

NOVOS HORIZONTES PARA A FÍSICA NO FIM DO SÉCULO XIX -
NOTAS SUMÁRIAS

J. Leite Lopes
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Abstract

A short description is given of the evolution of physics in the XIXth century. After the beginning of physics with Galileo, Huygens and Newton, the notions introduced by Carnot and Joule, Helmholtz and Mayer on heat led to the great work of Clausius who founded thermodynamics. The work developed by Gibbs, Boltzmann and Maxwell in building statistical mechanics is recalled as well as the contributions of Faraday and Maxwell to electrodynamics and of Young and Fresnel to the wave theory of light. Finally, the last decade of last century saw the amazing number of discoveries which led to the emergence of the theory of relativity, atomic and nuclear physics and of quantum mechanics.

I- O século XVII: Galileo, Huygens, Newton

No século XVII nasceu a Física - uma revolução na concepção e na imagem (racional) do mundo, uma nova linguagem, uma nova filosofia deram lugar à Física como ciência. Após as críticas ao sistema Cosmogônico e à Física de Aristóteles, que surgiram na Idade média, formuladas principalmente por Jean Philippon (século VI), por Jean Buridan e Nicolas Oresme (século XIV), e por Leonardo da Vinci e Jean-Baptiste Benedetti, surgiu finalmente Galileo Galilei (1564-1642) que realizou a primeira grande síntese epistemológica ao afirmar que as leis dos movimentos dos corpos na Terra são as mesmas que as leis que descrevem os movimentos dos corpos no céu.

Como se sabe, as sociedades antigas descreviam a natureza por mitos, atribuindo os fenômenos a seres superiores e coletando sucessivamente observações que permitiram aos fenícios dominar a arte da navegação, aos babilônios e aos egípcios reparar as posições dos astros em movimento em relação às estrelas fixas - e prever eclipses solares e lunares.

Mas foi com o súbito aparecimento dos pensadores na Grécia que surgiram as primeiras perguntas sobre a natureza das coisas e dos acontecimentos que nos envolvem. Para Tales, de Mileto, há 585 anos antes de Cristo, todos os corpos são feitos de uma única substância primordial que ele identificou com a água; seu discípulo Anaximandro, disse que a substância primordial não seria a água, nem nenhum dos corpos conhecidos; seria antes uma substância eterna, infinita, a substância básica de todos os mundos. Surgiu, assim, pela primeira vez, a idéia de um constituinte primordial de todas as coisas; para Pitágoras,

todas as coisas são números um precursor dos físicos modernos que ressuscitaram, no século XVII, a idéia atômica de Leucipo e Demócrito - formulada há cerca de 420 anos A.C. - e para as quais a explicação das coisas, ou pelo menos, a sua descrição última se encontra nas idéias matemáticas, nos grupos de simetria e suas representações, quarks, leptons e campos de calibre.

Os historiadores da ciência dirão como foi lenta a evolução do pensamento, pois duraram vinte séculos a imagem cosmogônica do universo formulada por Aristóteles e sua física, desde o ano 322 A.C., ano da morte de Aristóteles, até o ano de 1610 D.C., ano de publicação do Messageiro das estrêlas, por Galileo, no qual revelou um universo observado, distinto daquele dogmatizado por Aristóteles, Tomás de Aquino e a Santa Inquisição.

Coube ainda a Galileo a primeira tentativa para medir a velocidade da luz (na propagação entre os vértices de dois morros vizinhos), tentativa que conduziu Olaüs Römer (1644-1716) a um resultado aproximado ao valor $300.000 \text{ km.s}^{-1}$ utilizando os satélites de Jupiter que haviam sido descobertos por Galileo.

A Física avança, pois, no século XVII e após Galileo, surge o grande físico holandês Christiaan Huygens (1625- 1695), que descobriu o primeiro satélite de Saturno e desenvolveu a teoria ondulatória da luz com o seu famoso princípio segundo o qual cada ponto de uma frente de onda luminosa é fonte de pequenas ondas cuja envoltória é a nova onda de luz. Mas, sobretudo, o século XVII é dominado por Isaac Newton (1642-1727), o gigante de todos os tempos, que fundou o

