importante para países que não disponham de recursos naturais renováveis. No entanto, quando o tema é energia nuclear, todos pensam nos malefícios que esta pode causar, como bomba atômica e explosão de reatores nucleares (utilizados em usinas nucleares). Deve-se, contudo, ressaltar a importância das técnicas nucleares na Medicina – na cura de câncer – e, ainda, a transformação da energia nuclear em energia elétrica nas Usinas Nucleares.

Então, vamos entender o que acontece em uma Usina Nuclear:

"São usinas térmicas que usam o calor produzido na fissão nuclear (é a 'quebra', ruptura do átomo, este absorve um nêutron tornando-se instável e então se divide liberando grande quantidade de energia) para movimentar vapor de água, que, por sua vez, movimenta as turbinas em que produz a eletricidade. Em um reator de potência do tipo PWR (termo, em inglês, para reator em água pressurizada), como os reatores utilizados no Brasil, o combustível é o urânio enriquecido cerca de 3,5%. Isso significa que o urânio encontrado na natureza, que contém apenas 0,7% do isótopo  $^{235}\text{U}$ , deve ser processado ('enriquecido') para que essa proporção chegue a 3,5%... enquanto que na construção de uma bomba nuclear este mesmo elemento precisa ser enriquecido a um nível superior a 90%".

(Adaptado de: Gonçalves, O. D.; Ivan, P. S. de A.. A Energia Nuclear, In: CIÊNCIA HOJE – Outubro, 2005)

A figura abaixo mostra a seqüência do processo de fissão de um núcleo de um átomo de urânio.



## ATIVIDADE

Escreva um texto sobre a produção de energia elétrica no Brasil, através de Usinas Hidroelétrica e Nuclear, contemplando os seguintes tópicos:

- Riscos e procedimentos de segurança que devem ser levados em consideração;
- Existência de fonte disponível;
- Custo final do kWh;
- Prejuízos ambientais, se for o caso.

## Um pouco do início da descoberta dos elementos radioativos...

Wilhelm Röntgen (1845-1923), físico alemão, observou em seus experimentos, em 1895, o que chamou de "raios penetrantes", os quais eram produzidos em ampola de vidro através de efeito elétrico, pois atravessavam carnes, mas não atravessavam materiais maciços como ossos. Na continuidade de suas experiências, chamou-os de raios X. Logo a descoberta ficou famosa, e em 1896, o físico francês Henri Becquerel (1852-1908) descobriu raios emitidos, naturalmente, de um pedaço de Urânio.



- Marie Curie (1867-1934). Realizou importantes estudos na área da Radioatividade. Foi a primeira pessoa a receber dois prêmios Nobel em áreas diferentes. Um em Física, em 1903 e outro em Química, em 1911.
- Fonte: <http://en.wikipedia.org>

Marie Curie (1867-1934) interessou-se pelos “raios penetrantes” detectados por Henri Becquerel, dedicando-se a estes. Marie retirava Urânio da pechblenda (óxido de Urânio), um minério, ou ainda da calcolita (fosfato de cobre e uralina). Ela acreditava que poderiam existir outras substâncias radioativas nesses minérios, pois a radiação era grande se comparada com a porcentagem de Urânio no minério. No entanto, depois de um processo de purificação (em que peneirava, tritava, dissolia-o por ebulição, fervia o líquido, filtrava-o e destilava-o), chegou a uma versão pura da nova substância, um novo elemento químico, o qual foi chamado de Polônio, em homenagem a sua Terra Natal (Polônia). Com a continuidade de suas pesquisas (e purificação), descobriu outro elemento, o Rádio, do latim *radius* que significa “raio”.

Marie adoeceu logo no início de suas pesquisas devido aos efeitos radioativos dos elementos, pois, na época, pouco se sabia do perigo que estes ofereciam.

Você deve ter percebido que, a partir do final do século XVIII e início do século XIX a ciência se desenvolveu muito, especialmente no campo do eletromagnetismo, e, ao mesmo tempo em que se alimenta do capitalismo para se desenvolver, também se constitui no elemento motor para o desenvolvimento capitalista. Primeiro ocorreu a divisão do trabalho e, depois, a incorporação das máquinas aos setores produtivos. Muitas fábricas, mesmo após o desenvolvimento das máquinas, continuaram a trabalhar sem as mesmas, por interesses próprios da organização fabril. Adam Smith (1723-1790) analisa uma divisão que já existia e considera o trabalho produtivo na indústria como o gerador da riqueza das nações. Para que você possa refletir, leia o texto colocado na seqüência:

O argumento social da economia política de Adam Smith era tanto elegante quanto confortador. É verdade que a humanidade consistia essencialmente de indivíduos soberanos de certa constituição psicológica, que buscavam seus próprios interesses através da competição entre uns e outros. Mas poderia ser demonstrado que estas atividades, quando deixadas tanto quanto possível fora de controle, produziam não só uma ordem social “natural”, mas também o mais rápido aumento possível da “riqueza das nações”. A base desta ordem natural era a divisão social do trabalho. Podia ser cientificamente provado que a existência de uma classe de capitalistas donos dos meios de produção beneficiava a todos, inclusive aos trabalhadores. O aumento da riqueza das nações continuava com as operações das empresas privadas e a acumulação de capital, e poderia ser demonstrado que qualquer outro método de assegurá-lo iria desacelerá-lo ou mesmo estancá-lo. Essa sociedade não era incompatível com a igualdade natural de todos os homens com a justiça, pois, além de assegurar inclusive aos mais pobres condições de vida melhores, ela se baseava na mais eqüitativa de todas as relações: o intercâmbio de valores, ou mercadorias, equivalentes no mercado. O progresso era, portanto, tão “natural” quanto o capitalismo. (Adaptado de Hobsbawm, 2005, p. 330)



## ATIVIDADE

1. O historiador Hobsbawm (2005) coloca que os homens desta época, entre eles Adam Smith, realmente acreditavam no progresso da sociedade capitalista e nos benefícios que ela traria para a humanidade de uma maneira geral.
2. Adam Smith acreditava que a origem da divisão social do trabalho estava na própria natureza humana, naturalmente propensa à troca.
3. Podemos dizer que Thomas Edison foi um cientista com tino comercial, pois suas pesquisas científicas eram direcionadas para aquilo que lhe desse lucro.

E você, o que pensa sobre isso? Discuta com seus colegas. Em seguida, escreva um texto procurando relacionar o desenvolvimento capitalista com o científico, suas relações, seus benefícios e/ou malefícios à sociedade contemporânea.

Aqui terminamos essa nossa conversa. Você deve ter observado que não usamos equações matemáticas para tratar dos fenômenos físicos estudados neste Folhas. Evidentemente, existem equações matemáticas desenvolvidas pelos cientistas para descrever esses fenômenos e, certamente, elas serão apresentadas pelo seu professor ou professora. Esperamos ter contribuído para a compreensão do funcionamento do dinamo da sua bicicleta. Mas também da indução eletromagnética, enfim, da importância da energia para a sociedade atual e seus sistemas produtivos dela dependentes.

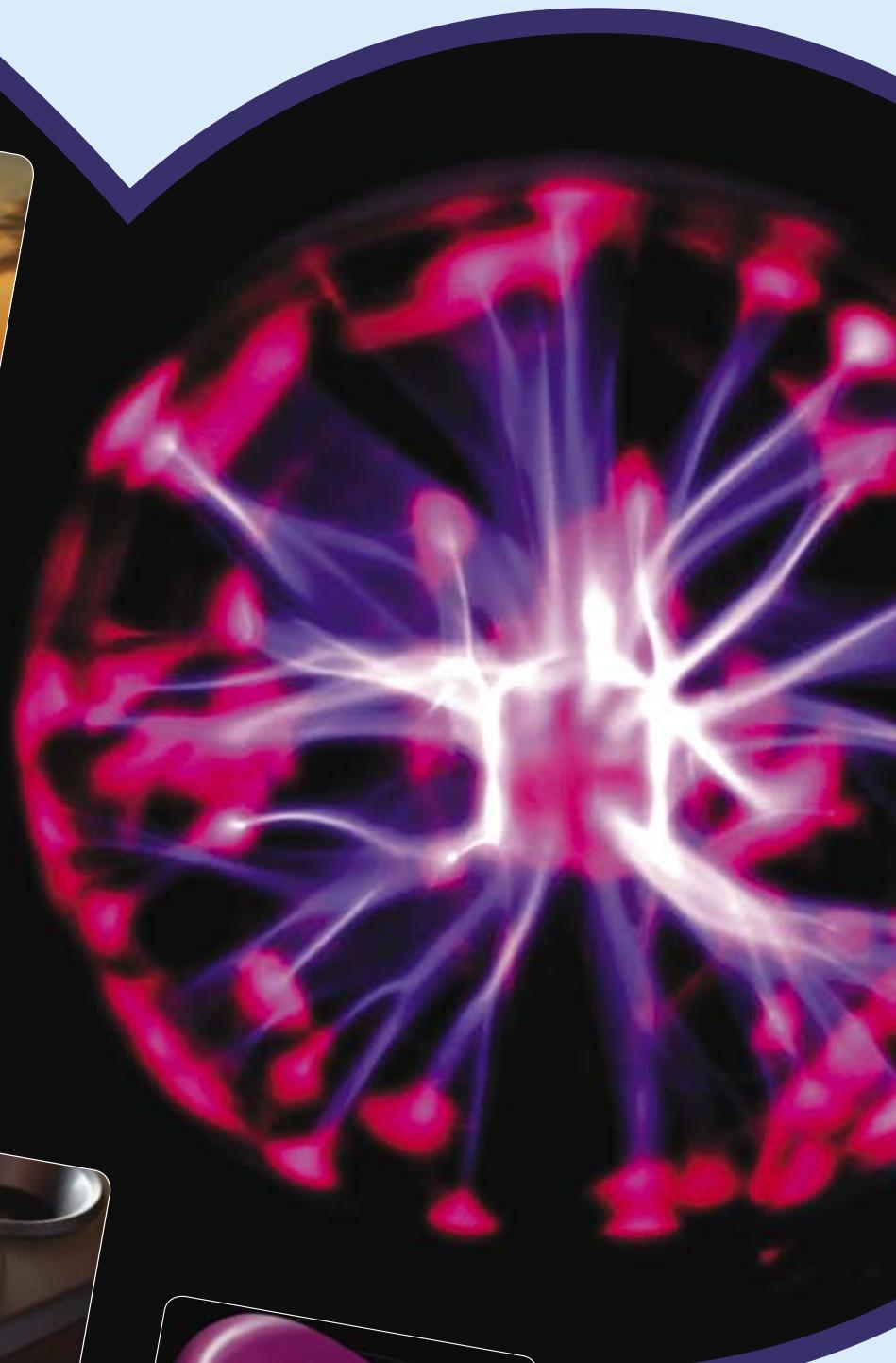
## Referências

- DIAS, V. S. **Michael Faraday**: subsídios para metodologia de trabalho experimental. São Paulo: USP, 2004. Dissertação de mestrado.
- GILMORE, R. **Alice no País do Quantum**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998.
- GONÇALVES, O. D.; Ivan, P. S. de A.. A Energia Nuclear, In: **Revista Ciência Hoje**, Outubro, 2005.
- HOBSBAWM, E. J. **A Era das Revoluções**. 19.ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2005.
- MENELES, L. C. **A Matéria**: uma aventura do espírito. São Paulo: SBF, 2005.
- PARKER, S.. **Edison e a Lâmpada Elétrica**. São Paulo: Scipione, 1996. (Coleção caminhos da Ciência).

## Obras Consultadas

GREF. **Eletromagnetismo**. 4. ed. São Paulo: Edusp, 2000.

PARKER, S. **Marie Curie e a Radioatividade**. São Paulo: Scipione, 1996.



# CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

■ Juliana Loch<sup>1</sup>, Ezequiel Burkarter<sup>2</sup>

Campo, campos, ondas! E aí? Você está sentindo?

Não?

Pois saiba que nesse momento você está passando por ondas e mais ondas, campos e mais campos...

Parecem fantasmas!

Pare e pense!

De onde vem, para onde vão?

Por que esses entes estão aí?

O que querem nos dizer?

<sup>1</sup>Colégio Estadual do Paraná - Curitiba - PR

<sup>2</sup>Colégio Estadual Milton Carneiro - Curitiba - PR

## Nada surge do nada!

Se você não leu o Folhas sobre carga elétrica, leia!

Se você leu, já sabe que o estudo da eletricidade começou com Tales de Mileto (625-547 a.C.). Apoiado nos trabalhos de Tales, William Gilbert (1544-1603) acreditava que certos materiais quando atritados emitiam um eflúvio, o qual era responsável pela atração entre esses materiais. Provavelmente essa seja a idéia precursora do conceito de campo.

**Mas como ocorria a atração entre dois materiais se não havia uma ligação entre eles? No caso de haver uma atração, “quem” é responsável pela aplicação da força, uma vez que não há contato?**

Gilbert tenta fazer uma analogia com a eletricidade para o magnetismo: assim como existiam eflúvios elétricos, deveriam existir eflúvios magnéticos. Mas concluiu que não era possível, pois não havia transferência de material e o ferro atraía o ímã, assim como o ímã atraía o ferro. Então a explicação feita por ele foi a mesma da antiguidade (dada por Thales de Mileto): “A força magnética era algo ‘animado’, que ‘imita uma alma’”. (Gilbert. Citado por Gardelli, 2004, p. 15)

Em uma linguagem moderna, com o conhecimento que se tem hoje, o que seria essa “alma”? Indo além, talvez se possa perguntar:

**O que seria essa “alma” que parece sair de um corpo A e dizer a um corpo B: “e aí, cara, seu vizinho me mandou aplicar uma força e te levar para perto dele!”?**



## Pense rapidamente! O que a idéia anterior lhe faz lembrar?

Claro...Isso mesmo! Um ímã!

Vamos considerar este ímã como sendo o corpo A, foi ele quem mandou o recado; nessa situação, o corpo B pode ser um prego, e quem entregou o recado foi o campo magnético. O quê? Campo magnético?

É campo magnético, gerado por ímãs, eletroímãs e até por nosso planeta.

Se você não tinha lido o folhas sobre carga elétrica até o início desse, certamente leu antes de prosseguir a leitura deste texto, então já “conhece” a carga elétrica. Assim como o ímã “perturba” a região a sua volta, a carga também o faz, “gerando” um campo elétrico.

Você já deve ter sentido os pelos do seu braço sendo atraídos pela tela da televisão, não é? Pois é, dessa vez quem mandou o recado foi o campo elétrico.

Depois das descobertas dos fenômenos elétricos e magnéticos, muitos anos se passaram, e por volta de 1820, deu-se a descoberta da relação entre eletricidade e magnetismo. Quem fez isso foi Hans Christian Oersted (1777-1851), com a realização de um experimento bastante simples.



### PESQUISA

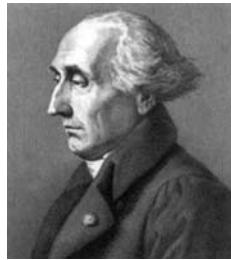
Faça uma pesquisa sobre a experiência de Orsted. Qual a relação deste experimento com a conclusão de Orsted sobre eletricidade e magnetismo?

Segundo historiadores, não se sabe ao certo se a descoberta foi prevista ou se deu por acaso, mas o que se tem certeza é que a descoberta de Orsted despertou interesse na comunidade científica, e alguns cientistas passaram a se dedicar ao tema, como Davy (1778-1829) e Wollaston (1766-1828). Wollaston, recebeu uma carta de Orsted, na qual descrevia seu experimento.

No meio científico, a idéia de universo descrito por forças fundamentais que regem os fenômenos físicos, cinco no total, eram muito fortes e foram descritas por Newton no *Principia*. No caso da força entre dois corpos, ela é explicada pela teoria da gravitação: a força entre dois corpos de massa  $m_1$  e  $m_2$  é diretamente proporcional ao produto das massas ( $m_1 \times m_2$ ) e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as duas massas ( $d_{1,2}$ )<sup>2</sup>.



■ Hans Christian Oersted (1777-1851). Colaborou com a unificação da Eletricidade e do Magnetismo, e ainda que não com tamanha intensidade realizou trabalhos na Química e escreveu alguns artigos sobre Filosofia. Fonte: <http://en.wikipedia.org>



■ Joseph-Louis de Lagrange  
(1736-1813)  
Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

A Física newtoniana influenciava todas as áreas do conhecimento. Mas foi a partir dos trabalhos de Joseph Louis Lagrange (1736-1813) (*Mecanique analytique*, a qual data de 1799) e Pierre Simon (1749-1827), o marquês de Laplace (*Exposition du systeme du monde*, a qual data de 1796) que se estabeleceu a matematização dos fenômenos naturais através da mecânica analítica.

Uma das obras mais importantes de Laplace foi o seu Tratado de mecânica celeste, escrita em quatro volumes, entre 1799 e 1822. Nesse tratado, o sistema solar não necessita mais da atuação divina para movimentar-se, visto que é estável e perpétuo.



■ Pierre Simon Laplace  
(1749-1827)  
Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

Para Laplace não teria propósito saber o sentido ou a finalidade do movimento do sistema solar. Assim, ele (Laplace) dá origem à doutrina denominada materialismo mecanicista, a qual dominou o pensamento de grande parte dos cientistas do século XIX.

Outra decorrência do sistema de Laplace é o determinismo, ou seja, tudo o que acontece tem necessariamente uma causa e, se essa causa for conhecida, o efeito é previsível.

Com as obras de Lagrange e Laplace, a mecânica analítica tornou-se a mais importante das ciências, garantindo a matematização de toda a Física. Sob o ponto de vista da doutrina materialista mecanicista, era uma questão de tempo que toda a natureza dos fenômenos físicos viria a ser matematizada a partir das equações de Lagrange e de Laplace.

(Adaptado de: VARGAS, 1996)

### Seria então possível matematizar os fenômenos naturais relacionados com a eletricidade e o magnetismo?

Estendendo a idéia de campos de força à gravitação terrestre e às forças de atração e repulsão em torno de uma carga elétrica, Coulomb utiliza a balança de Cavendish, inventada para medir as forças de gravitação, para medir também as forças entre cargas elétricas. Assim, chega à famosa lei de Coulomb sobre essas forças, que é análoga a lei de Newton para as forças gravitacionais. Dessa forma, definiu-se a existência de um campo de forças eletrostático semelhante ao campo de gravidade. Mais tarde, o próprio Coulomb demonstrou que também o campo magnético era sujeito a lei semelhante. Com tal analogia, as leis da mecânica analítica vieram a ser aplicadas também às questões de eletrostática e de magnetismo. (Adaptado de: VARGAS, 1996)

**Então, estaria tudo resolvido? Não fosse um fato inusitado...**

A relação entre eletricidade e magnetismo, evidenciada na experiência de Orsted, contrariava fortemente a idéia de forças aos pares. Mais que isso, os resultados experimentais, apresentavam uma simetria inesperada: o efeito magnético da corrente elétrica aparecia com um movimento circular em torno desta. Ou seja, Orsted observou que a força sobre a agulha magnética deslocava-a na direção transversal da corrente.

### Por que isso causava espanto?

Voltemos à “Lei da gravitação universal” de Newton e à “Lei de Coulomb”: nessas leis tanto a força gravitacional como a força elétrica aparecem aos pares, conhecidos como ação e reação, e na linha que une as massas  $m_1$  e  $m_2$ , no caso da gravidade, e das cargas  $q_1$  e  $q_2$ , no caso da eletricidade. A interpretação de Orsted exigia que fosse revisada a visão newtoniana da natureza.

Os cientistas estabelecem modelos para entender os diversos fenômenos físicos que os cercam. Esses modelos é o que eles acham que é um determinado fenômeno físico da natureza, mas não é a natureza propriamente dita. Além disso, os modelos não são definitivos, uma vez que a construção do conhecimento científico não é apenas por acréscimos constantes, pois, muitas vezes, a evolução ocorre muito mais por problemas que o modelo não dá conta de explicar.

Logo, precisamos ter clareza que um modelo não é necessariamente a última versão, é apenas a que conhecemos. A história continua!

A exigência da objetividade científica torna inevitável que todo enunciado científico permaneça provisório para sempre. Ele, com efeito, pode ser corroborado, mas toda corroboração é relativa a outros enunciados que, novamente, são provisórios. (Popper, A lógica da pesquisa científica, in Marilena Chaui (org.). citado por Aranha e Martins. p. 165.)

Dessa forma, não podemos considerar nenhum modelo como absolutamente verdadeiro, como se fosse um dogma, mas refletir continuamente sobre a sua validade, as considerações feitas pelos cientistas ao elaborá-lo. Os acontecimentos que estavam por vir, no final do século XIX, levaram os físicos a fazer uma nova revolução, científica e filosófica, visto que uma não se separa da outra.

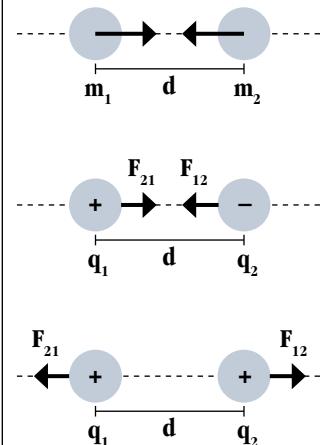
Conforme nos ensina RUSSELL (2001), o que interessa para a reflexão filosófica não são as verdades científicas, mas os problemas suscitados pela ciência, visto que esses ampliam nossa capacidade de compreensão dos diversos fenômenos que nos cercam, diminuindo nossa arrogância a respeito deles.

A expressão matemática que permite calcular o módulo da força de atração gravitacional entre dois corpos de massas  $m_1$  e  $m_2$  separados por uma distância  $d_{1,2}$  é dada pela Lei da Gravitação Universal:

$$F_{1,2} = F_{2,1} = G \cdot \frac{(m_1 \cdot m_2)}{d_{1,2}^2}$$

Da mesma forma, para calcular o módulo da força de atração ou repulsão entre duas cargas  $q_1$  e  $q_2$  separadas por uma distância  $d_{1,2}$ , a expressão matemática dada pela Lei de Coulomb é:

$$F_{1,2} = F_{2,1} = K \cdot \frac{(q_1 \cdot q_2)}{(d_{1,2})^2}$$



Foi a reflexão acerca dos modelos científicos que permitiu o surgimento da mecânica quântica, a qual levou à formulação do “Princípio da Incerteza” de Heisemberg e à “Dualidade onda-partícula” de de Broglie.

Foram as evidências experimentais que levaram alguns cientistas a proporem novas hipóteses para o que se observava. Assim, Davy não adotou a idéia de Orsted, mas sim de atração e repulsão na direção do fio. Já Wollaston supôs a rotação em torno do fio.

Nessa mesma época, Michael Faraday (1791-1867) tem contato com o Eletromagnetismo, trabalhando como assistente no laboratório de Davy. Faraday trouxe muitas contribuições para a Eletricidade e o Magnetismo, particularmente a respeito do conceito de campo (Ver o capítulo 12: Geração mais Transformação igual a Conservação de Energia).

Assim como Davy, Faraday também não aceitava a idéia de um efeito magnético circular ao redor do fio, mas a de atração e repulsão.

O estudo das correntes elétricas exigiu diferente enfoque da visão newtoniana da natureza. Orsted, em 1920, descobriu que uma corrente elétrica exercia força sobre uma agulha magnética, curiosamente, não deslocando-a na direção da corrente, mas transversalmente. Mostrou que essa correlação era devida ao aparecimento, em torno do fio, de um campo eletromagnético. Mas foi Ampère quem analisou matematicamente a correlação entre corrente elétrica, campo magnético e movimento, publicando suas deduções em 1826.

Às investigações de Ampère seguiram-se pesquisas e análises que paulatinamente vieram explicar os fenômenos eletromagnéticos. Restava esclarecer definitivamente a natureza e as propriedades dos campos magnéticos formados em torno dos condutores elétricos. Isso foi feito por Michael Faraday, que começou a trabalhar em eletromagnetismo, em 1821, e publicou os resultados de suas pesquisas em memórias nos *Transactions of the Royal Society*, entre 1831 e 1855. (Adaptado de: VARGAS, 1996)

As pesquisas realizadas por Faraday entre 1821 e 1823 foram baseadas na idéia de atração e repulsão, isto é, um fio conduzindo uma corrente elétrica exerceria uma atração ou repulsão sobre os pólos magnéticos da agulha magnética. Esses experimentos convenceram Faraday de que “ao invés de sofrer atração e repulsão, o polo magnético da agulha tendia a girar em torno do fio condutor” (DIAS, 2004, p. 24).



## ATIVIDADE

Para realizar essa atividade, você precisará de dois imãs, um pouco de limalha de ferro e uma folha de papel sulfite.

1. Coloque um pouco da limalha sobre o papel sulfite. Coloque esse conjunto sobre um imã. Repita a experiência invertendo o imã de lado. Em cada situação, observe e anote o que aconteceu.
2. Repita a experiência, agora utilize os dois imãs, coloque-os um pouco afastados.

Compare os dois experimentos. Qual a sua conclusão. Elabore um desenho mostrando cada situação. Discuta com seus colegas e professor.

Você deve ter observado na realização da experiência que as limalhas de ferro parecem orientar-se segundo algumas linhas (direções) preferenciais. Na Física, chamamos essas linhas de “linhas de força de fluxo magnético”.

As partículas de limalha orientam-se segundo as linhas de força mostrando como elas se dispõem. Quando um condutor se move, cortando essas linhas de fluxo, gera uma força eletro-motriz, a qual, por sua vez, gera uma corrente elétrica.

Da mesma forma, quando um fluxo magnético varia, induz uma força eletro-motriz em condutores fixos que delimitam superfícies cortadas pelo fluxo. Assim, Faraday explicou experimentalmente todos os fenômenos eletró-magnéticos-dinâmicos.

Mas a matematização dos fenômenos elétricos e magnéticos só foi feita por James Clerk Maxwell, a partir de suas memórias sobre as linhas de força de Faraday, lidas quando fellow do Trinity College de Cambridge, entre dezembro de 1855 e fevereiro de 1856. (VARGAS, 1996, p. 11)

## As quatro equações de Maxwell

Avançando “um pouquinho”, chegamos a James Clerk Maxwell (1831-1879), que logo após ter se formado em Cambridge, em 1854, começa sua pesquisa, influenciado pelos trabalhos de Faraday sobre linhas de força e de Thomson, sobre as equações da eletrostática e as equações para o fluxo de calor. Maxwell publicou seu primeiro artigo sobre Eletromagnetismo em 1855.

Na segunda etapa de sua pesquisa, Maxwell fez distinção entre as seguintes grandezas: “Quantidade” e “Intensidade”, as quais depois chamou de “Fluxos” e “Forças”. Dessa forma, ele chegou a um conjunto de equações que podiam representar a ação magnética, a indução eletromagnética e as forças entre correntes fechadas. Esse conjunto foi denominado de função eletrotônica.



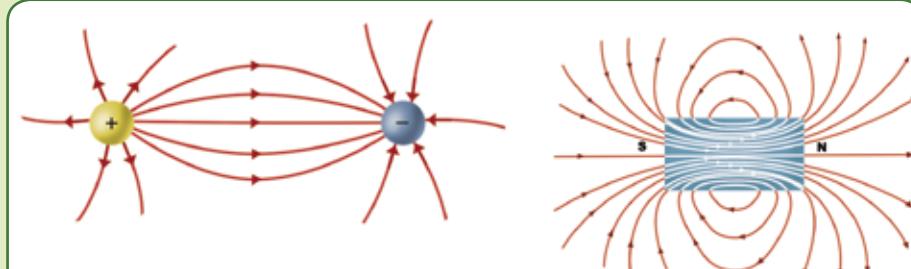
■ James Clerk Maxwell (1831-1879). Sistematizou o que se conhecia até então a respeito de eletricidade e magnetismo em quatro equações, chamadas equações de Maxwell. Fonte: <http://en.wikipedia.org>

Veja o significado das equações escritas por Maxwell, que por vezes são chamadas de “leis de Maxwell”.

1. A primeira equação de Maxwell é a Lei de Gauss. Ela diz que as linhas de campo elétrico DIVERGEM das cargas positivas e CONVERGEM para as negativas.
2. A segunda equação é a Lei de Faraday: há linhas de campo elétricas CIRCULANDO em torno de campos magnéticos variáveis, ou seja, a variação do campo magnético induz campo elétrico.
3. A terceira equação diz que campos magnéticos nunca divergem ou convergem. Eles sempre constituem linhas fechadas.
4. Finalmente, a quarta equação diz que há linhas de campo magnético circulando em torno de correntes elétricas...

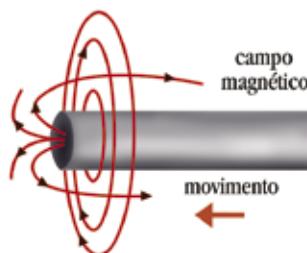
Só que Maxwell teve uma inspiração notável...percebeu que a quarta lei ainda estava incompleta.

(GONICK; HUFFMAN, p. 190, 1994).



■ Representação da primeira equação de Maxwell:  
A Lei de Gauss é também a Lei de Coulomb.

■ Representação da terceira equação de Maxwell dentro e fora de um imã. Observe que as linhas nunca se fecham.



■ Representação da segunda equação de Maxwell.



■ Representação da quarta equação de Maxwell.

Fig. 1. Representação das Leis de Maxwell através de linhas de campo. Essa idéia de representação por linhas foi introduzida por Michael Faraday, juntamente com o conceito de campo. (Adaptado de: GONICK; HUFFMAN, 1994)



## PESQUISA

Bem, o que dá para dizer é que foi algo genial, foi só percepção, sem evidências experimentais, e mais, essa descoberta permeia o conteúdo deste folhas. Agora você é que precisa ser genial para pesquisar e ENTENDER o complemento (termo extra) da quarta equação de Maxwell! Boa pesquisa...

A essa altura você já sabe o que significa esse termo da quarta equação, não é? Essa elaboração teórica de Maxwell foi muito importante para um novo campo de estudo da Física que se iniciava: o electromagnetismo. Vejamos:

Imagine uma carga elétrica solitária sendo VIBRADA: no espaço, à volta dela está havendo mudança em campo elétrico, induzindo, portanto, um campo magnético que circula à volta. Mas o campo magnético também varia: portanto, induz mais campo elétrico, que por sua vez...ETC.! O resultado é uma ONDA de campos que emerge de uma carga vibrante, e com a velocidade da luz, de acordo com os cálculos de Maxwell! (GONICK; HUFFMAN, p. 193, 1994).

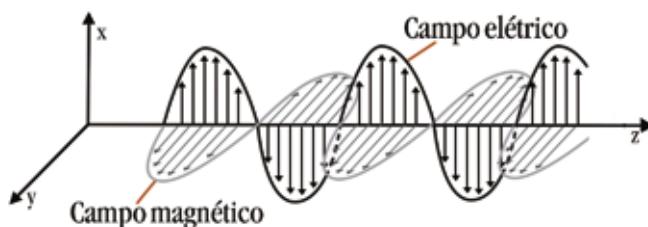


Fig. 2: acoplamento de um campo elétrico com um campo magnético. Ou seja, dois campos fisicamente ligados produzem um único conjunto denominado campo eletromagnético.

Maxwell mostrou teoricamente a presença de campos elétricos e magnéticos, os quais deslocam-se como ondas (apresentam as propriedades de reflexão e refração de ondas) e por vezes acoplados. Essas ondas são campos variáveis que se deslocam: o campo magnético se modifica no espaço, o campo elétrico no tempo e vice-versa, permitindo a sua transferência através do espaço.

Essas ondas, previstas por Maxwell, foram chamadas de Ondas Eletromagnéticas. Ele concluiu que essas ondas são transversais e movimentam-se com a velocidade da luz, a qual já era conhecida nessa época.

**Se as ondas eletromagnéticas propagam-se com a velocidade da luz, então podemos deduzir que a luz também é uma onda eletromagnética!**

De fato, a partir dos trabalhos de Maxwell, fica evidenciada a natureza eletromagnética da luz. Esses trabalhos unificaram as idéias de Eletricidade e Magnetismo, que até então eram estudados separadamente, juntamente com a Óptica. Os três campos de estudos, passaram a fazer parte de um mesmo grupo: os fenômenos eletromagnéticos.

Os trabalhos de Maxwell obtiveram evidências experimentais com as experiências realizadas por Heinrich Hertz, em 1885.

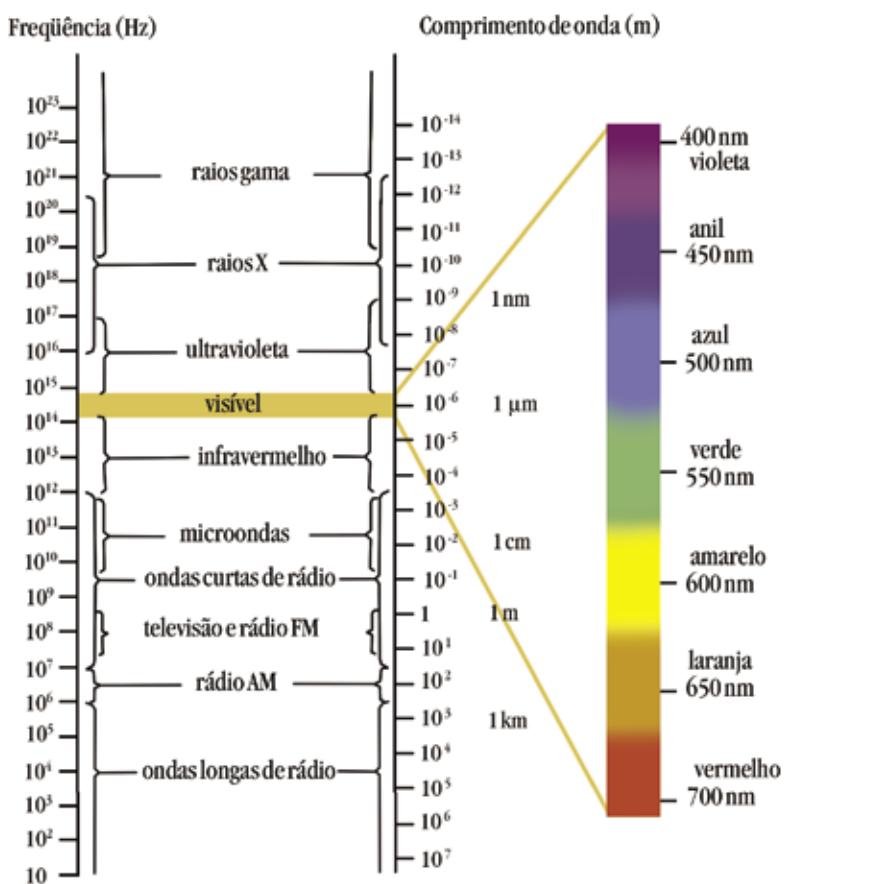
Hertz realizou experiências sobre a propagação das ondas eletromagnéticas utilizando como transmissor pontas metálicas pelas quais saltavam faíscas elétricas e, como receptor, espiras metálicas. Em suas experiências, demonstrou que tais ondas refletiam-se contra placas metálicas. Apesar de ter tentado medir a velocidade de propagação dessas ondas, só mais tarde outros pesquisadores verificaram que essa velocidade era exatamente igual a da luz. A diferença estava no comprimento de onda de luz, frações de milímetro, enquanto que as ondas hertzianas tinham comprimentos medidos de centímetros até centenas de metros.

Ficou assim demonstrado que um campo elétrico, mesmo formado no espaço vazio, variável com o tempo, formaria correntes de deslocamento que produziriam, em torno de si, campos magnéticos que também se deslocariam no espaço. Assim, formar-se-iam ondas eletromagnéticas que se propagariam no espaço com a velocidade da luz.

Nessa época foram descobertos os raios infravermelhos, os ultravioletas e os raios X. Todas essas radiações mostraram reflexão e difração, como a luz; portanto, seriam todas elas ondas eletromagnéticas que obedeciam às equações de Maxwell e foi também demonstrado que o calor era transmitido como irradiação hertziana. Dessa forma, matematizava-se o vasto domínio das irradiações de energia, deixando o caminho pronto para que, em 1900, Max Planck pudesse explicar o comportamento da energia irradiada pelos chamados corpos negros, dando início ao que hoje chamamos de mecânica quântica.

Maxwell não utilizou modelos mecânicos para explicar suas teorias, reforçando a idéia de que a formulação matemática era a única maneira de, pelo menos, vislumbrar a natureza daquela “coisa que se conserva (a energia)”. Nesse sentido, Hertz também deixou de lado qualquer modelo mecânico para insistir que só as equações de Maxwell poderiam encerrar todo o conhecimento possível sobre a natureza das ondas hertzianas.

As conclusões finais da física clássica mostravam que a natureza da energia seria essencialmente formal, ou seja, sua realidade estaria mais nas expressões matemáticas do que nos seus efeitos sensíveis. Não que a coisa matemática fosse “a coisa em si, que se transforma”, mas permitia entrevê-la. Com a descoberta dos quanta, essa concepção de energia não se modifica; pelo contrário, veio a mostrar que a natureza corpuscular da energia estava mais próxima da (natureza) dos números do que da (natureza) das substâncias. (Adaptado de VARGAS, 1996).



■ Fig. 3: O espectro eletromagnético. Uma onda possui comprimento de onda e freqüência, par de grandezas que a caracteriza como uma onda em particular. No caso da luz visível esse par de grandezas determina a cor. A energia da onda é dada pela equação matemática  $E = h \cdot f$ , onde  $h$  é a constante de Planck e  $f$  é a freqüência da onda eletromagnética.

## ■ Um jeito fácil de entender a onda eletromagnética: a transferência de informação

Existem campos elétricos e magnéticos gerados em uma mesma região pela existência de uma carga elétrica. É o caso das antenas, cuja estrutura possibilita que os elétrons se movimentem livremente, excitados por tensão ou corrente elétrica, gerando campos eletromagnéticos nos seus arredores.

Vamos nos remeter mais uma vez ao Folhas sobre carga elétrica, onde aparece a idéia de que materiais atritados ficam eletrizados e atuam em outros materiais próximos sem encostar nestes. O que acontece nessa situação é a “ação à distância”, em outras palavras, “atua de longe”.

A antena tem por objetivo maximizar esse alcance dessa ação à distância. Assim, quanto mais longe puder gerar efeito, maior é a influência, ou seja, a área de cobertura da antena fica melhorada.

**A possibilidade de transferir informações nos permite ouvir um rádio, equipamento receptor de informações. Você sabe como isso acontece?**

O sistema pelo qual transmitimos o som do rádio é razoavelmente complexo. Desde o microfone da estação até o alto-falante do aparelho receptor, o som passa por várias fases e sofre diversas transformações. Para termos uma idéia, indicamos a seguir as principais etapas envolvidas:

- produção de som pela voz humana, música etc.;
- as ondas sonoras, que são variações da pressão do ar que atingem o microfone;
- no microfone o som é convertido em corrente elétrica alternada de baixa freqüência;
- esta corrente elétrica de baixa freqüência causa alterações na corrente de alta freqüência, produzida na estação. É através da alta freqüência desta corrente que identificamos as estações transmissoras no visor do aparelho; desta forma, a corrente elétrica que representa o som transformado e a corrente elétrica produzida na estação são “combinadas” de forma que esta última funciona como se fosse o veículo transportador do som;
- esta “nova” corrente elétrica se estabelece na antena da estação transmissora e através do espaço a informação se propaga em todas as direções;
- a antena do aparelho de rádio colocada nesse espaço captará essa informação;
- se o aparelho estiver sintonizado na freqüência da corrente produzida pela estação, o som poderá ser ouvido pelo alto-falante.

(GREF, 1993, p. 236)



## PESQUISA

Agora que você já sabe como se dá o processo de transmissão de informações no rádio, que tal fazer a mesma coisa para a televisão, observando, inclusive como se dá o processo de formação de imagens na TV.

Você sabia que muitos conceitos físicos contribuíram (e contribuem) para criar caminhos na compreensão dos processos que acontecem nos seres vivos, por exemplo, a função e estrutura de moléculas que estão presentes nestes. Novas técnicas, que aparecem baseadas no maior conhecimento de partículas subatômicas, colaboraram enormemente para o avanço dessa nova área de estudo, a Biofísica.

Citamos, aqui, a Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE), técnica apresentada por Zavojski, em 1945. Esta tem colaborado para o estudo da mioglobina e da hemoglobina. Como acontece?

Dentro do magnetismo, as substâncias são classificadas como ferromagnéticas, diamagnéticas e paramagnéticas. Nesse último grupo, enquadram-se muitas moléculas biológicas, entre elas a hemoglobina, responsável pelo transporte de oxigênio no sangue. Essas moléculas possuem átomos de ferro e, por esse motivo, quando submetidas a campos magnéticos, magnetizam-se. Como exemplo, uma amostra de

hemoglobina é submetida a um campo magnético, onde são emitidas microondas com freqüências controladas, no momento em que as moléculas da amostra entram em ressonância com a freqüência emitida, essa freqüência é medida e assim é possível obter informações sobre as ligações moleculares.



## PESQUISA

Que tal buscar em livros, revistas e até mesmo na Internet o que devemos considerar para que uma substância seja classificada como ferromagnética, diamagnética ou paramagnética. Isso será muito importante para o entendimento do comportamento biomagnético dos animais.

Paralelamente, realize a seguinte experiência: pegue um pedaço de ferro e passe sobre ele um imã várias vezes e no mesmo sentido. Em seguida aproxime o ferro de alguns metais.

Que conclusões, a partir de sua pesquisa, você pode tirar dessa experiência? Escreva um texto e apresente-o para discussão com seu professor e colegas.

E que tal essa: campos magnéticos contribuindo na “vidinha” de formigas e abelhas!

## Biomagnetismo: orientação magnética

Embora o magnetismo seja conhecido desde a antigüidade, e a Terra considerada como um “grande imã” (dipolo magnético), a ação magnética deste campo nos seres vivos começou a ser estudada recentemente.

No século 18, o médico vienense Franz Anton Mesmer (1734-1815) lançou a teoria de que todos os seres vivos seriam constituídos por um ‘fluído magnético’, o que permitia que fossem influenciados por campos magnéticos. Com base nessas idéias, ele acreditou que poderia ‘curar’ doenças através do contato do corpo com imãs e outros objetos imantados, e daí passou à prática. (ARAÚJO, B. D., et al, p.24, 1999)

Nessa época, Franz Anton Mesmer não poderia imaginar que seres vivos geram campos magnéticos.

Esse campo de pesquisa é atualmente dividido em dois: magnetobiologia (estuda os efeitos produzidos por campos magnéticos nos organismos) e Biomagnetismo (pretende fazer a medição dos campos gerados por seres vivos).

Desde microorganismos até abelhas, formigas, peixes e pássaros, entre outros seres vivos, respondem a campos magnéticos.

Nesses animais já foram encontradas partículas magnéticas produzidas pelo próprio organismo. Essas partículas são muito pequenas e, na maioria das vezes, constituídas de óxido de ferro fortemente magnetizado.

Nos organismos unicelulares, essas partículas se encontram no citoplasma (meio entre o núcleo e a membrana celular, constituído na sua maioria de água e proteínas), produzindo um momento magnético para orientá-los de acordo com as linhas de força do campo magnético terrestre. Entretanto, nos animais que tem organismos mais complexos, com células especializadas, esse processo é chamado de magnetorecepção, envolvendo células nervosas, o que até hoje não está bem compreendido, existindo hipóteses isoladas, ou ainda, específicas para determinados animais.

Agora, vamos nos preocupar em especial com os insetos sociais, como as abelhas e formigas (himenópteros) e os cupins (isópteros), que vivem em comunidades organizadas.