cálculo infinitesimal, a mecânica, a óptica - a equação de movimento dos corpúsculos clássicos, a gravitação universal, a mecânica celeste, a natureza da luz. Nos anos que os historiadores chamam maravilhosos, 1666-1667, logo após ter concluído seus estudos na Universidade de Cambridge, recolhe-se Newton à sua casa, em virtude da ocorrência da peste na Inglaterra, que fizera fecharem-se os estabelecimentos públicos. A lenda da maçã de Newton certamente sintetizou a intuição genial que teve ao comparar a maçã que cai da árvore com uma pedra lançada, que descreve uma parábola e cai e com a lua que se move constantemente no céu e que, sem cair, cai constantemente, se encurva como a pedra mas com uma velocidade tangencial que a mantém em sua trajetória e a impede de cair como a pedra. Newton propôs assim a existência de uma força de atração universal que atua sobre cada partícula material (hoje, sabemos, sobre cada forma de energia) onde quer que esteja no universo - uma vez conhecida esta força a equação de Newton determina uma trajetória para cada conjunto de condições iniciais dadas.

O século XVII é também o século da fundação das primeiras academias de ciências: a Royal Society, em Londres, 1645 (Charles II), Accademia del Cimento (1657), l'Académie des Sciences de Paris (Louis XIV, Colbert, 1665). São os anos em que os cientistas sentem necessidade de se reunir para discutir idéias e métodos de pesquisa experimental. Na Academia de Paris reúnem-se, em geral na casa de um senhor chamado Melchisedec Thevenet, Descartes, Roberval, Gassendi, Mersenne, Pascal¹, entre outros. "Para criar a Academia, Colbert não

¹ J.P. Maury, *Petite Histoire de la Physique*, p. 37, Larousse, Paris 1992. Seguimos neste artigo as linhas gerais deste livro.

teve outra coisa a fazer senão "nacionalizar" uma assembléia já constituída e atrair mediante pensões, alojamentos e vantagens os melhores sábios estrangeiros: Huygens para a Academia, Cassini para o Observatório, contribuem assim a fazer de Paris em alguns anos, o centro científico mais importante da época". Aparecem entre as primeiras revistas científicas, o Journal des Savants em 1665, logo após as Philosophical Transactions of the Royal Society em 1664.

O século XVIII foi, sobretudo, o da consolidação da mecânica de Newton, a mecânica analítica de Joseph de Lagrange (1736-1855), Carls Friedrich Gauss (1777-1855), Pierre Laplace (1749-1827), William Hamilton (1805-1867) já no começo do século XIX.

II- O século XIX: Carnot, Joule, Clausius

O século XIX viu florescer a ciência em Paris. Na Revolução Francesa, em 1789, segundo o historiador J.P. Maury, Biot tinha 15 anos, Ampère e Malus, 14, Gay-Lussac 11, Poisson, 8, Dulong, 4, Arago, 3, Fresnel, 1. A República estabeleceu o sistema métrico, fundou a École Normale, L'École Polytechnique, mas a Faculdade de Ciências foi fundada no Império (1808).

Data de 1824, a publicação das "Reflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à developper cette puissance", por Sadi Carnot (1796-1832). As máquinas eram inglesas, John Dalton (1764-1844), fundador da Escola de Manchester, é considerado como pioneiro no estudo de processos adiabáticos nos gases e na proclamação da

necessidade de estudos caloríficos dos gases. E em Paris avançavam as pesquisas com Gay-Lussac, Pierre Laplace (1749-1827).

A máquina da moda à época era a de Wolf que utilizava o condensador de James Watt (1736-1819).

Carnot estudou a máquina em geral e teve a idéia da necessidade de uma fonte fria: todas as máquinas têm uma fonte quente de onde lhes vem o fluido quente, e uma fonte fria à qual é restituído o fluido frio. Para ele, o calor é um fluido - o chamado calórico - e sua queda da fonte quente para a fria produz trabalho como a queda de uma massa de água de uma certa altura a outra menor. O calor se conservaria como a água nas máquinas hidráulicas. Carnot enunciou um teorema importante: o máximo de potencia motriz é independente do agente, não depende senão das temperaturas das fontes. Ele define ainda a reversibilidade, a necessidade de funcionamento cíclico.