Dentre as abelhas, a espécie mais estudada tem sido a *Apis mellifera*, por sua agressividade e produtividade. No abdômen destas, encontram-se dois tamanhos de magnetita, o que tem levado a compreensão da misteriosa dança das abelhas (os primeiros estudos sobre esse comportamento foram realizados por Karl von Frisch, o que lhe garantiu o prêmio Nobel em 1973), realizada quando voltam à colméia para avisar sobre ao alimento encontrado.

Devido ao clima tropical e as florestas, existem muitas e muitas espécies de formigas em nosso país. Estudos vêm mostrando o efeito de campos magnéticos no comportamento das formigas. Atualmente as pesquisas indicam dois possíveis tipos dessa influência: efeito magneto-cinéticos e o magneto-dinâmicos.

Sobre o efeito magneto-cinético, existem estudos realizados por Kermarrec (1981), com a espécie *Acromyrmex octospinosus*. Esses estudos demonstraram sensibilidade das formigas a campos magnestáticos. Já em 1993, Anderson e Vander Meer observaram a espécie *Solenopsis invicta*, conhecida como “lava pés”, e perceberam diferenças no tempo da formação da trilha para buscar alimentos, devido a variação do sentido de campos magnéticos. O mesmo foi analisado por Klotz (1887), mas não confirmou o experimento.

Para o efeito magneto-dinâmico, encontram-se estudos realizados em 1986 e 1998, com a espécie *Aecophylla smaragdina*. Os estudos mostraram que a influência do campo magnético não é predominante, mas sim outros estímulos, como luz e feromônios (característicos de cada sociedade). Contudo, na ausência desses estímulos, o campo magnético é utilizado para orientação.

E aí...ainda tem mais! Seres humanos também produzem campos magnéticos, são pequenos, na escala de nanotesla (tesla (T), unidade de campo magnético). Esses campos biomagnéticos se dão a partir da corrente elétrica que percorre algumas células. Essas correntes, produzidas por variações na permeabilidade da membrana. Os campos ainda podem surgir a partir de alguns órgãos, (como, por exemplo, o fígado), que acumulam material magnético.

O estudo dos campos eletromagnéticos ganhou, através das leis de Maxwell, uma estrutura teórica bastante consistente, obtendo inclusive, o status de leis fundamentais. Contudo, mesmo tendo esse status, essas leis não respondem a todas as perguntas referentes ao conceito de campo.

Temas ligados à interpretação e aplicações dessas leis têm acarretado o desenvolvimento de trabalhos na área de Eletrodinâmica Quântica e Cromodinâmica Quântica. Nessas teorias, que fazem parte do que hoje costuma-se chamar teoria de campo, o campo parece ganhar características materiais.

### PARA PENSAR

Como nós, seres humanos, convivemos com essa poluição eletromagnética? Pois, cada vez mais estamos expostos a campos eletromagnéticos devido à tecnologia.



## ATIVIDADE

Uma das mensagens dessas teorias é que o campo pode ser constituído de partículas, uma espécie de “alma material”.

Busque, no texto, a evolução da idéia de campo, até chegar nessa afirmação.

E aí? Você se convenceu de que está rodeado de ondas e campos?

## Referências

ARANHA, M. L. A.; MARTINS M. H. P. **Filosofando** – Introdução à Filosofia. 2 ed. São Paulo: Moderna, 1993.

ARAÚJO, D. B.; CARNEIRO, A. A. O.; MORAES, E. R., BAFFA, O. Biomagnetismo: **Nova Interface entre a Física e a Biologia**. In: Ciência Hoje, SBPC; vol. 26, nº: 153, p. 24-33, 1999.

DIAS V. S. **Michael Faraday**: subsídios para metodologia de trabalho experimental. São Paulo, 2004. Dissertação de mestrado.

GARDELLI, D. **Concepções de Interação Física**: subsídios para uma abordagem Histórica do Assunto no Ensino Médio. São Paulo, 2004. Dissertação de Mestrado. USP

- GONICK, L.; HUFFMAN, A. **Introdução ilustrada à Física**. São Paulo: Editora Harbra Ltda, 1994
- GREF. **Eletromagnetismo**. 4<sup>a</sup> ed. São Paulo: Edusp, 1993.
- RUSSELL, Bertrand. **O valor da filosofia**. Tradução António Sérgio. Coimbra: Almedina, 2001. p. 151.
- VARGAS, Milton. **História da matematização da natureza**. Estud. Av. sept/dec. 1996, vol. 10, n.º 28 (06 de julho de 2006), p. 249-276. <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40141996000300011&lng=em&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141996000300011&lng=em&nrm=iso)> ISSN 0103-4014.

## Obras Consultadas

- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.: KRANE, K. S. **Física** Vol III. 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2004.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert e KRANE, Kenneth S. **Física** Vol IV. 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro– RJ: Ed. LTC, 2004.
- JACKSON, J. D. **Eletrodinâmica Clássica** 2<sup>a</sup> ed. Trad. Annita Macedo e Horácio Macedo. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1983.
- RESNICK, R.; ROBERT, R. **Física Quântica**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1978.
- ROCHA, J. F. (org.): **Origens e Evolução das Idéias da Física**. Salvador, EDUFBA, 2002.
- RUSSEL, J. B. **Química Geral**. 2.ed. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1994.



## ANOTAÇÕES

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Foto: Ezequiel Burkarter



<http://www.thomashawk.com>



Foto: Ezequiel Burkarter



Foto: Ezequiel Burkarter



# A NATUREZA DA LUZ E SUAS PROPRIEDADES

■ Otto Henrique Martins da Silva<sup>1</sup>



**F**incontrava-me assistindo a um belo filme - Caçadores de Mentes - quando num dado momento, após a morte de mais um integrante do grupo de personagens, todos os demais ficaram atordoados e pavorosos e, não bastando isso, apareceu uma seqüência de vários números escritos com o sangue da vítima numa grande parede de vidro.

O grupo estava perplexo. Uma grande interrogação e um enigma se estabeleceram no ambiente. Eram nove permutações, onde apresentamos, aqui, aquelas que apareceram no filme: 582997924, 829979245, 9245829979, 52929979248, 792458279.

Ainda sem entender o que estava acontecendo, todos indagavam:

– O que representa esta seqüência de números?

Sara, uma das integrantes, sugeriu que o enigma poderia estar relacionado com o tempo, pois o assassino fez tudo cronometrado; outros disseram, de acordo com as hipóteses levantadas, que poderia ser alguma coisa como uma taxa, um quociente... absurdo!

**Será que as propriedades da luz podem nos ajudar a resolver esse enigma? Vamos investigar?**

## As primeiras concepções

O que é a luz? Será uma partícula material, como, por exemplo, uma bola de sinuca? Será uma onda movimentando-se em um meio, semelhante a uma onda do mar que se movimenta na água? Ou seria, como pensavam os filósofos gregos, uma manifestação visível do fogo?

*“Fiat lux; et lux facta est (...)”* (BÍBLIA, A. T. Gêneses, 1:3)

“Faça-se a luz; e foi feita a luz”.

A luz talvez seja o fenômeno físico mais remoto do cosmo e, portanto, da humanidade. As questões relacionadas à sua origem e natureza têm sido causa de muitas reflexões. Presente de forma cotidiana na Terra, a sua existência está associada, de certa forma, à existência de todas as coisas do Universo, ou seja, os cometas, os planetas, as estrelas, as galáxias, etc.



Fig. 1. O fogo: um dos quatro elementos de Empédocles, do qual a luz faria parte. Foto: Ezequiel Burkarter.

Na civilização ocidental, os gregos já afirmavam ser a matéria constituída por partículas e concebiam a luz como parte de um dos quatro elementos (terra, água, ar e fogo). A luz, ao lado do calor, seria uma manifestação do fogo. Esta concepção foi dada por Empédocles por volta do século V a.C. e foi admitida até o século XIII.

Para a escola pitagórica, a luz tem origem no olho, de onde sai e atinge os objetos, regressando ao olho e dando, portanto, a visão. Platão (séc. IV a.C.), no entanto, propôs uma concepção intermediária, onde os raios eram emitidos, tanto do olho quanto dos objetos luminosos, e a sensação da visão era atribuída ao encontro dos raios.

Um dos defensores desta teoria foi Euclides, cuja obra *A óptica* e a *Catadióptica*, considerada a mais antiga sobre esse assunto, ele trata da propagação retilínea da luz, da existência do ‘raio visual’ e da igualdade dos ângulos de incidência e de reflexão em espelhos planos. (ROSMORDUC, 2003, p. 53)



Uma concepção contrária à destes filósofos foi desenvolvida por Aristóteles (séc. IV a. C.). Tal teoria defende que “O objeto luminoso vibra, colocando assim em vibração um meio indefinido, que o filósofo chama de ‘diáfano’, o qual, por sua vez, provoca o movimento de ‘humores’ que entram na composição do olho”, segundo a tradução da Vulgata Latina pelo padre Antônio Pereira de Figueiredo.

Mas o que tudo isso tem a ver com o enigma das seqüências numéricas que aparecem no filme? Você já descobriu? Não? Então, continue a leitura!



## PESQUISA

Nos ‘anais’ da História da Ciência estão registrados, por mais de 400 anos, uma disputa que, em alguns momentos, adquiria uma conotação mais política do que científica a respeito da luz. Então, que tal uma pesquisa que busque descrever as teorias ondulatória e corpuscular, apontando as características de cada uma. Relate as semelhanças e as diferenças entre essas duas teorias e as primeiras concepções a respeito da natureza da luz

Uma dica: Neste livro, o texto “Dualidade onda partícula da luz” pode auxiliá-lo na pesquisa.

### Sua pesquisa ajudou a decifrar o enigma do filme? Já sabe o que significa a seqüência numérica?

Se a sua pesquisa ainda não foi o suficiente para decifrar o enigma, que tal desenvolver o seu potencial artístico e montar uma peça de teatro utilizando a vida de homens que, como você, são feitos de carne e osso, e que contribuiriam para construir a história da ciência desenvolvida até aqui. Afinal de contas, a ciência, assim como a história da humanidade, também é construída por seres humanos.

## A luz no teatro

A iluminação na apresentação de uma peça teatral é parte integrante do contexto. O uso da luz no teatro é anterior à invenção da lâmpada elétrica por Thomas Edison, em 1880, pois se utilizavam candelabros ou lâmpadas distribuídos pelo auditório. O uso das alterações da intensidade luminosa no palco foi introduzido por Leone di Somi, no século XVI.

Atualmente, as funções da iluminação numa apresentação teatral agregam signos que podem constituir uma dada realidade ou contexto de uma situação real. Portanto, a iluminação pode expressar:

- O tempo e espaço – quando, por exemplo, proporcionamos uma luz com características de um amanhecer ou um pôr do sol;

- O clima – quando o ambiente está iluminado com cores quentes e brilhantes (amarelo, âmbar e rosa) para uma peça alegre e leve;
- O estilo – numa peça realista, a iluminação simulará o efeito de fontes comuns: abajures, luz solar externa, etc.;
- O ritmo – a luz deverá alternar-se em tempos contínuos ou constantes, estabelecendo um dado ritmo.

A luz no palco precisa de cuidados especiais, designando-se para isto, um iluminador. A este cabe observar os momentos importantes da peça em que todos os significados da luz devem estar presentes, uma vez que esses significados integram o contexto. O fundamental é seguir as necessidades dos atores e do contexto das situações, fornecendo a luz necessária na medida certa.

Para explorar melhor as possibilidades do uso da iluminação no teatro, se possível, visite o sítio: [www.iar.unicamp.br/lab/luz/dicas.htm](http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/dicas.htm). Esta página traz informações sobre equipamentos para a iluminação teatral, iluminação em estúdios e os efeitos produzidos. No link “dicas”, você pode acessar endereços eletrônicos com mais informações sobre iluminação teatral. Também, encontrar instruções técnicas sobre como proporcionar a melhor iluminação para as cenas, textos e alguns resultados obtidos na mistura de algumas cores-luz sobre cores-pigmento de forma on-line. É muito interessante.

Vamos a peça! Converse com o seu professor de Física e de Arte para que um deles possa coordenar esta atividade. Esse professor coordenador deverá solicitar a participação dos que tenham interesse em se dedicar à peça e ter disponibilidade para os ensaios. É importante eleger um diretor para a peça que possa ficar coordenando os trabalhos durante a apresentação.

Sugerimos uma peça teatral que reúne três dos principais personagens da história da Física numa discussão teórica que busca compreender a natureza da luz. São eles: Isaac Newton, Christian Huygens e Albert Einstein.

Essa dramatização permite que você compreenda o embate histórico das duas concepções acerca da natureza da luz, segundo os seus autores e suas convicções, ao trazer para o presente nomes que aparentemente estão distantes no espaço e tempo. E você, seus colegas e convidados poderão discutir o caráter dual da luz proposto por Einstein, Planck e outros que resultou na concepção onda-partícula da luz ou teoria quântica da luz.

A peça possui três personagens que entrarão em cena conforme a seqüência do texto. O ambiente poderá ser um auditório ou uma sala bem iluminada e com a possibilidade de se apagar as luzes ou manter pouca luminosidade, com tomadas para a utilização do data-show e/ou retroprojetor e também para o uso de um feixe de luz.

O material necessário para a montagem da peça, além do auditório ou sala de aula, é: uma fonte que produza um feixe de luz – comum



■ Christian Huygens (1629-1695) Defendia a teoria da luz como onda, ao contrário da teoria de Newton, a qual defendia que a luz era formada por partículas. Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

nos kits de óptica (caso não disponha de um desses kits, pode ser utilizado uma lâmpada comum); um CD usado; um projetor de slides, data-show ou retro-projetor; slides ou lâminas com as respectivas figuras, como aparecem no texto.

Agora é com você. Leia o texto teatral (gentilmente cedido pelos seus autores, José E. Moreira e Betânia Montenegro, da Seara da Ciência) e mãos à obra.

## A NATUREZA DA LUZ

José E. Moreira e Betânia Montenegro

Seara da Ciência – UFC. <http://www.seara.ufc.br>

**NEWTON** (entra em cena) – Preciso definir melhor alguns segredinhos acerca da natureza da... (TAM, TAM, TAM acendem-se as luzes da sala – o significado da expressão “TAM, TAM, TAM”, fica a cargo de quem dirigir a peça.). Afinal, do que ela é mesmo feita, essa luz que enche a sala, e ilumina todas as coisas? Mas... como estudá-la? Ah! Já sei, usarei o método científico que o Galileu desenvolveu e que eu tenho aperfeiçoado ao longo das minhas pesquisas.

Acho que, se eu concentrar a luz num feixe bem estreitinho, poderei estudá-la melhor do que assim, espalhada. (Acende-se a luz do feixe e apagam-se as luzes da sala). Pronto! É como eu pensei, agora tenho um feixe de luz (passando a mão pelo feixe de luz), prontinho para ser dissecado. (Pega um CD em algum lugar).

O que será que acontece se eu colocar este CD, esta maravilha do século XX, em frente ao feixe de luz? (coloca o CD na frente do feixe até obter o arco íris). (Grita) Uau! Que maravilha! Então a luz é multicolorida! Esse é o segredo do arco-íris...

Bem, não é um glorioso arco-íris, mas dá pro gasto, o mais importante é que descobri que posso separar a luz em várias fatias, cada fatia de uma cor, e cada cor numa posição diferente. (Aparece um slide mostrando Newton decompondo as cores do arco-íris com um prisma). Isto é realmente incrível, todas as cores do arco-íris estão misturadas num feixe de luz original! Podemos dizer que a mistura de todas as cores do arco-íris forma a cor branca, isto é, a luz branca é a soma de todas as cores. (Tira o CD e mostra o feixe branco).

Mas por que será que a luz vermelha se desvia menos que a luz violeta? E o que será que causa essa separação de cores? Mas é claro! Só pode ser isso! A luz é formada por minúsculas partículas coloridas, aí tem partículas de luz vermelha, de luz amarela, de luz azul, enfim, partículas de todas as cores. A luz é multi-colorida e feita de partículas!

Quando o feixe de luz incide sobre a superfície do CD, provoca uma separação das cores, é exatamente o que acontece com a luz ao passar por um prisma. O CD e o prisma separam as partículas mais leves das mais pesadas. (Recoloca o CD dispersando a luz).

Bem, se raciocinamos assim, as partículas da luz vermelha devem ser mais pesadas, e por isso elas se desviam menos. E se as azuis se desviam mais, é porque são mais leves! (Newton, maravilhado, olha para o teto ou para a tela onde tem um pipocar de cores, enquanto ele diz luzes, luzes, luzes...).

**HYUGENS** (Pronuncia-se ‘Róiguens’) – Oh, mas o que está acontecendo aqui?

**NEWTON** – É que eu acabo de entender uma coisa importantíssima: a luz é formada de partículas! (Aparece, na tela do data-show, o prisma desviando partículas vermelhas e azuis. Caso não disponha de um data-show, pode-se utilizar um retro-projetor).

**HUYGENS** – Hã, hã... Não é bem assim, essa sua explicação está errada.

**NEWTON** – Mas, espera um pouco, quem é você?

**HUYGENS** – Eu sou Christian Huygens, holandês de nascimento, filósofo e físico. (Na tela do data-show aparece o retrato e o nome de Christian Huygens).

**NEWTON** – (Olhando a tela): Úigens, Uígens, ou Óiguens, seja lá quem for, você está se metendo onde não é chamado!

**HUYGENS** – (Ignorando Newton) Como eu dizia, a luz é formada de ondas!

**NEWTON** – Heresia, heresia! A luz é formada de partículas! Cada cor é um tipo diferente de partícula!

**HUYGENS** – Não, cada cor é uma onda com diferente comprimento!

As ondas vermelhas são mais desviadas no prisma que as ondas azuis. (Aparece, na tela do data-show, o prisma desviando ondas vermelhas e azuis).

Isso acontece porque as ondas vermelhas andam mais rápido que as ondas azuis dentro do vidro do prisma. Se a luz fosse feita de partículas, seria o contrário: as partículas vermelhas andariam mais devagar que as partículas azuis, pois seriam mais pesadas.

**NEWTON** – Bem, isso é verdade. Mas, para sabermos quem tem razão, só há um jeito: medir a velocidade da luz no vidro e verificar quem anda mais ligeiro.

(Entra ALBERT EINSTEIN).

**EINSTEIN** – Tem razão. Basta medir. E essa medida foi feita por um francês chamado Fizeau (Fizô) e ficou comprovado que a luz vermelha anda mais ligeiro no vidro que a luz azul.

**HUYGENS** – Viu? Eu estou certo. Luz é onda! Einstein está do meu lado!

**EINSTEIN** – Devagar com o andor... Planck, (aparece na tela a foto com o nome de Max Planck) eu e outros mostramos que a luz é muito mais volúvel do que vocês podem imaginar. Na verdade, a luz é onda, mas também é partícula!

**HUYGENS e NEWTON** – Isso é impossível!

**EINSTEIN** – Pode até parecer, mas não é. Foi exatamente por essa descoberta que surgiu a teoria quântica da luz, que hoje em dia está mais que comprovada pela experiência.

Mas, essa é outra história e sugiro que fiquemos por aqui. Vamos tomar um cafezinho?

**HUYGENS e NEWTON** – (meio desconcertados) – Vamos!

**NEWTON** – Tá certo, mas me fale um pouco dessa tal teoria quântica.

(Antes de sair, Einstein bota a língua para fora). (Fim)



## DEBATE

Após o encerramento da peça, o professor coordenador, atores e equipe técnica poderão proporcionar uma discussão em conjunto com os espectadores, retomando os principais aspectos das teorias ondulatória e corpuscular, como também, a que concebe a luz como a dualidade onda-partícula. Este momento se constituirá numa oportunidade de se responder às perguntas realizadas pelos espectadores, tanto pelo professor, quanto pelos personagens: Einstein, Newton e Huygens, bem como retomar as diversas circunstâncias em que a teoria foi concebida e modificada.

## A supremacia da teoria ondulatória sobre a teoria corpuscular no século XIX

O francês Augustin-Jean Fresnel (1788-1827), através de uma das demonstrações experimentais que confirmara o caráter ondulatório da luz realizada na Academia de Ciências em Paris e uma demonstração matemática que explicava a propagação retilínea da luz, as leis de Descartes e os fenômenos de difração, o que levou a uma maior aceitação da teoria ondulatória da luz, em detrimento da teoria corpuscular de Newton.

No entanto, somente uma comprovação experimental – *experimentum crucis* – legitimaria a verdadeira teoria. Esta experiência foi realizada, em 1850, na França por Jean Bernard Leon Foucault (1819-1868) e a teoria corpuscular de Newton não resistiu à comprovação factual, nem tão pouco ao seu grande prestígio.



### ATIVIDADE

1. Pesquise e descreva qual foi o *experimentum crucis* que estabeleceu a teoria ondulatória da luz, no século XIX.

### E aí, já resolveu o enigma do filme?

Até aqui conversamos a respeito de diversas coisas relacionadas à luz. Também as pesquisas e atividades sugeridas propiciaram um maior conhecimento sobre esse ente físico, a luz. Você deve ter encontrado referência a diversos fenômenos físicos como interferência, difração e outros. Vamos estudá-los um pouco?

## A refração, a reflexão e a dispersão da luz

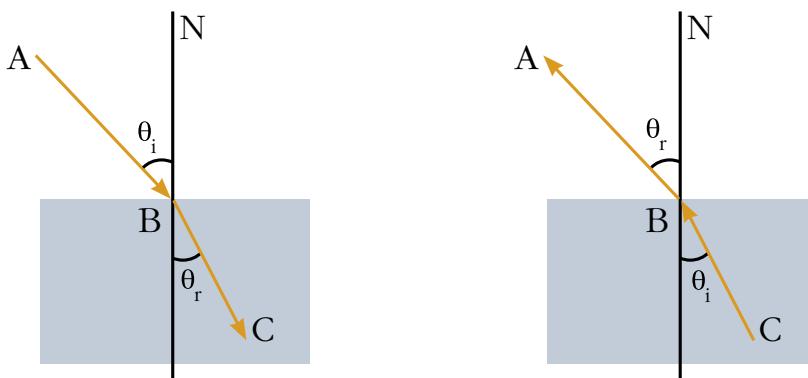
Você, provavelmente, já ouviu falar em refração. Sabia que o termo vem do latim *Refratou* que significa quebrado. Mas o que seria a refração da luz? Vamos conversar um pouco sobre isso.

A luz, ao passar pelo vidro de uma janela, sofre um desvio, mudando a sua direção. O mesmo acontece quando a luz passa do ar para o vidro ou, como se costuma dizer, troca de meio. Esse fenômeno em que a luz muda de direção ao trocar de um meio é denominado refração da luz.

Mas é importante lembrar: a luz não sofre desvio só quando passa de um meio para outro. Isso ocorre também quando a luz bate em uma superfície e volta, ela é desviada, mas voltou a se propagar no mesmo meio, isso é reflexão da luz.

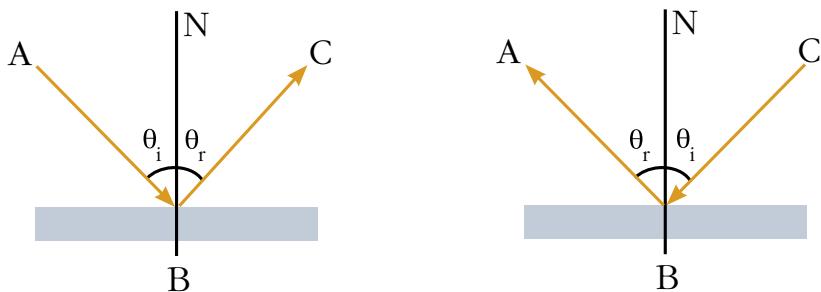
Na obra de Euclides denominada Catóptrica, o fenômeno da reflexão em espelhos planos, côncavos e convexos havia recebido um devido estudo, mas foi o físico e matemático iraquiano Abu-Ali-Al-Hasan Ibn Al Haythan (Al-Hazen) (965-1040) que formulou a Lei de Reflexão da luz, após mil anos.

Os gregos também conheciam a refração da luz. Na obra de Ptolomeu aparece alguns resultados experimentais relacionados a este fenômeno, cujos meios considerados eram: ar e água, ar e vidro e água e vidro. No entanto, René Descartes (1596-1650) foi o primeiro, a partir de seus trabalhos teóricos, a publicar a Lei da Refração, em 1637. (ROCHA et.al., 2002, p. 216)



■ Fig. 2 a: Refração da Luz ao mudar de um meio 1 para um meio 2. De acordo com a Lei de Snell-Descartes:  $n_1 \operatorname{sen} \theta_i = n_2 \operatorname{sen} \theta_r$ . A é o raio incidente e C é o raio refratado, ambos em relação a normal (N).

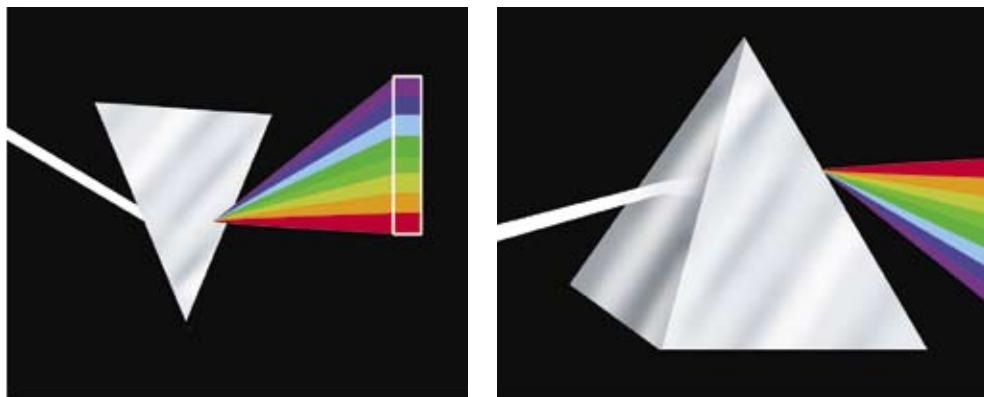
■ Fig. 2 b: Refração da Luz ao mudar de um meio 1 para um meio 2. De acordo com a Lei de Snell-Descartes:  $n_1 \operatorname{sen} \theta_i = n_2 \operatorname{sen} \theta_r$ . C é o raio incidente e A é o raio refratado, ambos em relação a normal (N).



■ Fig. 3: Reflexão da luz em uma superfície lisa. O ângulo de incidência ( $\theta_i$ ) é igual ao ângulo de reflexão ( $\theta_r$ )

Uma outra propriedade apresentada pela luz é a dispersão, a qual foi estudada por Isaac Newton. Em 1672, Isaac Newton apresentou à Royal Society um comunicado sobre a dispersão da luz, em que, ele diz:

"De acordo com a minha promessa, faço saber, sem mais cerimônias (!) que no princípio do ano de 1666, quando me ocupava a polir vidros ópticos de formas não esféricas, obtive um prisma de vidro triangular, para fazer a experiência do célebre fenômeno das cores. Para isso pus-me no meu quarto às escuras e pratiquei um pequeno orifício na porta da janela. Comecei por olhar com prazer as cores vivas e intensas assim produzidas, (...)" (NEWTON, citado por GIBERT (s/d, p. 89).



■ Fig. 4: Dispersão da luz branca do sol através de um prisma.



## ATIVIDADE

1. Observe a Fig. 4 colocada anteriormente: Você consegue perceber que relação existe entre a reflexão e refração da luz e o fenômeno da dispersão observado por Newton? E entre o texto dramatúrgico da peça indicada e esses fenômenos?
2. Pesquise as consequências que a experiência da dispersão da luz branca trouxe para a compreensão da composição da luz visível.
3. Falamos no início deste texto das concepções dos filósofos gregos a respeito da luz. Pela concepção de Aristóteles, a luz parece ser algo que necessita de um meio para se propagar. Diante disso, você percebe alguma relação entre as propriedades estudadas até aqui e a concepção aristotélica? E entre as primeiras concepções dos gregos?

Vale lembrar que os fenômenos tratados anteriormente não são específicos da luz. Por exemplo, quando uma onda do mar bate numa pedra e volta, ela sofreu reflexão. Veja o que diz o GREF:

"As ondas do mar, ao se chocarem com as pedras, sobem ou retornam. Da mesma forma, o som, ao encontrar prédios ou montanhas, retorna produzindo eco. Isto é interpretado como reflexão das ondas". (GREF, 1996, p. 209)

Esse comportamento da luz que ao incidir, bater, em uma superfície retorna, isto é, reflete, também pode ser observado em outras situações. Um bom exercício seria você observar o jogo de sinucas. Da mesma forma que a luz, a bolinha, ao bater nas paredes da mesa ou em outra bolinha também pode retornar, ou mudar a sua direção.

A bolinha de sinuca apresenta um comportamento típico de partícula. Fazendo uma analogia com a bolinha, a luz, ao refletir comporta-se como partícula.

No entanto, falamos em natureza dual da luz, isto é, a luz também pode ser vista como uma onda. Então vale uma pergunta: **que outros fenômenos a luz apresenta que revelam sua natureza ondulatória?**

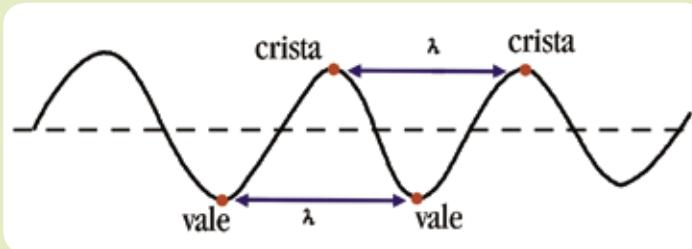
## A interferência e a difração

Os fenômenos, tipicamente ondulatórios, de interferência e difração, foram observados e pesquisados pelo físico inglês Robert Hooke e o jesuíta italiano Francesco M. Grimaldi, respectivamente.

Provavelmente você já assistiu a um show musical e deve ter percebido que o som é sentido em diferentes intensidades. **Por que isso acontece?**

A produção de uma onda está associada a uma perturbação ocorrida num certo instante. Por exemplo, quando jogamos uma pedra na água, percebemos uma movimentação circular. Quando provoca-mos um movimento de vai e vem em uma corda, também estamos produzindo uma onda.

Um processo ondulatório é caracterizado pela velocidade de propagação das ondas, a freqüência e o seu comprimento. A freqüência de uma onda depende apenas da fonte emissora, a amplitude e o comprimento da onda dependem também do meio onde esta se propaga. Vale dizer que a amplitude de uma onda depende do instante em que é observada a onda, uma vez que a sua propagação em meios materiais é acompanhada de amortecimento em consequência da transferência de energia para o meio, isto é, perda de energia. O resultado desse amortecimento é observado na diminuição da amplitude da onda.



$$f = \frac{1}{T}$$

$$v = \lambda f$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

O comprimento da onda é inversamente proporcional à freqüência.

$f$  = freqüência (Hz)

$\lambda$  = comprimento da onda (m)

$t = T$  = tempo (s)

$V$  = velocidade da onda (m/s)

Quando tivermos um conjunto de fontes, que produzem ondas de mesma freqüência e comprimento de onda, podemos associar a este conjunto uma coerência, desde que seus pulsos sejam produzidos simultaneamente, isto é, em fase. Se os pulsos de duas fontes distintas chegam a um ponto em um mesmo instante (em fase) ou com certo atraso (defasados), seus efeitos podem ser somados ou subtraídos, produzindo o que se denomina interferência. Quando seus efeitos se somam, a interferência é considerada construtiva; quando, ao contrário, seus efeitos se subtraem, é considerada destrutiva.

No som, as interferências construtivas são identificadas pelo aumento de sua intensidade em certas regiões, e destrutivas onde sua intensidade é diminuída.

(Adaptado de: GREF, 1996.)

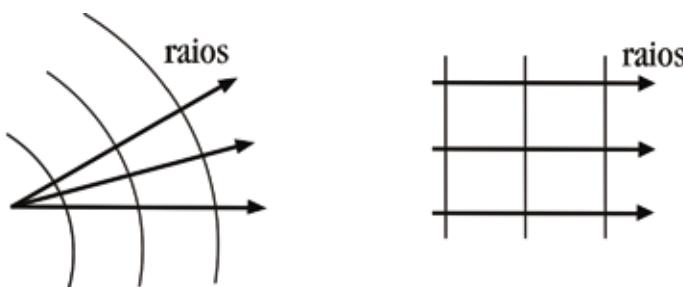
Assim, podemos dizer que a interferência é o resultado da soma dos efeitos de cada onda em separado, como ocorre com as cores da película de sabão e de manchas de óleo sobre uma superfície molhada.

### E com a luz isso também acontece? O que tem em comum uma onda luminosa com uma onda sonora ou uma onda do mar?

Na verdade, como você já deve ter percebido através do que leu e pesquisou até aqui, a velocidade da luz é muito grande quando comparada à velocidade de uma onda sonora (cerca de 340m/s no ar). Além disso, enquanto o som precisa do ar para se propagar e a onda do mar precisa da água, a luz propaga-se no vácuo, ou seja, não necessita de um meio material para se propagar.

Portanto, a luz, como onda, também apresenta o fenômeno da interferência. Mas, para compreender as ondas luminosas, pela sua natureza eletromagnética, é preciso estudá-las a partir das interações com a matéria. Por isso, é preciso estudar os fenômenos que envolvem as suas propriedades a partir do comportamento das frentes de onda.

Se na teoria corpuscular, a luz é pensada como um conjunto de partículas, cujas trajetórias são representadas por raios (como na fig. 5a e fig. 5b), na teoria ondulatória costuma-se usar a idéia de frentes de onda, onde o raio representa uma linha imaginária na direção de propagação da onda.



■ Fig. 5a e 5b: Representação de frente de onda e raios

A refração e a reflexão da luz também podem ser tratadas utilizando-se do conceito de frente de ondas. Porém, neste texto não faremos essa discussão.

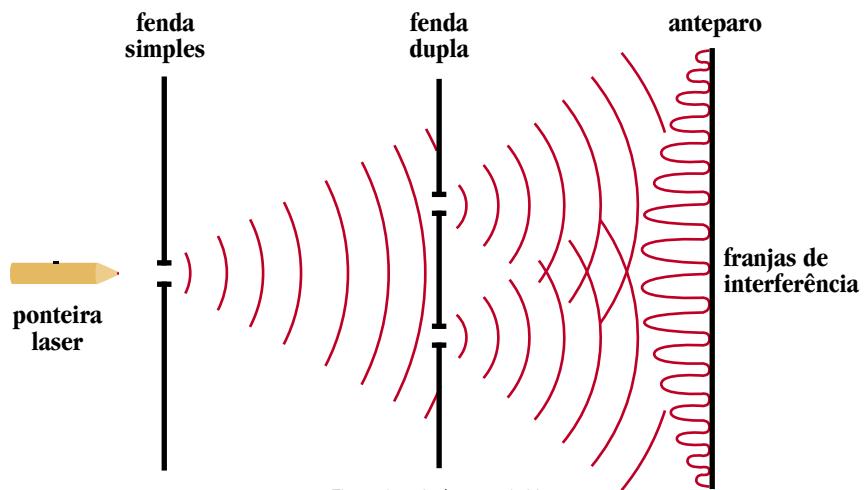
A interferência da luz ocorre quando uma frente de onda atravessa uma fenda (uma abertura) e é manifestada pela formação de regiões claras e escuras.

O surgimento dessas regiões é explicado pela não existência de ondas reemitidas em quantidade suficiente para recompor toda a frente incidente. As novas ondas reemitidas se propagam, atingindo certos pontos do espaço em fase (regiões claras) e outros pontos, defasadas (regiões escuras) (GREF, 1996, p. 219).

Foi o cientista inglês Thomas Young (1773-1829) que, em 1800, realizou uma das primeiras demonstrações ao propor um experimento para produzir os efeitos de interferência da luz em um dispositivo de fenda dupla chamado de interferômetro de Young, conforme Figura 6, o qual permitiu que ele descrevesse um método para determinar a localização dos máximos numa figura de interferência, isto é, as regiões claras (interferência construtiva).



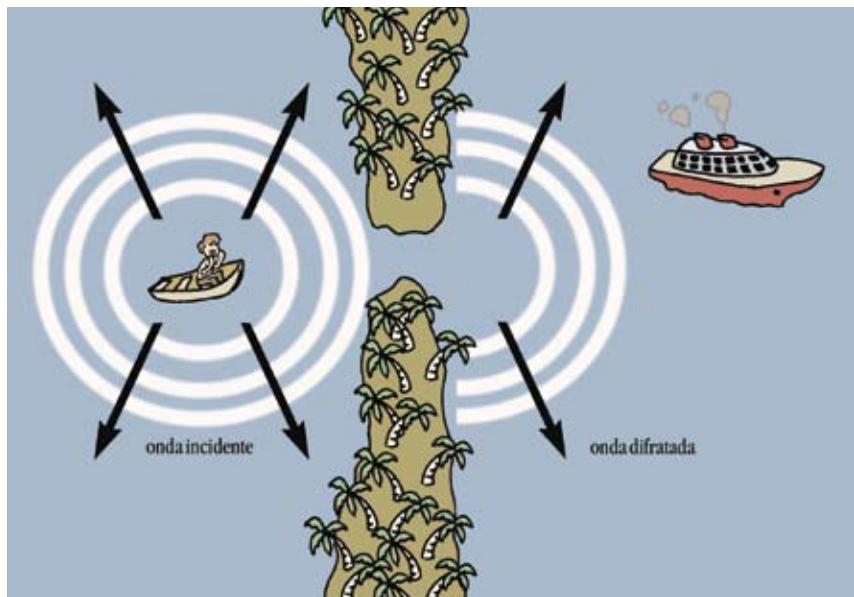
■ Thomas Young (1773-1829).  
Fonte: <http://en.wikipedia.org>



■ Fig. 6: Interferômetro de Young

Além da interferência, quando a luz atravessa uma fenda, também pode ocorrer a difração, a qual consiste num desvio em relação à direção de propagação retilínea da luz, quando esta encontra um obstáculo de dimensões equivalentes ao comprimento de onda da mesma.

A difração é um comportamento que as ondas apresentam e pode ser percebida, por exemplo, quando uma agulha ou as bordas de uma fenda são iluminadas por um feixe de luz, num ambiente escuro, e quando as ondas do mar contornam um barco ou ouvimos o som de um lugar estando em outro.



■ Fig. 7: Difração de uma onda. Adaptado de: [www.if.usp.br](http://www.if.usp.br)

Imagine ou experimente a seguinte situação: você está no seu quarto totalmente escuro e a sala ao lado está iluminada. Se a porta de seu quarto está fechada, como você percebe a luz da sala vizinha? Reparou no buraco da fechadura? Então, esse é um exemplo de manifestação do fenômeno da difração.

É importante observar que os efeitos de interferência e difração ocorrem em todos os tipos de ondas, sejam elas o som, as ondas nas águas do mar ou eletromagnéticas, sejam elas longitudinais (produzem movimento de vai e vem na direção de sua propagação) ou transversais (produzem movimento de vai e vem perpendicular à direção de sua propagação como é o caso da luz).



## ATIVIDADE

Que tal produzir uma figura de difração? Utilizando-se de uma ponteira laser. Pegue um fio de cabelo e sobre ele incida a luz laser projetando sobre a parede de sua sala. E então, o que observou? Discuta com seus colegas e professor.

## O efeito fotoelétrico

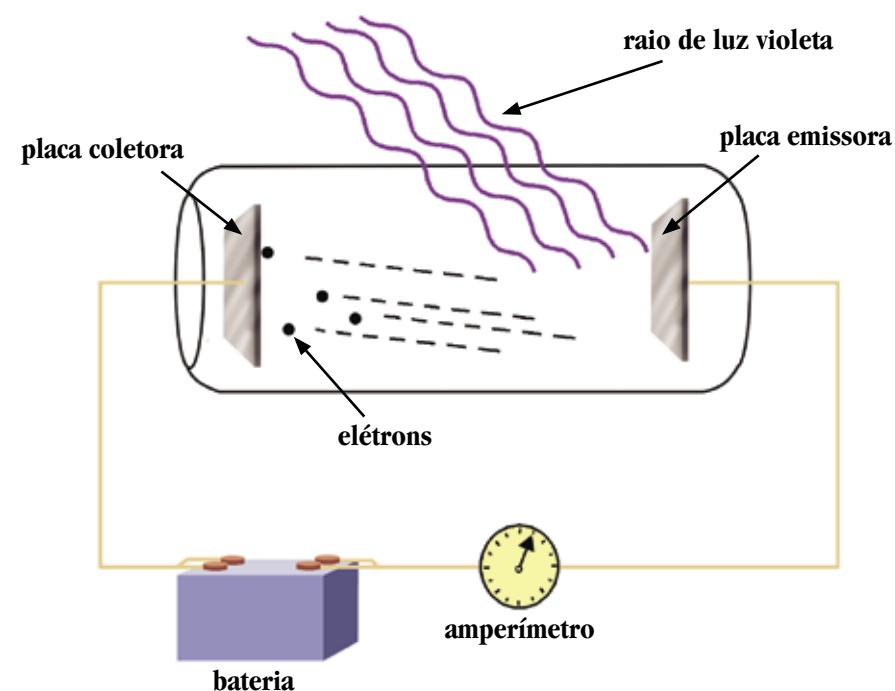
A teoria ondulatória ganhou uma nova versão dada por James Clark Maxwell, na qual afirmava ser a luz uma vibração eletromagnética que se propaga também no vácuo com velocidade  $c$  (aproximadamente  $3 \cdot 10^8$  m/s). Esta teoria, de uma sólida argumentação matemática, conseguiu dar conta dos fenômenos conhecidos sobre a luz até o momento, produziu um resultado que poderia ser experimentalmente verificado; para isto, bastaria que se criassem as ondas eletromagnéticas de Maxwell e as comparassem com as propriedades da luz. Esta hipótese foi verificada em 1887 por Heinrich Hertz (1857-1894) e a luz, além de onda, passou a ter, uma natureza eletromagnética.

Quando buscava as ondas eletromagnéticas, ao estudar a produção de descargas elétricas entre duas superfícies de metal em potenciais diferentes (como ilustra a Fig. 8), Hertz observou que uma faísca proveniente de uma das superfícies provocava uma faísca na outra. Ele também percebeu que o faiscamento era mais intenso quando ele fazia incidir luz ultravioleta no anel. Após confirmar suas observações através de diversas experiências, ele concluiu que o fenômeno deveria ser devido apenas à luz ultravioleta.

Um ano antes da descoberta do elétron por Thomson (1856-1940) em 1887, o pesquisador, Wilhelm Hallwachs (1859-1922), demonstrou que os corpos metálicos nos quais se incidia luz ultravioleta adquiriam carga positiva.

Já no início do século XX, o físico alemão Philipp Eduard Anton von Lenard retornou os experimentos de Hertz, utilizando-se de um tubo de Crookes, no qual irradiava o catodo e observava a produção das faíscas ou raios.