Emile Clapeyron (1799-1864) foi o físico que leu o trabalho de Carnot e o divulgou. Pois Carnot morreu de cólera oito anos após ter publicado as Reflexions, e todos os seus pertences foram queimados para desinfecção. Apesar do grande avanço que Carnot propunha com suas idéias sobre o calor, quase nenhum físico leu seu trabalho, apresentado em livro e não em artigo de revista. Algumas folhas recolhidas por seu irmão Hippolyte, foram publicadas em anexo à segunda edição de seu livro em 1878. E aí apareceram as reflexões adicionais de Carnot que após a publicação de sua obra em 1824, duvidava da conservação do calórico e mesmo de sua existência, tendo afirmado pouco antes de sua morte: "o calor não é outra coisa

senão potência motriz, é antes o movimento que muda de forma. É um movimento nas partículas dos corpos, quando houver destruição de potencia motriz haverá ao mesmo tempo produção de calor em quantidade precisamente proporcional à potencia motriz destruída. Reciprocamente, quando houver destruição de calor, haverá produção de potencia motriz ². Chegou assim a formular o primeiro princípio da termodinâmica estabelecido mais tarde por James Prescott Joule, físico inglês, em 1845.

A publicação de Clapeyron foi importante. Foi um artigo intitulado Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur, no Journal de l'Ecole Polytechnique em 1834. Três anos depois foi traduzido para o inglês e em 1843, para o alemão. Essas publicações chegaram assim ao conhecimento de Lord Kelvin e de Rudolf Clausius.

William Thomson, mais conhecido como Lord Kelvin (1824-1907) foi um estudante prodígio, filho de um professor de matemática da Universidade de Glasgow, estudou na Universidade de Cambridge e em seguida estagiou no Collège de France, em Paris, onde Victor Regnault (1810-1878) dirigia um laboratório especializado em calorimetria. Ali, encontrou os matemáticos Cauchy e Liouville, seguiu cursos na Sorbonne e buscou o livro de Carnot que finalmente adquiriu em 1848, depois de sua volta à Universidade de Glasgow. O primeiro trabalho de Kelvin intitula-se Sobre uma escala termométrica absoluta, fundada sobre a teoria de Carnot relativa à potencia motriz do calor e calculada a partir das observações de Regnault.



² Citado por J.P. Maury, op. cit.

A escala de Kelvin baseou-se na idéia de Carnot, a saber que o rendimento máximo das máquinas é independente de seu agente, e é portanto universal: a queda de calórico de um grau produz sempre o mesmo trabalho, qualquer que seja a temperatura de partida.

Entre 1850 e 1870 a longa marcha para a teoria completa do calor, que Carnot reclamara é elaborada por Lord Kelvin, Joule, Hermann von Helmholtz (1821-1894) e Rudolf Clausius (1822-1888).

Das famosas experiências de Joule, uma vez realizadas, o relatório que escreveu foi recusado pela Royal Society e depois pela British Association for the Advancement of Science (na reunião em Cambridge) em 1845 - preconceitos resultantes da idéia de calórico. Foi necessária a publicação em 1847 do trabalho de Helmholtz sobre a conservação da energia para que Joule se encorajasse a apresentar novamente à British Association em nova reunião em Oxford (1847) o seu sistema de palhetas em rotação na água de um calorímetro, rotação produzida pela descida de um peso, o que lhe permitiu medir o trabalho e a quantidade de calor a que dá lugar. Helmholtz foi quem encorajou Joule com seu trabalho de 1847 sobre a conservação da energia. Joule determinou o equivalente mecânico da caloria e descobriu em 1841 o efeito Joule. Filho de um fabricante de cerveja, Joule não precisava trabalhar e assim pode consagrar-se à pesquisa científica.

Em meados do século XIX começou a destacar-se a física na Alemanha. Uma vez ganha a Guerra de 1870, emergiu o poder de Bismark, estruturou-se o império germânico transformado de um

conjunto de principados em uma nação. Enquanto na Grã-Bretanha, William Thomson foi agraciado com o título de Lord Kelvin of Largs, na Alemanha Helmholtz recebeu o título de Geheimrat mit Predikat Exzellenz e o nome Hermann von Helmholtz.

Se a noção de conservação de energia se destaca com o trabalho de Helmholtz, o médico da marinha Julius von Mayer (1814-1878), ao embarcar em 1840 para Djakarta, teve a oportunidade de pensar sobre a questão da conservação da energia e publicou nos Annalen der Chemie de 1842 um artigo em que diz explicitamente que o calor é uma forma de energia (e calculou também o valor do equivalente mecânico da caloria). Durante anos, após o trabalho de Carnot, ficaram os físicos apegados à idéia do calórico que se constituiu em preconceito contra a noção de calor como energia. A contradição permaneceu até a publicação do famoso trabalho de Rudoff Clausius. "Da força motriz do calor e das leis sobre o calor que daí se podem deduzir" em 1850. Neste trabalho, Clausius dá uma forma precisa ao segundo princípio da termodinâmica e esclarece que não há contradição entre o que Joule provou (transformação de trabalho em calor) e o que Carnot estabeleceu, a saber, que uma parte somente do calor se transforma em trabalho, o restante deve ser necessariamente cedido a uma fonte fria.