Lenard constatou que a iluminação da placa metálica (o catodo) ajudava na liberação dos “raios” e, posteriormente, usando um aparato semelhante ao utilizado por Thomson, para medir a relação carga/massa do elétron, verificou que os “raios” produzidos eram, na verdade, elétrons, ou melhor, fotoelétrons, razão pela qual ele batizou o fenômeno de efeito fotoelétrico. Na seqüência, fez medidas bastante precisas descobrindo duas importantes propriedades, a primeira, dizia respeito à medida da corrente elétrica gerada em função da tensão elétrica aplicada nos eletrodos (anodo e catodo), quando ele notou que existia um potencial de corte, a partir do qual não era mais possível observar o efeito; a segunda, tratava da dependência do efeito em relação à freqüência da luz incidente. Ele observou que o efeito podia ou não ocorrer, e isso estava associado à existência de um valor especial da freqüência, abaixo da qual não ocorria o efeito, chamada de freqüência de corte. (Adaptado de: CHESMAN; ANDRÉ; MACEDO, 2004, p. 99)



■ Fig. 8: Aparato experimental utilizado para observação do efeito fotoelétrico. Uma luz monocromática de freqüência f (radiação ultravioleta por exemplo) e intensidade luminosa  $I_0$  incide sobre o catodo e faz com que ocorra a liberação de elétrons, os quais são atraídos pelo anodo. A experiência mostrava que o potencial de corte independia da intensidade luminosa, o que contrariava a teoria clássica, a qual previa que um aumento na intensidade luminosa provocaria um aumento na energia cinética dos fotoelétrons, além do potencial de corte ( $V_0$ ).

### Então, o que é o efeito fotoelétrico?

O efeito fotoelétrico (Figura 9) é a ejeção de elétrons de uma superfície metálica pela ação de uma luz incidente. Podemos entender o problema considerando o elétron preso na superfície de um metal como estando dentro de um poço de potencial (nós vivemos dentro de um poço de potencial; o poço de potencial gravitacional gerado pela massa da Terra!). Essa denominação vem do fato de que o metal atrai o elétron para si. Na superfície do metal, a atração não é tão forte, e a luz que incide sobre ele fornece energia suficiente para o elétron “escapar” do poço. Em geral, a energia é suficiente não só para arrancar o elétron, mas também para fornecer a ele uma certa energia cinética. De fato, se soubermos a energia da luz incidente, e medirmos a velocidade do elétron ejetado, podemos calcular a “profundidade” do poço. (OLIVEIRA, 2005, p. 75)

Resumindo, podemos dizer que duas dúvidas a respeito deste fenômeno inquietava os físicos:

1. De acordo com a teoria eletromagnética clássica, a energia cinética dos elétrons ejetados dependia da intensidade da luz, o que não era observado. Além disso, a ejeção de elétrons ocorria imediatamente, independente da intensidade da luz;
2. O efeito deveria ocorrer para qualquer freqüência, pois dependeria da intensidade do campo elétrico.

## Conseqüências importantes da descoberta

O pressuposto básico da teoria clássica é que sendo a luz uma onda eletromagnética, a sua energia deveria distribuir-se continuamente pelo espaço. Mas não era isso o observado. A teoria ondulatória, no seu auge, torna-se impotente diante daquele fenômeno.

Então, o físico Einstein, em 1905, propõe uma explicação para o efeito fotoelétrico através da teoria dos *quanta* – teoria que concebia a luz como corpúsculo e que contrariava a idéia de energia contínua no espaço. Segundo Einstein, “a energia da onda luminosa é quantizada em pequenos pacotes, denominados fótons. A energia de um fóton é proporcional à freqüência da onda”. (Tipler, 1984, p. 853)

### Quais seriam as conseqüências das proposições de Einstein?

1. Sendo a luz uma partícula, o fóton, um aumento na intensidade luminosa, provoca um aumento na corrente e não no potencial de corte;
2. Para que um elétron seja ejetado é preciso que um fóton colida com o elétron e transfira toda a sua energia a ele. A transferência acontece no momento da colisão fóton-elétron (um único fóton e o elétron), portanto, instantaneamente. É preciso que o fóton tenha toda a energia necessária. Aumentar a intensidade não adiantaria, pois só aumentaria o número de fótons e não o número de elétrons ejetados.

Ao tentar resolver os problemas suscitados pelos estudos do efeito fotoelétrico, Einstein propôs o conceito de quantização da luz, inspirado na hipótese da quantização da energia de Max Planck, a qual foi formulada na década de 1920.

A previsão de Einstein, ao propor que a luz eletromagnética se propagava como que em “pacotes”, os “quanta de luz” contrariava as previsões da física clássica. Não bastasse o assombro, a hipótese foi confirmada pelo físico americano R. A. Millikan, em experiências realizadas em 1914.

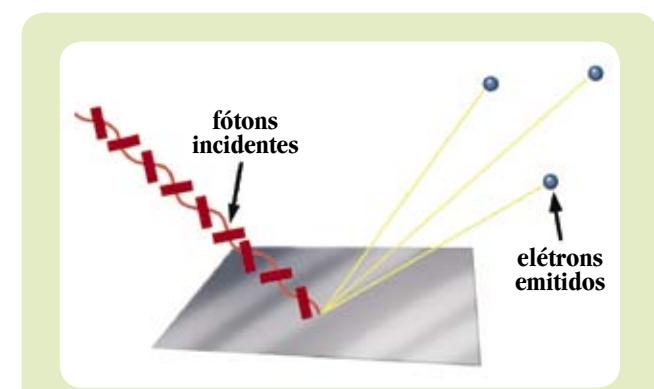


Fig. 9: O efeito fotoelétrico

Essa é a equação de Einstein para o efeito fotoelétrico:

$$hf = K_{\max} + W$$

Onde:

$hf$ : é a energia do fóton ( $E=hf$ );

$K_{\max}$ : é a energia cinética máxima do elétron ejetado,  $e$ ;  $W$ : representa o trabalho necessário para arrancar um elétron da superfície do catodo. É chamada função trabalho.

Outra confirmação importante para a teoria dos “quanta de luz” ocorreu em 1923, quando o físico americano Arthur Compton (1892-1962) realizou uma série de experiências buscando analisar o espalhamento de raios X por um cristal. Em sua homenagem, o fenômeno foi chamado efeito Compton. Compton observou que, ao incidir um feixe de raio X sobre um cristal, ocorria o espalhamento desses raios que apresentava dois picos: um com o mesmo comprimento de onda do feixe de raio X incidente; um segundo, com comprimento de onda superior ao do feixe incidente, cujo valor é dado por  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ , que é chamado de espalhamento Compton.

Para explicar os resultados experimentais, Compton admitiu que os raios X se comportavam como um pacote de fótons de energia  $E_1 = hf_1$ , de modo que podia tratar o processo de espalhamento como uma colisão (tipo bola de bilhar) entre os fótons e os elétrons do cristal. Com esta hipótese, explica-se a existência do primeiro pico, como a interação dos raios X com os elétrons mais internos do cristal, que não devem mudar o comprimento de onda incidente. Quanto ao segundo pico, Compton propôs que o fenômeno era provocado pelas colisões entre os fótons e os elétrons livres do cristal. Para melhor interpretar os resultados obtidos, devemos usar as previsões da teoria da relatividade, uma vez que na região de raios X, os fótons associados aos mesmos possuem altas energias (dezenas de KeV – quilo elétron volt). Em resumo, do ponto de vista científico, o entendimento do efeito Compton serviu para fortalecer o caráter corpuscular da radiação eletromagnética. Em 1927, Compton recebeu o Prêmio Nobel de Física pela importância de suas descobertas relativas ao efeito Compton.

(Adaptado de: CHESMAN; ANDRÉ; MACEDO, 2004, p. 99)

A Figura 10 ilustra a colisão entre um fóton e um elétron.

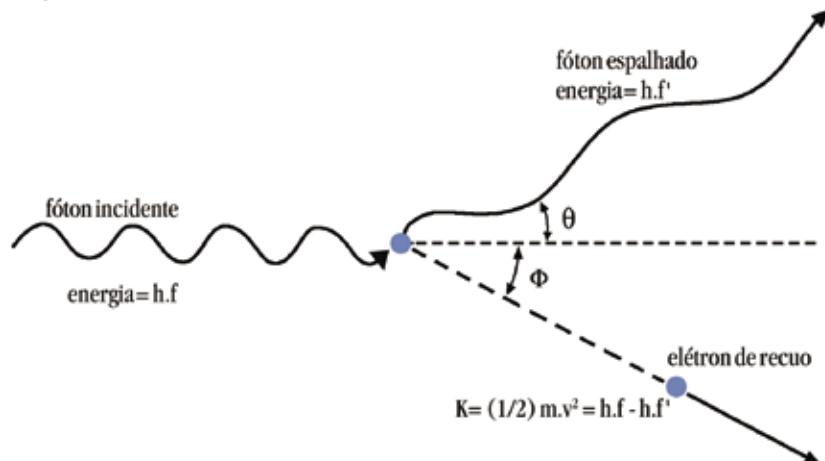


Fig. 10: Efeito Compton. Colisão entre um fóton e um elétron e.  $\theta$  é o ângulo de espalhamento do fóton espalhado.  $\phi$  é o ângulo de espalhamento do elétron de recuo.



## ATIVIDADE

1. Relacione cada fenômeno luminoso estudado até aqui com a natureza da luz. Justifique sua resposta.
2. Faça uma sinopse da concepção da natureza da luz, a partir dos gregos até a concepção quântica.

## Seria a dualidade onda-partícula uma característica apenas da luz?

Na verdade, o caráter dual se tornou mais conhecido a partir de 1920, quando experiências com elétrons mostraram que eles também têm dupla natureza, ou seja, exibem propriedades ondulatórias e corpusculares, pois apresentam o fenômeno da difração. A teoria que explica este comportamento dual de entidades fundamentais como a luz é a teoria da mecânica quântica desenvolvida por E. Schrödinger, W. Heisenberg, P. A. M. Dirac e outros.

Mas foi Louis de Broglie, em 1924, quem deu o pontapé inicial para o estudo da nova Mecânica Quântica, ao propor a existência de ondas de matéria, a quais embora não tivessem boa receptividade na época, foram reconhecidas e validadas por Albert Einstein. Para de Broglie, o comportamento dual da radiação, isto é, a dualidade onda-partícula, também se aplicava à matéria. Dizendo de outra forma, ele estendeu para a matéria, a idéia de Einstein sobre o caráter dual da luz. Assim como um fóton é o corpúsculo ao qual está associada uma onda luminosa que administra seu movimento, a uma partícula de matéria, por exemplo o elétron, também está associada uma onda de matéria.

### Como pode um elétron se comportar ora como partícula, ora como onda?

Pois bem, em seus processos de interação, o elétron pode manifestar em alguns momentos comportamentos ligados a uma natureza corpuscular, como o espalhamento. Em outro momento, o elétron pode sofrer difração, um fenômeno associado a ondas, o que sugere o modelo ondulatório. Embora valha lembrar, ou você tem uma medida ou outra, ou seja, como matéria ou como onda.

Já conversamos um pouco sobre a difração, mas o que seria o fenômeno de espalhamento? Trata-se de uma manifestação típica de partículas. Certamente você tem uma parede branca em sua casa. Encha a sua mão com feijões cozidos atire-os contra a parede branca. Você percebe marcas na parede, além de sua mãe “fora do sério”. Caso você realizasse a experiência (caso passe pela sua cabeça realizá-la, pense antes nas marcas na parede e na sua mãe), as marcas na parede indicariam que você fez um espalhamento de feijões.



■ Louis de Broglie (1892-1987) Estendeu a teoria onda-partícula para a matéria com a descoberta da natureza ondulatória dos elétrons. Por esse trabalho ganhou prêmio Nobel de Física em 1929. Fonte: <http://pt.wikipedia.org>



### DEBATE

Se a natureza dual parece ser um comportamento generalizado da matéria, por que nós não conseguimos perceber certos fenômenos como interferência, difração e espalhamento? Pense, pesquise e discuta com os seus colegas e professor.

## A natureza da luz, a dualidade onda-partícula, o fim das certezas e os novos caminhos para a Física

O que estava errado? O problema era que os físicos e a sociedade de uma maneira geral dogmatizavam o conhecimento científico, ou seja, encaravam-no como absolutamente verdadeiro.

A teoria sistematizada por Newton (1642-1727) nos *Principia* buscava explicações para os fenômenos físicos através de forças. Qualquer fenômeno podia ser estudado através de suas partes. Logo a luz podia ser estudada através dos seus minúsculos corpúsculos, partículas sujeitas a forças.

Antes os fenômenos observados na natureza eram regulados pela vontade divina. O homem do século XVII inverte essa visão e a natureza passa a ser dirigida por leis universais, como se fosse um mecanismo de relógio.

A física clássica estabeleceu um paradigma, isto é, um modelo a ser seguido por todas as outras áreas do conhecimento. Seu sucesso foi tão arrebatador que todas as outras ciências tentaram se fundamentar sob bases semelhantes. Isso levou alguns físicos do final do século dezenove a afirmarem que a física tinha chegado ao seu fim! Tudo o que havia para ser feito seria aplicar a mecânica e o electromagnetismo para resolver problemas específicos, mas que nada de mais fundamental havia para ser descoberto. O que aconteceria então no início do século XX iria provar para estes imprudentes senhores que a Natureza só havia até então revelado a “ponta do iceberg”! (OLIVEIRA, 2005, p. 43)

A explicação para o efeito fotoelétrico sugere uma nova discussão que os físicos pensavam estar encerrada: a luz, que após os trabalhos de Maxwell e Hertz foi admitida como onda, agora se comportava como uma partícula.



■ Max Planck (1858-1947) Recebeu o prêmio Nobel de Física em 1918 devido aos seus estudos, os quais foram a base inicial da Mecânica Quântica. Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

As investigações de Planck, Einstein, Millikan e Compton ressuscitaram as discussões sobre a natureza da luz, que se julgava extintas pelo final do século XIX.

Agora, porém, estava-se diante de uma dificuldade que a física nunca topava antes. É que não se podia simplesmente abandonar a concepção ondulatória da luz para retomar a concepção corpuscular. Se fizesse isso, se solucionariam os novos problemas (explicar o espectro do corpo negro e os efeitos fotoelétrico e Compton), mas à custa da exumação de vários outros que pareciam definitivamente resolvidos pela teoria ondulatória eletromagnética de Maxwell (difração e interferência da luz, correlações entre os parâmetros ópticos e eletromagnéticos). Os físicos, viam-se por assim dizer, entre a cruz e a espada: conserta-se de um lado para estragar do outro, e vice-versa. Ambas as concepções de luz, ondulatória e corpuscular, são requeridas para a explicação da totalidade dos fenômenos. O nó da questão é que tais concepções são claramente inconciliáveis. (Adaptado de: CHIBENI, s/d)

A quantização da energia de oscilação dos elétrons, sugerida por Planck, foi aceita pelos físicos porque era a hipótese que possibilitava entender o fenômeno da radiação do corpo negro. Mas a energia não. Essa seria regida pelo eletromagnetismo clássico, ou seja, deveria ser contínua.

No final do século XIX, Henri Poincaré (1854-1912) propôs a teoria do caos e, junto com ela, o fim das certezas. Para Poincaré, as condições iniciais da observação de um fenômeno não poderiam ser conhecidas com precisão absoluta. Aos poucos, o observador perderia o domínio dessas condições, tornando os sistemas imprevisíveis, visto que, ao observar, havia interferência. Suas idéias ficaram esquecidas até o ano de 1905, ano em que Einstein propôs a teoria da relatividade.

Pela física newtoniana, as leis do universo podiam ser deduzidas a partir de postulados, leis e axiomas, e foi aceita como absolutamente verdadeira. O pressuposto básico era de que se conhecêssemos a posição inicial e o *momentum* da partícula, todo o seu futuro poderia ser determinado. Mas, agora, era preciso conviver com a incerteza, instituída por Heisenberg no seu Princípio da incerteza, o qual colocou, justamente, essa impossibilidade. Que golpe para o universo mecânico!

## Será que Deus joga dados?

Em 1911, o belga Ernest Solvay reuniu para uma conferência importantes físicos. Na conferência de Bruxelas ficou registrado um embate entre dois físicos: Niels Bohr e Albert Einstein. Havia a interpretação da mecânica quântica, defendida por Bohr e Heisenberg, em termos de incertezas: a probabilidade é tudo o que temos e que é possível saber de um evento. Assim, não é possível determinar com precisão a posição de uma partícula, pois isso é aleatório.

No entanto, para outros, entre os quais estava Einstein, os eventos não são puramente aleatórios, deve existir alguma razão oculta ainda não descoberta que responda porque as partículas surgem em determinado local.

A posição de Bohr e Heisenberg predominou e essa interpretação ficou conhecida como interpretação de Copenhague, por ser esta a cidade natal de Bohr.

Einstein não acreditava que Deus jogava dados, no entanto, a natureza como um sistema dinâmico complexo - ao contrário do que pregava a simplicidade newtoniana em que tudo podia ser descrito através de forças - apresenta um significado novo, não mais de certezas, mas de probabilidades.

Isso gera uma crise no paradigma newtoniano, e muitas tentativas são feitas no sentido de se fazer adaptações e manter a teoria.



Jules Henri Poincaré  
(1854-1912)

Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

Mas a relutância de alguns físicos em reconsiderar seus paradigmas não impediu que novos caminhos fossem encontrados, e o cientista do século XX precisou reavaliar a sua idéia de certeza para aprender a lidar com uma nova concepção de universo e de matéria, que apresenta-se quase que incompatível com a física clássica.

Em vez de eternidade, a história; em vez do determinismo, a imprevisibilidade; em vez do mecanicismo, a inter penetração, a espontaneidade e a auto-organização; em vez de reversibilidade, a irreversibilidade e a evolução; em vez da ordem, a desordem, em vez da necessidade, a criatividade e o acidente. (Santos. In: FRÓIS, 1997, p. 28)

Resumindo, o cientista do século XX teve que reavaliar o conceito de ciência e a validade dos modelos científicos, enfim, os seus critérios de certeza. A relação entre o homem e a natureza aponta para uma concepção onde a ciência não pode mais ser vista como um instrumento de domínio sobre o objeto de estudo.

Ao contrário, sendo a natureza um sistema complexo do qual o homem faz parte, o cientista do início do século XX precisou voltar-se para sua filosofia, como era antes do século XIII (quando criou-se o parâigma medieval e as leis da natureza passam a ser governadas por Deus), buscando um entendimento dos fenômenos que levam a sua totalidade, isto é, a sua compreensão de forma mais abrangente possível, em oposição ao procedimento analítico em que os componentes de um fenômeno são tomados isoladamente.



## ATIVIDADE

Sabemos que o céu é azul não é? Qual é o fenômeno responsável por essa cor azul? Que relação existe entre a frequência da onda visível incidente e esse fenômeno?



## DEBATE

Agora é com você: Retome o texto dramatúrgico e faça uma comparação entre a fala de seus personagens e suas concepções de natureza. Procure relacionar qual parâigma está presente nas falas dos personagens. Discuta com seus colegas e professor. Elabore um texto sintetizando os principais pontos discutidos.

### E então, você já sabe resolver o enigma?

Provavelmente você já sabe um pouco mais sobre a luz. Não se preocupe se você não conseguiu, num primeiro momento, entender esse negócio de dualidade onda-partícula da luz. Inicialmente, os cientistas também não entenderam.

## Referências

- BÍBLIA, A. T. Gêneses, 1:3
- CHESMAN, C.; ANDRÉ, C.; MACÊDO, A. **Física moderna:** experimental e aplicada. 2 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.
- CHIBENI, S.S. O SURGIMENTO DA FÍSICA QUÂNTICA. In: [www.Unicamp.br/~chibeni/texdid/fisquantica.doc](http://www.Unicamp.br/~chibeni/texdid/fisquantica.doc). Acesso em: 30/06/06.
- FRÓIS, K. P. UMA BREVE HISTÓRIA DO FIM DAS CERTEZAS OU O PARADOXO DE JANUS. IN: **Cadernos de pesquisa interdisciplinar em ciências humanas.** n. 63, dez. Florianópolis: UFSC, 2004.
- GIBERT, A. **Origens Históricas da Física Moderna.** Introdução abreviada. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, sem data.
- OLIVEIRA, I. S. **Física moderna:** para iniciados, interessados e aficionados. Vol. 1 São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- ROCHA, José Fernando. Origem e Evolução do Eletromagnetismo. In: **Origens e Evoluções das Idéias da Física.** Salvador: EDUFBA, 2002. p. 184-281.
- ROSMORDUC, J. **Uma História da Física e da Química de Tales à Einstein.** Tradução: Leila Velho Castro Faria; Revisão técnica: Nelson Velho Castro Faria. 2 ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 2003. Original Francês.
- TIPLER, P. **Física.** Traduzido por: Horacio Macedo. 2 ed. 2 v. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1984.
- Universidade Federal do Estado de São Paulo/USP. Grupo de reelaboração do ensino de Física/GREF. **Física 3:** Eletricidade, 4 ed. São Paulo: Edusp, 1996.

## Obras Consultadas

- GUINSBURG, J. C. N. **Semiologia do Teatro.** São Paulo: Editora Perspectiva, 2006.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física Óptica e Física Moderna.** Tradução de: Adir Moysés Luiz... et al; coordenador da tradução: Adir M. Luiz 2 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1991.
- HYNIEWCZ, S. **Para Filosofar.** 5<sup>a</sup> edição. Rio de Janeiro: Edição do autor, 2001.
- ROUBINE, Jean Jacques, 1880-1980. **A Linguagem da Encenação teatral.** Rio de Janeiro: Editora Jorge Zahar, 1998.
- RUSSELL, Bertrand. **O valor da filosofia.** Tradução António Sérgio.

Coimbra: Almedina, 2001. p. 151.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D. **FÍSICA**: Ondas Eletromagnéticas Óptica. Física Atômica. Tradução de: José de Lima Accioli. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1985.

YOAV, Bem-Dov. **Convite à Física**. Trad. de Maria Luiza X. de A. Borges; revisão técnica de Henrique Lins de Barros. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1996.

## ■ Filme

Título: Caçadores de Mentes.

Tempo de duração: 106 min.

Ano de lançamento: EUA, Inglaterra - 2004.

Direção: Renny Harlin.

## ■ Documentos Consultados *ONLINE*

MOREIRA, José E. & MONTENEGRO, Betânia. **Newton, Huygens e a Natureza da Luz**. Disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/arte/teatro/natluz/naturaluz.htm>> Acesso em: 28 fev. 2006.

MORENO, M. Q. **Thomas Young e a natureza da luz**. Ciência Hoje, col 33, n. 198, p. 68-70. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/materia/resources/files/chmais/pass/ch198/memoria.pdf> Acesso em: 28 fev. 2006.

SILVA, O. H. S. **A Teoria da Natureza da Luz**. Ambiente Pedagógico Colaborativo, OAC 2273. Disponível em: <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/portal/educadores.php?PHPSESSID=2006051421195823> Acesso em: 28 fev. 2006.



## ANOTAÇÕES

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Certo dia passeando por minha  
cidade ouvi a seguinte notícia:

Atenção para as últimas notícias.  
Acaba de ser anunciada uma incrível particularidade da luz!  
Cientistas confirmam que a luz comporta-se ora como uma onda,  
ora como uma partícula.



# DUALIDADE ONDA PARTÍCULA DA LUZ

■ Teresinha Aparecida Soares Albuquerque<sup>1</sup>

*M*as como? A luz pode ter dois comportamentos ao mesmo tempo?  
Seria isso, realmente verdadeiro?  
Vamos investigar essa particularidade da luz?

## O que é a luz afinal?

O estudo dos fenômenos físicos a respeito da luz e as investigações sobre a sua natureza surgiram desde as antigas civilizações. Ela foi relacionada com o fogo e, às vezes, associada a uma deusa. Os pensadores gregos foram os que deram contribuições mais significativas com o objetivo de explicar sua natureza.

Segundo o filósofo grego Aristóteles (384-322 a.C.) a luz era uma perturbação num meio material. Ele descreveu um modelo que pode ser considerado como o embrião da teoria ondulatória da luz, pois essa perturbação, não deixa de ser uma onda. Sua teoria foi aceita durante muito tempo.

O cientista e matemático inglês Isaac Newton (1642-1727), ancorado na teoria mecânica, formulou uma teoria corpuscular, isto é, a luz era composta de partículas. De acordo com Newton, uma fonte luminosa emitia partículas, extremamente pequenas e velozes. Em decorrência disso, sua velocidade deveria ser maior na água do que no ar. Saberemos o porquê adiante.

Um outro pesquisador dessa área, o holandês Cristian Huygens (1629-1695), afirmou que a luz não era um conjunto de partículas, mas oscilações que se propagavam por meio de ondas.

A teoria proposta por Huygens, exposta no livro *Tratado da luz* (1690), indica a existência de uma suposta substância, um meio transparente que permeia todo o universo, retomando a idéia da “quinta essência”: o éter. Como onda é a perturbação de um meio material, a oscilação do éter é o que vemos como luz.

Apesar de aceitar que as partículas de luz pudessem vibrar, Newton não aceitava a teoria ondulatória. Dessa forma, Newton e Huygens...

Chegaram ao lugar luminoso  
onde a verdade esplendia seus fogos.  
Era dividida em metades  
diferentes uma da outra.

(ANDRADE, Carlos Drummond de)

### E aí quem teria razão Newton ou Huygens? Como Newton explicou o comportamento da luz, a partir da sua teoria corpuscular?

A refração é a passagem da luz de um meio para outro com características diferentes, o que resulta em um desvio das partículas de luz. Isso ocorre devido à interação das forças entre essas partículas e as partículas do meio no qual elas se propagam, a água, por exemplo. Como qualquer força que atue sobre uma partícula em movimento pode alterar sua velocidade, essas partículas de luz teriam velocidades diferen-

tes quando mudassem de meio, devido às diferenças de densidades dos meios envolvidos. Em consequência dessa força atrativa, a luz viajaria na água a uma velocidade maior que no ar. Dessa forma, quando uma partícula de luz vinda do ar mergulha na água, muda de direção, fazendo-a aproximar-se da perpendicular à superfície no ponto de incidência.

### E, como Huygens explicou o comportamento da luz, a partir da sua teoria ondulatória?

A refração também pode ser explicada com a ajuda da teoria ondulatória, sendo que o raio de luz deveria ser retardado ao entrar em um meio mais denso.

As ondas caracterizam-se por sua freqüência e seu comprimento. A suposição essencial é que comprimentos de ondas diferentes correspondem a cores diferentes. Ao invés de termos corpúsculos pertencentes a várias cores, temos a diferença natural em comprimento de onda.

É fundamental, nesse processo, que a velocidade da onda de luz na água seja inferior a do ar, exatamente o contrário proposto por Newton.



### ATIVIDADE

Note que até a poesia pode ser influenciada pela ciência e vice-versa. Busque o poema "Verdade" de Carlos Drummond de Andrade e, faça uma analogia entre o poema e as teorias de Newton e Huygens sobre a natureza da luz.

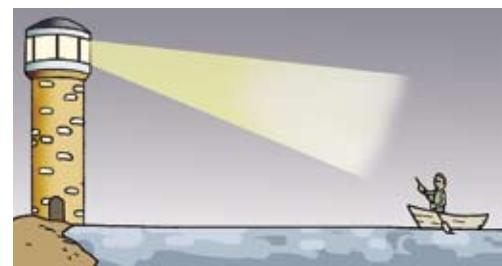
Será que o poema de Drummond se encaixa nas duas verdades mostradas?

Produza um texto no qual você discorrerá sobre as duas verdades referentes a luz. Utilize como referência o poema "Verdade" de Drummond e, as teorias sobre a natureza da luz.

Por aproximadamente 100 anos prevaleceu a proposta de Newton.

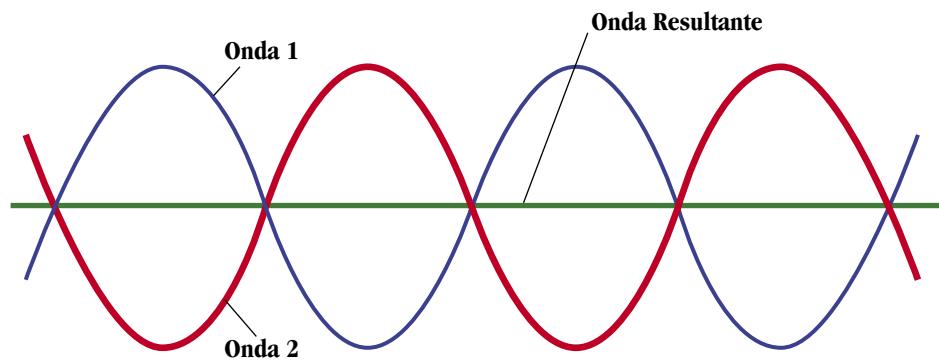
### Mas será que Newton estava realmente certo? Huygens também não poderia estar certo? Vamos continuar reunindo pistas para solucionar esse mistério?

Augustin Fresnel (1788-1827), engenheiro francês, criou alguns artefatos engenhosos em ótica, um dos quais ficou conhecido como a "lente de Fresnel", e é utilizada para direcionar a luz em faróis de sinalização marítima. Acreditava que a luz pudesse ser reproduzida por fluidos capazes de transmitir vibrações, uma idéia decorrente de uma teoria ondulatória da luz. Com isso, passou a contestar abertamente a teoria corpuscular de Newton.



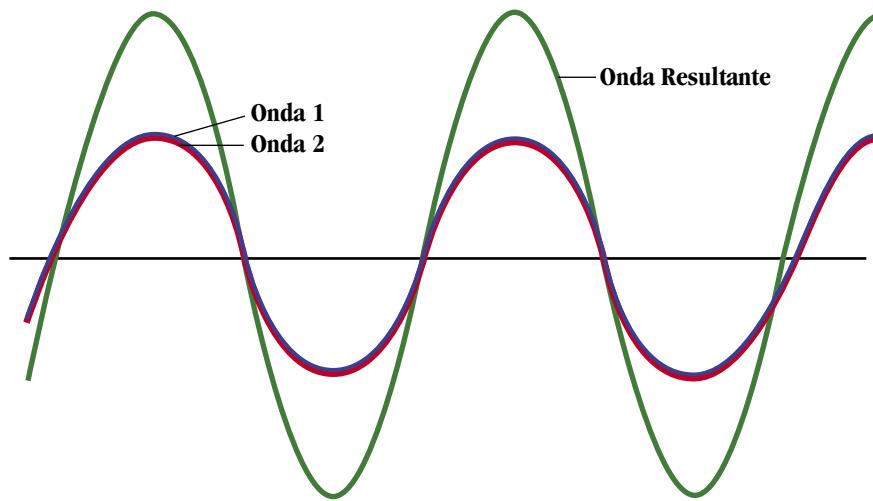
## Mais alguns capítulos no embate

Em 1801, o físico e médico inglês Thomas Young (1773-1829) obteve com a luz, um fenômeno característico das ondas, a interferência. Este fenômeno ocorre quando duas ou mais ondas se encontram e se superpõem, dando origem uma “nova” onda, que combina características de suas geradoras. Por exemplo, quando no encontro de duas ondas, a crista de uma sobrepõe o vale da outra temos uma interferência destrutiva. Se as amplitudes das geradoras forem iguais, a onda resultante da interferência terá amplitude nula, como mostra a Figura (1).



■ Fig. 1: Duas ondas de amplitudes iguais se sobrepõem resultando em interferência destrutiva.

Se no encontro de duas ondas, as cristas se sobrepõem, a onda resultante terá uma amplitude igual à soma das amplitudes das geradoras. Neste caso temos uma interferência construtiva, como ilustra a Figura (2).



■ Fig. 2: Duas ondas de amplitudes iguais se sobrepõem resultando em interferência construtiva.

Young, incidindo feixes de luz em duas fendas, observou com nitidez, faixas claras e escuras no anteparo. Ou seja, interferências construtivas e destrutivas que ocorrem quando as ondas se superpõem.

As experiências para medir a velocidade da luz na água foram decisivas. Isso não foi nada fácil, mas depois de muitas tentativas, foram os franceses Armand Fizeau (1819-1896) e Jean Foucault (1819-1868) que,

com experiências independentes, em meados do século XIX, mediram a velocidade da luz na água, demonstrando que a luz é uma onda que se propaga na água com velocidade menor do que no ar.

O físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) observou a partir de equações que o resultado da junção, de um campo elétrico variável, com um campo magnético também variável, se manifesta em ondas que podem se propagar, até mesmo pelo vácuo. Essa junção apresentava propriedades de uma onda mecânica, como: reflexão, refração, interferência e transporte de energia. Veja o capítulo 13 (Campos eletromagnéticos) onde esses campos são tratados de forma mais intensa.

Maxwell teve a habilidade necessária para reunir os trabalhos da época e integrá-los num conjunto de quatro equações que ficaram conhecidas como equações de Maxwell. Essas equações mostraram que os campos eletromagnéticos formavam ondas eletromagnéticas.

### Ondas eletromagnéticas?

É, cargas elétricas geram campos elétricos e, essas mesmas cargas estando em movimento geram campos magnéticos. Mas isso tudo era considerado estacionário, com cargas paradas ou em movimento uniforme. A grande sacada de Maxwell foi prever que campos elétricos e magnéticos poderiam se “libertar” de suas fontes, e propagarem-se pelo espaço sob a forma de ondas eletromagnéticas. Outro aspecto importante observado por Maxwell, é de que as ondas eletromagnéticas percorrem o espaço com uma velocidade igual à velocidade da luz no vácuo, próxima a  $3 \cdot 10^8$  m/s. Essa velocidade, representada por  $c$ , associada a  $\mu_0$  (permeabilidade magnética do vácuo) e  $\epsilon_0$  (permissividade elétrica) através da seguinte equação:

$$C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{4\pi \times 10^{-7} \times 8,85 \times 10^{-12}}}$$

$$C = 2,999 \times 10^8 \text{ m/s}$$

(Adaptado de: OLIVEIRA, 2005, p.38)

Os trabalhos de Maxwell foram fundamentais para dar consistência à teoria ondulatória eletromagnética da luz. Mais tarde, os trabalhos do físico alemão Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), em 1887 contribuíram para validar a teoria ondulatória da luz.

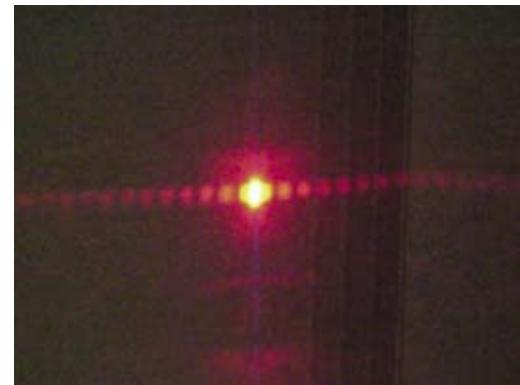


Fig. 3: Figura de difração obtida com uma ponteira laser. As regiões claras manifestam interferência construtiva, enquanto as escuras são resultado de interferência destrutiva.



## PESQUISA

Organizem-se em grupos e façam uma pesquisa histórica, resgatando as experiências realizadas para encontrar a velocidade da luz. Discuta com seus colegas sobre as que vocês consideraram mais interessante.

Espere um pouco! Estamos falando em natureza dual, onda e partícula. Nossa investigação não terminou. O mistério ainda não foi解决ado. Temos que continuar reunindo pistas.

Na página 162, a Figura 8 ilustra o aparato experimental utilizado para observação do efeito fotoelétrico. (Adaptado de: CHIBENI, s/d)

## Mais força à natureza corpuscular da luz

Hertz descobriu o efeito fotoelétrico, observando que, em certas condições, a luz pode arrancar elétrons da superfície de um metal (para ajudá-lo a compreender melhor esse assunto você poderá ver o capítulo 10: A natureza da luz e suas propriedades).

### Arrancar elétrons da superfície de um metal? Mas, como a luz pode fazer isso?

A luz de um determinado comprimento de onda, violeta, por exemplo, extraí elétrons do metal e uma chuva deles salta para fora com certa velocidade. Como envolve luz e carga elétrica, esse fenômeno recebeu o nome de efeito fotoelétrico

A teoria ondulatória não conseguia explicar esse efeito. E sabe por quê? Bem, de acordo com a teoria de Maxwell, a luz é uma onda eletromagnética, o aumento da intensidade de luz sobre o metal, deveria provocar um aumento equivalente na energia de movimento (energia cinética) dos elétrons extraídos. Porém, o físico alemão Philipp Lenard (1862-1947) constatou que na prática isso nem sempre acontecia, pois a energia cinética mantinha-se constante. Portanto, não dependia da intensidade luminosa. Lenard observou que, se a luz incidente fosse amarela ou vermelha, ao invés de violeta a energia cinética dos elétrons que saltavam para fora do metal seria menor, concluindo que essa energia depende da cor e não da intensidade da luz incidente.

Esse resultado não poderia ser explicado pela teoria ondulatória.

O físico alemão Albert Einstein (1879-1955), em 1905, apresentou uma nova teoria. Segundo ele toda radiação eletromagnética é emitida ou absorvida na forma de corpúsculos energéticos, onde cada um transporta uma quantidade definida de energia, denominado quantum.

A idéia de quantum de energia foi apresentada pela primeira vez pelo físico alemão Max Planck (1858-1947). A partir dos trabalhos sobre radiação de corpo negro, se observou que a quantidade de energia que um corpo podia emitir ou absorver, precisava ser algo descontínuo e existir em pacotes mínimos. Como por exemplo, você não pode

chegar à padaria e pedir meio pão. O pão só é vendido por unidade, que seria sua porção mínima, assim também a quantidade de energia contida na radiação.

Em 1913, Niels Bohr (1885-1962) realizou pesquisas que apontaram certas falhas no modelo atômico de Ernest Rutherford (1871-1937). Um elétron em movimento curvo tem aceleração e de acordo com a teoria de Maxwell, cargas aceleradas emitem ondas eletromagnéticas, portanto o elétron deveria perder energia e cair sobre o núcleo, o que provocaria o colapso da matéria.

Apoiado na teoria quântica de Max Planck, Bohr propôs um novo modelo para o átomo, em sua primeira hipótese, ele admite que no átomo, os elétrons estão confinados em certos níveis estáveis de energia, ou seja, os elétrons giram ao redor do núcleo em regiões bem definidas. Essas órbitas permitidas são chamadas, “estados estacionários” e, não há emissão nem absorção de energia enquanto os elétrons estiverem em movimento numa mesma órbita.

Einstein, utilizando os conceitos de Planck, admitiu que a luz transporta pacotes de energia, denominados por ele de fôtons de luz. Segundo sua teoria, a ação desses fôtons em alguns elétrons dos átomos do metal provoca um aumento da energia cinética, fazendo-os saltarem para fora.



De certa forma, os fôtons de luz de Einstein são uma retomada da teoria corpuscular de Newton e nosso mistério continua.

**Afinal, a luz é uma onda ou uma chuva de fôtons?**



## DEBATE

Faça uma analogia entre a teoria corpuscular de Newton e os fôtons de luz de Einstein. Depois, discuta com seus colegas.

Bohr admitiu que quando o elétron recebe energia (térmica ou elétrica, por exemplo) ele poderá passar para uma órbita mais afastada do núcleo, no salto o elétron absorverá um fóton se este tiver a energia suficiente que permita ao elétron ir para uma outra órbita, mais afastada do núcleo. Se o elétron for para uma órbita mais interna, durante o salto o elétron emite um fóton de energia.

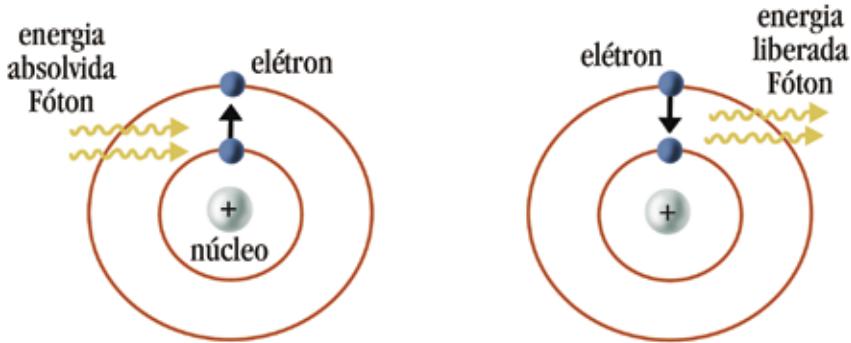


Figura 4: Modelo atômico de Bohr

Naturalmente o elétron fica no estado fundamental, aquele de menor energia quando recebe a energia suficiente, passa para um estado de maior energia (estado excitado), permanecendo nesse estado pouquíssimo tempo, pois rapidamente ele emitirá um fóton e voltará ao estado fundamental.

O sucesso do modelo atômico de Bohr na previsão de fenômenos importantes, praticamente eliminavam as dúvidas de que a matéria ponderável seria descontínua, constituída de pequenos “pedaços”.

Essa teoria quântica de Bohr representava o refinamento máximo alcançado pela teoria atômica, era insatisfatória do ponto de vista de sua consistência e de seus fundamentos, além de sofrer sérias limitações em sua capacidade de previsão quantitativa. Do ponto de vista mecânico, o que havia de mais estranho era a quantização das energias, e portanto das órbitas, dos elétrons. Por que motivo os elétrons não podiam orbitar senão a determinadas distâncias do núcleo?

Intrigado com essa questão, o jovem nobre francês Louis de Broglie (1892-1987) assinalou o seguinte: os fenômenos físicos que exibem uma quantização desse tipo são determinados fenômenos ondulatórios. (O ar nos tubos de um órgão e as cordas de um piano, por exemplo, só vibram em determinadas freqüências.) Também, se os trabalhos de Planck, Einstein e Compton (ver o capítulo 10: A natureza da luz e suas propriedades) havia mostrado que a radiação eletromagnética, tida como um tipo de onda, às vezes se comporta como se fosse composta de partículas, por uma questão estética (simetria) talvez devamos esperar que os átomos, elétrons e outros entes tidos como partículas, às vezes se comportem como ondas...

(Adaptado de: CHIBENI, s/d)

## ■ Uma Natureza Dual

O físico Louis de Broglie incorporou as idéias introduzidas por Einstein, dando passos importantes em direção ao desenvolvimento da mecânica quântica, realizando um trabalho no sentido de associar um modelo ondulatório à teoria corpuscular. Assim, ele postulou que a dualidade também estendia-se às partículas de matéria, como o elétron, que teria característica de onda e de partícula.

Os físicos admitem hoje uma hipótese que abrange as duas teorias. Quando a luz interage com a matéria e ocorre a colisão com elétrons e os fôtons de luz se comportam como partículas de energia, já nos fenômenos da refração e da interferência, a luz se comporta como onda. Isso evidencia a natureza dual da luz, que ora apresenta-se como onda, ora como um feixe de partículas (os quanta de luz). Surgindo assim o termo “dualidade onda partícula”.

Dessa forma, as informações sobre o estado de movimento de uma partícula estão contidas no comprimento e na freqüência da onda. Esse fato determina que a freqüência da onda seja proporcional à energia da partícula e, que a uma onda de alta freqüência está associada uma partícula de alta energia. Por exemplo, a luz violeta possui alta freqüência e pequeno comprimento de onda, consistindo em fôtons de alta energia, e a luz vermelha possui baixa freqüência e longo comprimento de onda, correspondendo a fôtons de baixa energia.

Isso significa que luz é energia radiante em forma de partículas que se propagam através de ondas eletromagnéticas.

E agora, você é capaz de concluir o que é a luz? Pois...

“Chegou-se a discutir qual a metade mais bela.  
Nenhuma das duas era totalmente bela.”

(ANDRADE, Carlos Drummond de)

Podemos afirmar que na análise apresentada sobre as principais idéias físicas, encontramos problemas que ainda não foram solucionados, encontramos obstáculos que desencorajam as tentativas, mas a luta não acabou. Atualmente, os nossos conhecimentos são maiores e mais profundos do que os dos físicos do século passado. Assim, como também são nossas dúvidas e nossas dificuldades na eterna busca para entender o universo que nos cerca.

A busca é sua também, vamos desvendar esses mistérios?