Fundou-se com Clausius a termodinâmica e eliminaram-se os preconceitos resultantes da idéia de calórico. Foi Clausius quem introduziu a noção de entropia, baseado na relação que havia sido introduzida por Lord Kelvin a saber

$$\frac{T'}{T} = \frac{Q'}{Q}$$

para uma transformação reversível na qual Q é a quantidade calor recebida pela máquina da fonte quente à temperatura T e Q' a parte de calor cedida à fonte fria à temperatura T' . Com a convenção que estabelece que a quantidade de calor recebida pelo sistema é positiva enquanto que a parte cedida é negativa esta relação se escreve

$$\frac{Q}{T} + \frac{Q'}{T'} = 0$$

para transformações reversíveis da máquina e

$$\frac{Q}{T} + \frac{Q'}{T'} < 0$$

para transformações não reversíveis. Para N fontes, tem-se:

$$\sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{T_n} = 0$$

no caso de transformações reversíveis e $\sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{T_n} < 0$ para as não

reversíveis.

Estas equações assumem a forma:

$$\int \frac{dQ}{T} = 0$$

e

$$\int \frac{dQ}{T} < 0$$

no caso de uma infinidade de fontes de calor. Assim, introduziu Clausius a função entropia: dada uma transformação de um sistema de um estado A a um estado B, para um ciclo reversível a integral:

$$\int_A^B \frac{dQ}{T}$$

não depende do caminho percorrido entre A e B. A entropia, função de estado é então dada por:

$$S(B) - S(A) = \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

para um caminho reversível, ou

$$S(B) - S(A) > \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

para um caminho não reversível.

Numa transformação adiabática se tem por definição

$$dQ = 0$$

e se ela é reversível vê-se que a entropia é constante:

$$S(B) - S(A) = 0$$

Se a transformação for irreversível ter-se-á:

$$S(B) > S(A)$$

A entropia de um sistema é pois constante ou aumenta. Este enunciado tem sido utilizado para caracterizar a flecha do tempo. Enquanto na mecânica Clássica todos os movimentos elementares são reversíveis, na termodinâmica isto não ocorre. Daí ter Clausius contribuído para a fundação da mecânica estatística.

III-0 século XIX: Gibbs, Boltzmann, Faraday, Maxwell]

No século XIX, até os primeiros anos do século XX, muitos físicos não acreditavam na teoria atômica - citemos Ernst Mach, Wilhelm Ostwald, Pierre Duhem e Max Planck em sua mocidade. O austríaco Ludwig Boltzmann, ao contrário era fervoroso adepto da teoria dos átomos e das moléculas. Junto com Maxwell e com o americano Josiah Willard Gibbs (1839-1903), fundou a mecânica estatística.

Um gas sendo constituído de moléculas, um estado macroscópico é definido pelo conhecimento da posição e da velocidade de cada

molécula. Boltzmann fez a hipótese de que a todo estado macroscópico pode corresponder um número W_p muito grande mas finito, de estados microscópicos moleculares equiprováveis. Se se relaxar um vínculo que torna acessível um estado microscópico proibido de contribuir ao estado macroscópico, aumentará W e aumentará a entropia S . Em um sistema formado de duas partes com números de estados W_1 e W_2 , cada estado acessível do sistema total associa um estado arbitrário da primeira parte a outro estado arbitrário da segunda parte. Assim valerá a relação:

$$W = W_1 W_2$$

enquanto que a entropia é aditiva:

$$S = S_1 + S_2$$

Dai a relação entre S e W proposta por Boltzmann:

$$S = k \log W$$

onde k é a conhecida constante de Boltzmann.

Maxwell, Boltzmann e Gibbs foram os grandes nomes da mecânica estatística - Gibbs, um físico que elevou o nome da incipiente física nos Estados Unidos, tornando-se um dos maiores físicos teóricos do século XIX. Professor na Universidade de Yale, trabalhou sobre análise das propriedades de fluidos e dos sólidos, das soluções químicas, dos

catalisadores e fenômenos eletroquímicos, tendo estabelecido a famosa regra de Gibbs.

Amedeo Avogadro (1776-1856) e Jean Perrin (1870-1942) deram importantes contribuições ao conhecimento experimental dos parâmetros atômicos e moleculares.