## ■ Referências

ANDRADE, C. D. **Poesia completa.** Vol. Único. Rio de Janeiro: Ed. Nova Aguilar S.A., 2004.

CHIBENI, S.S. O Surgimento da Física Quântica. In: [www.Unicamp.br/~chibeni/texdid/fisquantica.doc](http://www.Unicamp.br/~chibeni/texdid/fisquantica.doc). Acesso em: 30/06/06.

OLIVEIRA, I.S. **Física Moderna** – para iniciados, interessados e aficionados. Vol. 1. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

## ■ Obras Consultadas

BARTHEM, R. **A Luz.** 1.: São Paulo: Livraria da Física, 2005.

CHAVES, A. **Física** – ondas, relatividade e física quântica. Rio de Janeiro: Ed. Reichmann & Affonso, 2001.

CHERMAN, A. **Sobre ombros de gigantes:** uma história da física. Rio de Janeiro: Ed. Jorge Zahar, 2004.

EINSTEIN, A.; INFELD, L. **A evolução da física.** 4. ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Koogan S.A, 1988.

FOLHAIOS, C. **Física Divertida.** Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 2000.

HALLIDAY, D.; & RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física.** Vol. 2. 6. ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2002.

HAMBURGER, E.W. **O que é Física.** São Paulo: Ed. Brasiliense, 1988.

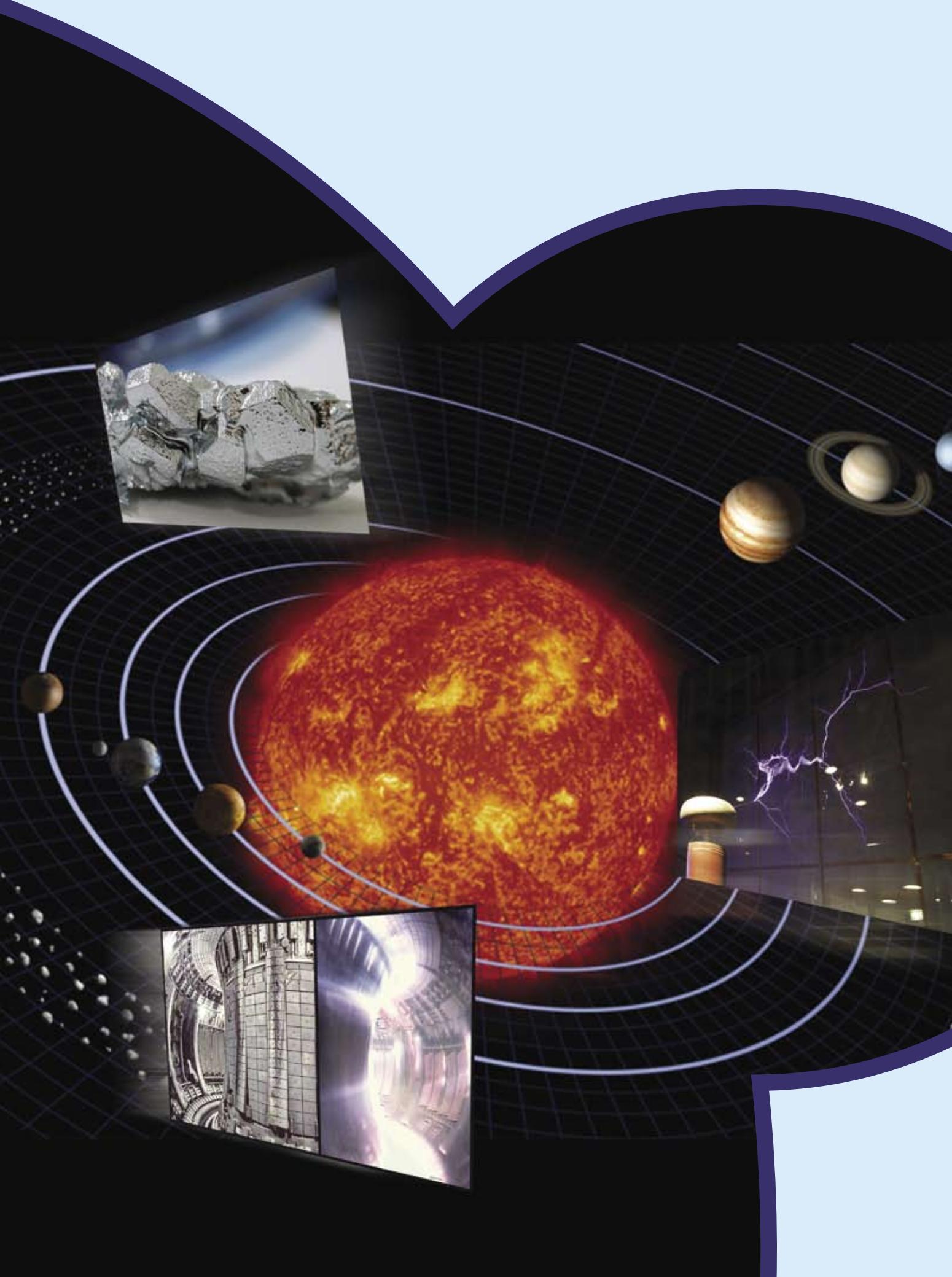
NUSSENZVEIG, M.H. **Curso de Física Básica.** Vol.. 2. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1998.

---

**Curso de Física Básica.** Vol. 4. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1998.



# **ANOTAÇÕES**



# AS TRÊS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

■ Julia Tieko Fujimoto<sup>1</sup>, Ezequiel Burkarter<sup>2</sup>

**D**esde a época dos filósofos gregos, uma das buscas mais intensas tem se dado no sentido de se entender o movimento dos objetos, suas causas e o que mantém a natureza estável. Uma das hipóteses era a de que os movimentos seriam causados, essencialmente, por duas forças. Segundo Empédocles (450 a.C.), uma delas o Amor e a outra o Ódio. A primeira seria a responsável pela aproximação dos corpos, enquanto que a segunda estaria associada à repulsão entre eles.

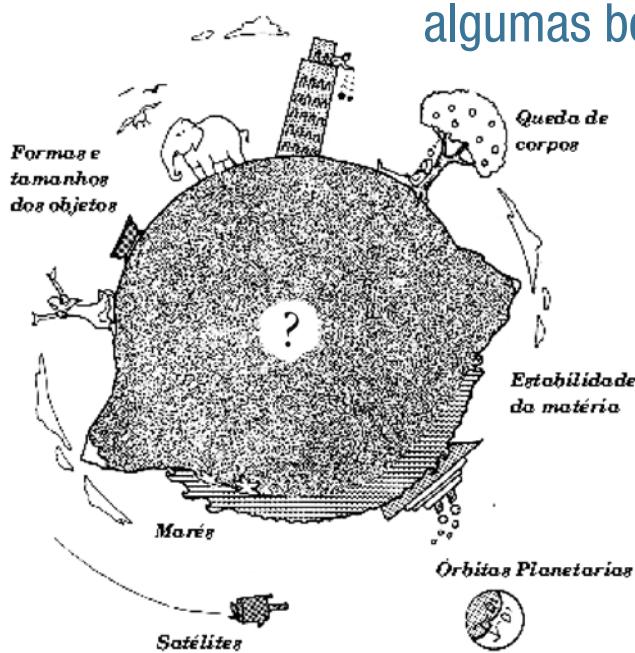
E quanto a você, já se perguntou sobre o que impede que uma pedra se desintegre (permaneça estável) diante de seus olhos?

**Que tipo de força mantém tudo no seu lugar?**

<sup>1</sup>Centro Estadual de Educação Básica para Jovens e Adultos Poty Lazarotto - Curitiba - PR

<sup>2</sup>Colégio Estadual Milton Carneiro - Curitiba - PR

## Gravitação e Eletromagnetismo: algumas boas tentativas...



■ Adaptado de: ISRAELACHVILI, 2003

Muitas tentativas de estabelecer modelos para as forças que mantêm a natureza têm sido empreendidas.

No século XVII, Newton (1642-1727) propôs um modelo para as órbitas dos planetas, a sua Teoria da Gravitação, em que as forças, Equação (1), que atuam entre eles estão ligadas às suas massas ( $m_1$  e  $m_2$ ) e à distância ( $r$ ) entre os corpos.  $G$ , a constante gravitacional, que vale  $6,67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{Kg}^2$ , indica a pequena intensidade dessa força entre corpos de massas pequenas.

$$\mathbf{F} = G \frac{m_1 m_2}{(r_{12})^2} \quad (1)$$

**Mas o fato de uma pedra não se desintegrar está ligado à existência dessa força? A estabilidade da matéria está relacionada apenas com a massa dos corpos?**

Parece pouco, mas essa teoria acabou exercendo grande influência no pensamento filosófico durante os períodos que vieram a seguir.

A dupla revolução, Industrial e Francesa, trouxe benefícios para a ciência. Na França foi criada a Escola Politécnica, em 1795, a qual permitiu o domínio da ciência francesa sobre qualquer outra e gerou matemáticos e físicos que contribuíram para mudar a história da ciência e da humanidade. A supremacia francesa despertou interesses e imitadores em vários lugares da Europa e, em toda a Alemanha, a qual, nesta época, ainda não era Estado Nação tal qual conhecemos hoje. Na verdade, a Alemanha, juntamente com a Itália, só se tornaria um Estado Nação no final de século XIX.

O choque da Revolução Francesa sacudiu a letargia educacional da Prússia, e a nova Universidade de Berlim (1806-10), fundada como parte do despertar prussiano, tornou-se modelo da maioria das universidades alemãs que, por sua vez, viriam a criar o padrão das instituições acadêmicas em todo o mundo. Nenhuma reforma ocorreu na Grã-Bretanha, onde a revolução política não ganhou nem perdeu, mas permitiu o desenvolvimento de uma educação técnica e científica com bons resultados. Surgiram as associações para o progresso da ciência, as quais mobilizaram a ajuda das indústrias nas províncias. No entanto, mesmo na Alemanha, o primeiro laboratório universitário de pesquisa química não foi instalado até 1825. Desnecessário dizer que a inspiração foi francesa. Havia instituições na França e na Grã-Bretanha que formavam técnicos, enquanto a França e a Alemanha formavam professores, para criar na juventude um espírito de serviço a seu país.

A era revolucionária, portanto, fez crescer o número de cientistas e eruditos e estendeu a ciência em todos os seus aspectos. E ainda mais, viu o universo geográfico das ciências se alargar em duas direções. Em primeiro lugar, o progresso do comércio e o processo de exploração abriram novos horizontes do mundo ao estudo científico e estimularam o pensamento sobre eles e, em segundo lugar, o universo das ciências se ampliou para abraçar países e povos que até então só tinham dado contribuições significantes. (Adaptado de HOBSBAWN, 2005, p. 386)

No final do século XIX, os trabalhos de cientistas, como Faraday (1791-1867), Gauss (1777-1855), Ampère (1775-1836), Lorentz (1853-1928) e especialmente Maxwell (1831-1879), acabaram fazendo uma unificação dos fenômenos elétricos e magnéticos. Por conta dessa unificação, os eventos ligados a essas duas áreas passaram ser associados ao que chamamos de Eletromagnetismo. A Equação 2 mostra a Força de Lorentz, que age sobre partículas submetidas a campos eletromagnéticos. O primeiro termo está ligado à força colombiana. Dependendo do sinal da carga, essa força pode ser repulsiva ou atrativa, a constante  $k$  vale  $8,99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ . O segundo termo está ligado ao movimento das cargas, com velocidade  $v$ , num campo magnético  $B$ .

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} + q v \mathbf{B} \quad (2)$$

A medida do vetor campo elétrico  $\mathbf{E}$  que fica submetido uma carga  $q_1$  num ponto qualquer do espaço é dado por  $\mathbf{F} = q_1 \mathbf{E}$ . Combinando com o primeiro termo da equação 2 a Força de Lorentz é escrita como:

$$\mathbf{F} = q_1 \mathbf{E} + q v \mathbf{B}$$

Onde:  $q_1 = q$

$$\mathbf{E} = K \cdot \frac{\mathbf{q}_2}{\mathbf{r}^2}$$

O primeiro termo da equação está ligado ao campo elétrico produzido pela carga  $q_1$  num ponto distante  $\mathbf{r}$  da carga  $q_2$ .



## ATIVIDADE

Comparando as equações 1 e 2, você pode perceber alguma semelhança do papel da carga em relação à Força Eletromagnética, e o papel da massa na Força Gravitacional? Será que essas duas entidades têm alguma coisa a ver com a estabilidade da matéria? Outrossim, compare a constante  $K$  com a  $G$ . O que você pode dizer sobre a intensidade das forças Eletromagnética e Gravitacional.

Até o final do século XIX, os físicos encaravam o universo baseado no modelo mecânico de Newton, o que estabelecia o universo como uma máquina, em que as forças e matéria atuam como que engrenagens. As radiações eram entendidas como que constituídas por ondas eletromagnéticas, oscilações de campos elétricos e magnéticos, os quais se propagavam de acordo com as quatro leis de Maxwell.

A própria natureza ondulatória da luz foi entendida por meio do eletromagnetismo, pois se entendia que a luz era uma onda que combinava campos elétricos e magnéticos.

Trabalhos experimentais do final do século XIX indicaram, além dessa natureza ondulatória, também uma natureza granular para a luz. Os grãos de luz foram chamados de fôtons, e seriam como que pacotes de energia. Ora, se a luz é resultado da combinação de campos elétricos e magnéticos, era de se supor que esses campos também fossem granulares. Assim, trabalhos apresentados na primeira metade do século XX levaram à idéia de que os eventos ligados ao eletromagnetismo ocorriam por meio da troca (emissão e absorção) de fôtons entre cargas.

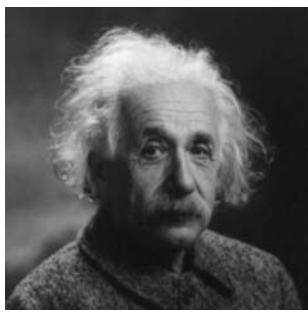
**Mas e as forças que mantêm tudo no seu lugar?**

**Melhor continuar a leitura!**



## ATIVIDADE

A compreensão da natureza granular da matéria, em particular no modelo atômico de Bohr, está ligada ao desenvolvimento de uma área da Física chamada Mecânica Quântica. Os fótons seriam pacotes de energia, o que se chamou de quanta de energia, ou o mínimo da energia – os grãos. Procure numa biblioteca mais próxima a relação da idéia de fóton com o modelo atômico de Bohr.



■ Albert Einstein (1879-1955) Propôs a teoria da relatividade, contudo recebeu prêmio Nobel em 1921 em Física pela explicação do efeito fotoelétrico. Fonte: <http://pt.wikipedia.org>

### ■ Natureza Granular da Matéria: mais passos na direção das forças

A visão do universo mecanicista do século XVII teve sua morte anunciada em 1887, quando Albert Michelson (1852-1931) e Edward Morley (1838-1923) realizaram um experimento que revolucionou aquela visão. Eles buscavam comprovar a existência do éter, um meio criado para propagação das ondas luminosas. O éter precisou ser inventado para dar coerência a teoria e porque não era concebível uma onda propagar-se sem um meio. Assim como o som de um violão se propaga pelo ar, as ondas do mar através da água, também a luz deveria ter um meio, o éter.

O problema é que a luz insistia em manter a sua velocidade constante e, diante do fato de que nada do que fora previsto aconteceu, os físicos viram o início da ruína do seu universo, ou pelo menos de suas certezas. Em 1905, com os trabalhos de um alemão de nome Albert Einstein (1879-1955), a certeza estaria para sempre banida da ciência, ou muito fragilizada.

De fato, até meados do século XX, a ciência era praticamente toda desenvolvida na Europa, e seu idioma era o alemão. Tanto é que os trabalhos de Albert Einstein (1879-1955) foram publicados na revista alemã *Annalen der Physik*, no ano de 1905, o ano miraculoso do cientista. E de lá viriam cientistas com o talento de Arnold Sommerfeld (1868-1951) e de Max Planck (1858-1947), o qual é considerado o pai da Física Quântica.

Pelo que temos visto, os planetas estão em suas órbitas por causa, essencialmente, da força gravitacional exercida pelo Sol e entre eles mesmos. Além disso, no final do século XIX e início do século XX, o desenvolvimento dos modelos atômicos de Rutherford, Bohr e Sommerfeld, além do desenvolvimento da mecânica quântica, fortaleceram a idéia da natureza granular da matéria – tudo sendo constituído de átomos.

Outras pesquisas na primeira metade do século XX apontavam para o fato de que quase tudo o que vemos é resultado da união de ele-

mentos químicos através de ligações químicas, sejam elas iônicas, covalentes ou metálicas. Tais ligações, que dão origem a ligas metálicas, cristais e moléculas (Figura 1), por exemplo, têm, essencialmente, uma natureza eletromagnética, ou seja, resultam de processos que envolvem atração ou repulsão de cargas elétricas ou íons (elementos que perdem ou ganham elétrons).

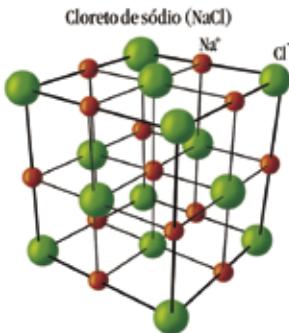


Fig. 1a: Representação da estrutura cúbica de um cristal de  $\text{NaCl}$ .

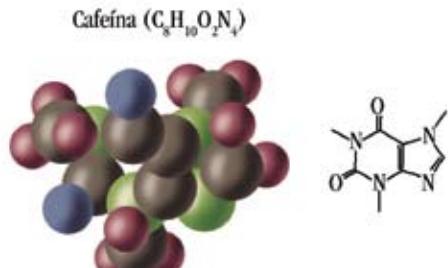


Fig. 1b: Representação da molécula da cafeína.



## PESQUISA

O mais importante resultado do trabalho de Rutherford foi a descoberta do núcleo atômico. Pesquise, em textos de física ou química, como foi realizado o experimento e em que a idéia de repulsão coulombiana ajudou. Esteja atento à técnica do bombardeio do material estudado, pois foi fundamental para o desenvolvimento da Física Nuclear.

Quase tudo que acontece na eletrosfera do átomo foi estudado e, numa primeira leitura, qualquer um poderia achar que tudo estava resolvido! Entretanto, pouco se sabia sobre o núcleo do átomo, e este passava a ser um assunto de grande interesse para os físicos.

## O Núcleo Atômico: O homem brincando com os tijolinhos da matéria

As dimensões do núcleo são tão pequenas que os tamanhos a ele associados são escritos em termos de uma unidade de medida de comprimento chamada fermi (F), cuja equivalência com o metro é:  $1\text{F} = 10^{-15}\text{m}$ . As investigações a respeito do núcleo atômico custam muito caro – mas muito mesmo! Quem iria financiar um projeto de pesquisa com o único objetivo de conhecer melhor os fenômenos que cercam o núcleo sem uma perspectiva de aplicação? A resposta veio através de uma das mais antigas formas de interação entre seres humanos, a guerra.

Apesar da presença de alguns importantes físicos teóricos, praticamente não havia tradição de Física Teórica nos Estados Unidos até meados do século XX. Em pouco tempo esse quadro foi alterado. A Segunda Guerra Mundial mudou o centro de excelência para o outro lado do Atlântico com a imigração maciça de cientistas. No entanto, a imigração de europeus para os Estados Unidos começara muito antes, no fim do século XIX e início do século XX. A combinação de um sistema educacional público e a vinda de professores que realizavam pesquisas de ponta em seus países de origem, tornou o país um solo fértil para um desenvolvimento científico sem precedentes, despertando o interesse de jovens filhos de imigrantes ávidos por uma situação social mais segura, a qual poderia ser obtida através de uma sólida educação. (Adaptado de ROSENFELD, 2003, p. 19)

No começo de 1920, na Alemanha, organizaram-se as primeiras manifestações anti-semitistas, já anunciando o perigo de uma ascensão nazista. Planck escolheu ficar na Alemanha, talvez pela idade já avançada acreditasse no fim do nazismo. Nessa época surge, na Alemanha, a liga anti-Einstein, que oferecia quantidades em dinheiro para quem contestasse a obra de Einstein. Em 1933, diante da insegurança de viver na Alemanha, Einstein mudou-se para Princeton (EUA). Planck, ao contrário, viu seu filho, após ter participado de um atentado contra Adolfo Hitler (1889-1945) em 1944, ser executado pelos alemães, além de ter vivido a destruição de sua residência e sua biblioteca.

Em 1939 Otto Hahn (1879-1968) e Fritz Strassmann (1902-1980) descobriram a fissão nuclear, processo em que ocorre a liberação de uma grande quantidade de energia na forma de radiação.

Na verdade, a fissão já tinha sido conseguida em 1934, por Fermi (1901-1954), na Itália, e por Irene (1897-1956) e Frederic Joliot-Curie (1900-1958), na França. No entanto, ela fora compreendida e interpretada em 1938, por Lise Meitner (1878-1968) e Otto Frisch (1904-1979). Lise era judia e havia se exilado na Suécia, de onde trocava correspondência com Hahn. Essa foi a forma encontrada para se saber de resultados de experimentos, relacionados aos trabalhos que haviam desenvolvidos juntos, ela, Hahn e Strassmann, em 1938.

O experimento bombardeava o núcleo do urânio com nêutrons lentos e, desse processo, surgiam núcleos de bário. Como não se sabia como o Bário surgia, Lise e Frisch deram o nome de fissão, imaginando que o urânio havia rompido durante o processo, isto é, o núcleo deveria ter-se fissionado.

A radiação liberada no processo comportava-se como se fosse um pacote de energia, as partículas  $\alpha$  radioativas. Dependendo do tipo de fissão, são emitidas partículas  $\alpha$  (núcleo de átomo de Hélio), ou partículas  $\gamma$  (que são fótons). Nesse sentido, falar em energia granular parece implicar no fato de a força também ser granular.

Quase toda a energia liberada num processo de fissão se dá sob a forma de energia cinética das partículas emitidas. Para se ter uma idéia dessa energia, podemos dizer que é cerca de um milhão ( $10^6$ ) de vezes a energia de uma reação de combustão em que uma molécula de oxigênio é consumida.

Lembrando-se de que: No interior de um núcleo, em um espaço muito pequeno, 1F, estão contidos os prótons, todos carregados positivamente. A energia de repulsão Coulombiana entre os prótons é muito grande em átomos cujos núcleos têm Z elevado, o que os torna instáveis. Se um núcleo é instável, ele tende a se desintegrar, dividindo-se (como uma gota de água que se divide em duas ao ser agitada), geralmente, e em dois menores, chamados “núcleos filhos”. Às vezes os núcleos filhos também são instáveis, e o processo continua até a formação de núcleos estáveis. “Trata-se de uma série de desintegração radioativa”. Um exemplo dessas séries é a do urânio, descoberta por Hahn e Strassman, que começa com  $_{92}^{U}U^{238}$  e termina com chumbo ( $_{82}^{Pb}Pb^{206}$ ), que é estável.

Por volta de 1939, a potencialidade do uso desses fenômenos como arma em uma guerra eram óbvias no seio da comunidade científica, especialmente com a eminência da Segunda Guerra Mundial.

Em meados de 1939, os físicos Leo Szilard e Eugene Wigner fizeram uma visita a Einstein, em Nassau Point, nas vizinhanças de Peconic. Os dois físicos, estavam preocupados porque sabiam que, caso a Alemanha pretendesse construir uma bomba, iria necessitar de grande quantidade de urânio. Depois de haver-se apossado da Checoslováquia, na primavera de 1939, um dos primeiros atos de Hitler foi proibir exportação de urânio das minas checas: segura indicação de que os alemães lhe reconheciam a importância. Szilard sabia que Einstein tinha um bom relacionamento com a família real belga e que escrevia, periodicamente, à rainha Elizabeth. Então, pretendiam que Einstein conhecesse a situação do urânio, a fim de que escrevesse a rainha, pois a Bélgica exercia controle sobre depósitos de urânio do Congo Belga. Era preciso impedir que esses depósitos caíssem na mão dos alemães e manter uma rota de suprimento aberta para os Estados Unidos da América. (Adaptado de BERNSTEIN, 1973, p. 180-181)

Assim, um grupo de personalidades do meio científico, sob a liderança de Einstein, enviou uma espécie de abaixo assinado ao governo dos Estados Unidos, recomendando a produção da tal arma antes que Hitler o fizesse.

Senhor Presidente

Trabalho recente, realizado por E. Fermi e L. Szilard e a mim dado a conhecer em manuscrito, leva-me a esperar que, em futuro imediato, o elemento urânio possa ser transformado em nova e importante fonte de energia. Certos aspectos da situação parecem exigir atenção e, se necessário, ação rápida por parte da Administração. Creio, portanto, ser meu dever pedir-lhe que atente para os seguintes fatos e recomendações.

Nos últimos quatro meses, fez-se provável – em razão dos trabalhos de Joliot, na França, e de Fermi e Szilard, nos Estados Únicos – que venha a ser possível provocar reações nucleares em cadeia, atingindo vasta massa de urânio, com o que seriam geradas grande quantidade de energia e grande quantidade de elementos semelhantes ao rádio. É quase certo que isso possa ser feito em futuro imediato.

Esse novo fenômeno levaria à construção de bombas e é concebível ... Uma única dessas bombas, transportada por barco ou feita explodir em um porto, destruiria todo o porto e locais vizinhos. (...)

Os Estados Unidos da América só dispõem de minérios no Canadá e na antiga Checoslováquia, porém a mais importante fonte de urânio é o Congo Belga. (...)

Entendo que a Alemanha suspendeu a venda de urânio das minas de que se apossou da Checoslováquia. Ter ela assim agido talvez se ligue ao fato de o filho do Subsecretário de Estado da Alemanha, von Weizäcker, atuar junto ao Kaiser Wilhelm Institut, em Berlim, onde algum dos trabalhos norte-americanos a respeito do urânio vêm sendo agora repetidos.

Muito atenciosamente

A. Einstein

(Adaptado de BERNSTEIN, 1973)

O Presidente Franklin Roosevelt (1882-1945) decidiu financiar o que tornou conhecido como “Projeto Manhattan”, em que foram construídas as duas primeiras bombas atômicas americanas. Em 1943, o laboratório para tal intento foi construído na região deserta de Los Alamos, no estado americano do Novo México. A divisão teórica do projeto era dirigida pelo físico alemão Hans Bethe (1906 – 2005), um especialista em Física Nuclear que havia deixado a Alemanha porque sua mãe era judia.

Mesmo com a rendição dos alemães e a proximidade de rendição dos japoneses, conforme registrou a história, o governo americano lançou as bombas atômicas sobre duas cidades japonesas. Veio a rendição dos japoneses, e o “sucesso” do uso bélico das energias do núcleo desencadeou uma corrida, especialmente durante a Guerra Fria, para se entender os fenômenos que ocorrem nesta pequena região do átomo. Além da concepção granular da matéria, também se cogitava uma concepção granular das forças, como se ocorressem devido à emissão e absorção de partículas. Possivelmente o núcleo atômico guardava segredos sobre esse assunto.

**Estaria a natureza granular das forças relacionada à estabilidade da matéria?**



Fonte: www.radgraphics.net

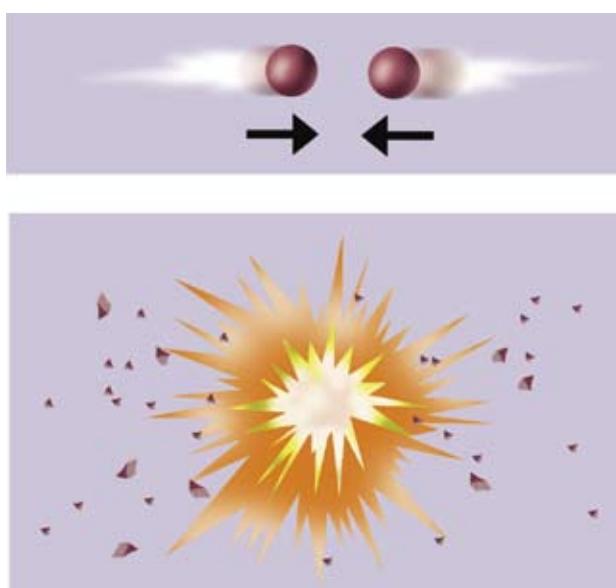
## ■ Interações Fundamentais: novas formas de se fazer antigas perguntas

Devido à grande quantidade de energia armazenada, muitos estudos se encaminharam para o núcleo. Particularmente no sentido de se saber se seus constituintes são os grãos fundamentais da matéria. Nessa abordagem, ao invés de se falar em forças entre corpos, passou-se a falar de interações, e no caso de partículas fundamentais, interações fundamentais.

Durante algum tempo acreditou-se que só existiriam quatro partículas fundamentais: elétrons, prótons, nêutrons e fôtons. Mas alguns eventos começaram a alterar essa realidade.

Constantemente o nosso planeta é bombardeado por núcleos de átomos, são o que chamamos de raios cósmicos, o Sol é uma das fontes desses raios. Por conta das altas energias que envolvem esses processos, os estudos de raios cósmicos realizados tornaram-se uma valiosa fonte de informação sobre os núcleos atômicos. Tais estudos contribuíram, por exemplo, para a descoberta do pósitron, uma antipartícula do elétron (daí também a denominação de antielétron).

Os pesquisadores perceberam que, como no experimento de Rutherford, uma boa maneira de estudar um objeto é atirar pequenos projéteis sobre ele. Assim, foram construídos aceleradores de partículas, onde prótons, por exemplo, são submetidos a campos elétricos e magnéticos bastante intensos e postos a se mover e a colidir entre si ou com outras partículas. Os “cacos” (energia ou partículas), Figura 2, resultantes desses choques violentíssimos fornecem informações preciosas sobre o núcleo, inclusive, como veremos, a existência de outras partículas.



■ Fig. 2: Ilustração das colisões de partículas em aceleradores e os cacos que acabam dando informações sobre a constituição da matéria.  
Adaptado: Rosenfeld, 2003



## PESQUISA

No Brasil existem dois aceleradores de partículas, um deles localizado na Universidade de São Paulo (USP) e outro localizado em Campinas-SP, no Laboratório Nacional da Luz Sincrotron (LNLS), foto ao lado. Procure fazer uma pesquisa tratando do uso dos aceleradores de partículas no Brasil.

Quais são suas aplicações? Que órgãos financiam as pesquisas? Quanto custam essas pesquisas? Uma boa dica é acessar o sítio do LNLS: [www.lnls.br](http://www.lnls.br)



## ■ Um outro tipo de interação para um comportamento esquisito...

Com o avanço dos estudos sobre o núcleo, mais processos ligados a este foram sendo descobertos. Um desses processos é o decaimento Beta ( $\beta$ ). O exemplo mais comum desse tipo de decaimento é quando um nêutron se desintegra, transformando-se num próton e num elétron.

A desintegração, ou decaimento,  $\beta$  pode ser de dois tipos: a desintegração  $\beta^-$ , onde o núcleo de número atômico  $Z$  decai num núcleo descendente com número atômico  $Z+1$ , com a emissão de um elétron; e a desintegração  $\beta^+$ , onde um próton se transforma num nêutron com a emissão de um pósitron. Na desintegração  $\beta^+$ , o número atômico  $Z$  do núcleo diminui de uma unidade. Num primeiro momento, as partículas emitidas nesses processos foram chamadas de partículas  $\beta$ , posteriormente descobriu-se, que se tratava de elétrons e pósitrons.

Devido ao fato de os processos ligados ao decaimento  $\beta$  serem tão peculiares, entendeu-se que se tratava de uma das interações fundamentais da matéria. Supostamente esse decaimento seria causado por uma força, que se chamou “Força Nuclear Fraca”. Agora, além das forças eletromagnética e gravitacional, temos ainda a força nuclear fraca, a responsável pelo decaimento  $\beta$ .

Seriam essas as forças responsáveis pela estabilidade (e pela instabilidade) da matéria?



## PESQUISA

Em geral, a idéia da existência de antipartículas parece obra de ficção. A grosso modo, quando uma partícula encontra a sua antipartícula, o par acaba se aniquilando. Procure, numa biblioteca ou na internet, exemplos de pares partícula/antipartícula e discuta, com seu professor e colegas, os processos de aniquilação. Em caso de dificuldades não se assuste, enquanto você lê este texto muitos cientistas também estão tendo dificuldades para entender esses processos.

## Mais uma força, e agora uma bem forte!

Através dos aceleradores de partículas, descobriu-se um outro tipo de interação, responsável por manter prótons e nêutrons “juntinhos” no núcleo do átomo. Como já foi dito, por terem cargas de sinais iguais, os prótons tendem a se repelir pela interação coulombiana. A interação que os mantém unidos no núcleo deve ser, portanto, muito mais intensa que a coulombiana. Por essa razão foi chamada de “Interação Forte” ou “Força Nuclear Forte”, que é atrativa e pelo menos 10 vezes maior que a repulsão coulombiana ( $F_e$ ) entre prótons.

A título de comparação, a interação forte ( $F_F$ ) chega a ser  $10^{40}$  vezes mais intensa que a gravitacional ( $F_G$ ) e cerca de  $10^{15}$  vezes a interação fraca ( $F_f$ ), como mostra a relação a seguir:

$$F_F \approx 10 F_e \approx 10^{14} F_f \approx 10^{25} F_G$$

Um físico japonês chamado Yukawa (1907-1981) propôs, em 1935, que as interações no núcleo também eram mediadas por conjuntos de partículas, as quais ele chamou de *mésons* ou *píons*. Essas partículas também acabaram sendo descobertas nos aceleradores de partículas. Assim, as interações fortes ocorrem por meio da troca (sucessivas emissões e absorções) dessas partículas entre os *núcleons* (os prótons e os nêutrons), como se os prótons ficassem jogando uma partida de tênis em que a bola é um *méson*.

Mas havia vários tipos de *mésons*, aparecendo a necessidade de ordená-los. A descoberta de um dos tipos de *mésons*, o *méson π*, teve um brasileiro, o Professor Cesar Lattes (1924-2005), um dos principais responsáveis, chegando a ser indicado para o Prêmio Nobel da Física.

Outra característica da interação forte, é que ela não depende da carga elétrica, pois ocorre entre prótons, que possuem carga positiva, e entre nêutrons, que não possuem carga elétrica. Outra evidência dessa característica é o fato de ocorrer espalhamento entre prótons e nêutrons nos aceleradores de partículas. Ou seja, a força entre prótons e prótons é a mesma que ocorre entre nêutrons e prótons, e, portanto, independe da carga. Destacamos ainda que essa interação se manifesta no núcleo, seu alcance é de cerca de  $2 F$ , muito pequeno. Compare isso com a força gravitacional, que embora de pouca intensidade é sentida a distâncias astronômicas.

## Partículas, muitas partículas! Partículas para todas as serventias.

Com os aceleradores de partículas e os detectores de raios cósmicos, um grande número de partículas foi sendo descoberto. Um dos físicos que coordenou o “Projeto Manhatann”, Prof. Oppenheimer (1904-1967), chegou a mencionar um “zoológico de partículas”, ao se referir à quantidade de partículas e propriedades associadas.

A essa época, um pesquisador chamado Murray Gell-Mann, de origem judaica, procurou estabelecer um modelo teórico que organizasse o mundo das partículas subatômicas. Gell-Mann, que também tinha uma leve queda por estudos de lingüística, procurou catalogar as partículas existentes por meio de certos padrões. Contemplemos, com um pouco mais de atenção, o trabalho de Gell-Mann!

Quando se fala em interações eletromagnéticas, conseguimos distinguir prótons e nêutrons, mas em se tratando de interação forte, eles são aproximadamente idênticos. Para facilitar a compreensão do que propunha, Gell-Mann fez uso de seus dotes de lingüista, e chamou de *hádrons* todas as partículas que interagem via interação forte. Esse é o caso dos prótons e dos nêutrons. Por conta disso, essa interação passou a ser também conhecida como “força hadrônica”. Os elétrons, que não sentem a interação forte não são hádrons, sendo denominados *léptons*. Os hádrons mais leves foram chamados de mésons, e os mais pesados, chamados de *bárions*.

Notemos em Gell-Mann um atributo humano muito forte, o de dar nome às coisas para poder se fazer entender. No *Gênesis* bíblico, Deus dá ao homem a tarefa de nominar os animais e as plantas. Temos um nome para quase tudo a nossa volta, e quando não sabemos os nomes, podemos nos achar em situações embaralhadas. Assim havia também a necessidade de se dar nome às partículas subatômicas, para que a própria comunidade científica pudesse se comunicar.

Yuval Ne`eman (1925-2006), coronel do exército israelense e engenheiro de formação, mas que se dedicava à Física Teórica por uma questão de paixão, percebeu que os bárions podiam ser constituídos de três partículas. Até aqui você ouvia falar que a carga elétrica sempre seria encontrada em múltiplos inteiros da carga do elétron ( $1,6 \times 10^{-19} C$ ), contudo, nessas partículas, a carga seria uma fração desse valor.

Um físico inglês de nome Zweig deu a essas partículas o nome de *aces*, que significa ases, em inglês, mas, digamos que esse nome não pegou. Gell-Mann procurou dar um nome mais charmoso e pensou em *quirks*, que em inglês significa fora do comum. Mas folhando um livro de James Joyce (1882-1941), um escritor irlandês que gostava de inventar palavras, deparou-se com os versos “*Three quarks for Muster Mark*”, do qual extraiu o nome *quark*, para os constituintes bárions.

Os bárions seriam compostos por três *quarks* e os mésons seriam feitos de um par *quark-antiquark*.

No final dos anos sessenta, no *Stanford Linear Accelerator Collider* (SLAC, do inglês, Acelerador Linear para Colisões) foi realizado um estudo parecido com o de Rutherford, só que agora voltado para o próton. A idéia era acelerar elétrons para que suas colisões com os prótons fornecessem informações sobre este. Se o próton fosse uma partícula elementar, os elétrons iriam ricochetear, como num choque de duas bolas de bilhar. Mas os experimentos revelaram que os prótons eram, na ver-

dade, como um pacote que continha três partículas (imagine alguém atirando pedras numa sacola cheia de bolinhas de gude).

Além de revelar a existência dos *quarks*, o experimento também confirmava a hipótese de eles possuírem cargas fracionárias.

Assim como os átomos, os prótons também não são partículas fundamentais. Na verdade, são compostos de quarks, mas especificamente dois quarks up (u) e, um quark down (d), Figura 3.

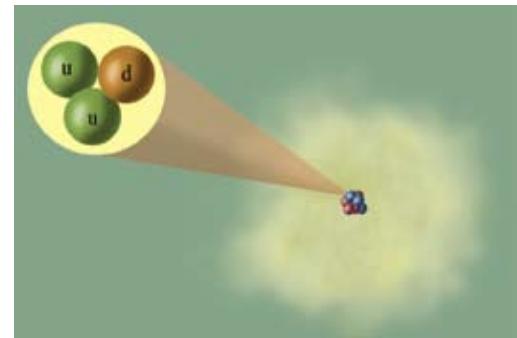


Fig. 3: Ilustração dos quarks no interior de um próton.  
(Adaptado de: Rosenfeld, 2003)

## Transmissão das Interações, mais um caso para as partículas

**Retomando a nossa pergunta inicial para o caso dos *quarks*, que tipo de força os mantém unidos?**

Em 1972, Gell-Mann, trabalhando com o físico alemão Harald Fritzsch, elaborou uma teoria para a descrição das interações entre *quarks*, em termos da força forte. Mas como temos dito, as interações eletromagnéticas surgem essencialmente por causa das cargas elétricas, e a interação gravitacional surge por conta da massa (a essa altura não seria interessante dizer “carga massa”?), mas qual a carga que dá origem à interação forte. No modelo de Gell-Mann e Fritzsch, a carga forte pode ser de três tipos diferentes. Hora do Gell-Mann lingüista entrar em ação! Ele chamou essas cargas de cores. As cargas elétricas podem ser positivas e negativas, e as “cargas de cor” (como foram chamadas) seriam vermelho, verde e azul (não confunda com as cores percebidas pelos seus olhos).

Além da natureza granular da matéria, uma forte tendência, sobre tudo na segunda metade do século XX, foi o estabelecimento de uma espécie de natureza granular das interações.

**A interação eletromagnética é mediada pela troca de fôtons. Mas e a interação forte? E a interação fraca? E a gravitacional?**

Na interação forte existem oito partículas responsáveis por colar os *quarks* dentro dos hadrons. Como em inglês o termo *glue* significa cola, essas partículas receberam o nome de *glúons*. Assim, por conta das suas cargas de cor e dessa mediação por glúons, a área da física que estuda as interações fortes (particularmente entre quarks) também é chamada de “Cromodinâmica Quântica”, ou para os íntimos, QCD.

A interação fraca é transmitida por meio de partículas conhecidas pelas letras W e Z. Os fôtons e os glúons não têm massa, mas as partículas W e Z possuem massa equivalente à massa de 90 prótons. A carga fraca (um análogo da carga elétrica, da massa ou da carga de cor, é a “carga sabor”, que pode ser de oito tipos.

**E quanto à interação gravitacional, não seria também mediada por uma ou mais partículas?**

Sim, a interação gravitacional, em princípio, também é mediada por uma partícula, o *gráviton*. Alguns pesquisadores acreditam que os *grávitons* seriam emitidos por uma estrela na fase final de sua existência, quando se transformará num buraco negro, mas não há evidências da existência desse tal *gráviton*.

E como fica a estabilidade da matéria? Note, temos visto modelos para as forças e para a transmissão dessas forças.

## ■ Teorias de Unificação: as atuais tentativas de organização

Já nos anos setenta, Steven Weinberg e colaboradores formularam uma teoria unificadora que colocou as interações eletromagnéticas e a interação por força fraca dentro de uma mesma categoria. Esses dois tipos de interação são considerados manifestações diferentes de uma interação mais fundamental, a “interação eletrofraca.”

Portanto, ao invés de quatro interações, os modelos atuais apontam para três tipos de interações fundamentais.

A combinação entre o modelo dos quarks, a teoria eletrofraca e a cromodinâmica quântica constitui o que os pesquisadores chamam de “Modelo Padrão”. Nesse modelo, as partículas fundamentais são os léptons e os quarks, enquanto que as interações são transmitidas pelos fótons, pelos glúons e pelas partículas W e Z. Quase todas as forças da natureza provêm de uma dessas interações.

Uma das buscas de pesquisadores como Einstein é a possibilidade de se descreverem todas as forças da natureza mediante uma teoria unificada. Esta é uma questão aberta. A busca permanece, tanto por trabalhos experimentais, que tratam da desintegração de partículas, como por trabalhos teóricos, que tentam refinar os modelos.

Nas palavras do Professor Rogério Rosenfeld (2003): “os físicos teóricos sempre desenvolverão seus modelos, mas cabe à natureza a palavra final”. De qualquer forma, continuamos a busca iniciada pelos filósofos do passado. Aparentemente, já fomos um pouco além do amor e do ódio.

## ■ Referências

BERNSTEIN, J. **As idéias de Einstein**. São Paulo: Editora Cultrix Ltda, 1973.

HOBESBAWM, E. **A era das Revoluções**. 19. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2005.

ROSENFELD, R. **Feynman & Gell-Mann** – Luz, Quarks, Ação. São Paulo: Odysseus Editora LTDA., 2003

## ■ Obras Consultadas

ATKINS, P. **Princípios de Química**. Porto Alegre: Artmed Editora S.A., 2001;

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica** - Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1979.

ISRAELACHVILI, J. N. **Intermolecular and Surface Forces**. 2. ed. Santa Bárbara: Academic Press, 2003.

RUSSELL, J. B. **Química Geral**. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil LTDA, 1982.