O século XIX viu também o desenvolvimento das pesquisas em eletricidade e magnetismo.

Eis alguns nomes que deixaram sua marca nessas pesquisas:

Alessandro Volta (1745-1827); André Ampère (1775-1836); Henry Cavendish (1731-1810) que, além de trabalhos em eletrostática, mediu a constante de Newton da força de gravitação; Oliver Heaviside (1850-1925) famoso pelos seus trabalhos sobre o cálculo simbólico; Lord Kelvin e John Kerr (1824-1907). Sobre o efeito do campo magnético sobre a luz polarizada, destacaram-se Rudolf Kohlrausch (1509-1894); Gustav Kirchhoff (1824-1887). Joseph Poisson (1781-1840) e Charles Coulomb (1736-1806) são célebres pela contribuição que deram à eletrostática. Christian Oersted (1777-1851) e André Ampère (1775-1836) marcaram estudos sobre o efeito magnético das correntes.

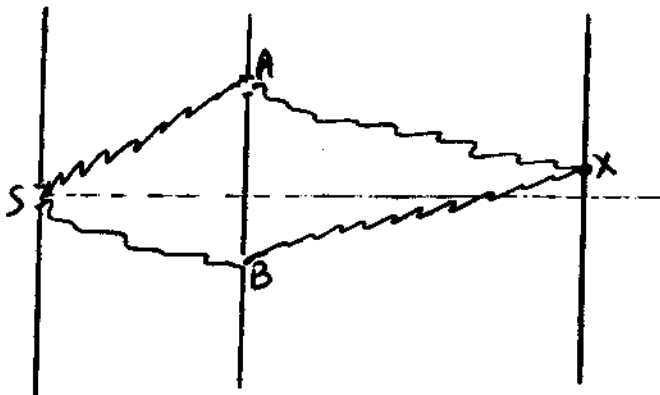
Dois gigantes da Física foram os primeiro responsáveis pelo edifício da eletrodinâmica: Michael Faraday (1791-1867) e James Clerk Maxwell (1831-1879). Enquanto o primeiro fez pesquisas sobre eletrólise, diamagnetismo, dielétricos e sobretudo a indução eletromagnética, o segundo foi o autor das célebres equações do campo eletromagnético, das quais resultaram a unificação da optica com a

eletrodinâmica, a existência das ondas eletromagnéticas abrangendo as ondas luminosas.

Dois outros físicos foram importantes para o desenvolvimento da teoria ondulatória da luz : Tomaz Young (1773-1829) e Augustin Fresnel (1788 - 1827).

IV-0 século XIX: Young, Fresnel.

Apaixonado pelo estudo dos hieroglifos, Young publicou em 1820, nas Philosophical Transations of the Royal Society o dispositivo de fendas que leva o seu nome: dois furos A e B numa folha de papel ou num anteparo são iluminados por luz que atravessou um furo S noutro anteparo. Ele enfatizou: é necessário que duas



partes de um mesmo raio luminoso cheguem a um ponto x de um terceiro anteparo para que se obtenham franjas de interferência.

O dispositivo de Young é usado na mecânica quântica para se definir a noção de amplitude de probabilidade. A mecânica quântica afirma que um raio de luz constituído de um só foton tem uma amplitude de probabilidade para que o foton siga um dos caminhos SAX e outra amplitude de probabilidade para que ele siga o outro caminho SBX para atingir o ponto X. A amplitude de probabilidade para que o foton saia de S e chegue ao ponto X $\langle X/S \rangle$ (ler da direita para a esquerda) é a soma das amplitudes $\langle X/A/S \rangle$ e $\langle X/B/S \rangle$:

$$\langle X/S \rangle = \langle X/A/S \rangle + \langle X/B/S \rangle$$

A interferência ocorre quando se calcula a probabilidade para que o foton seja efetivamente observado no ponto X em proveniência de S, que é o quadrado absoluto, por definição, da amplitude total:

$$|\langle X/S \rangle|^2 = |\langle X/A/S \rangle + \langle X/B/S \rangle|^2$$

O foton interfere consigo mesmo, isto é, dois dos seus estados possíveis o fazem - é o termo mixto

$$\langle X/A/S \rangle^* \langle X/B/S \rangle + \langle X/A/S \rangle \langle X/B/S \rangle^*$$

que define a interferência.

No fim do século XIX aconteceram grandes descobertas que seriam interpretadas no século XX e que deram lugar a um extraordinário desenvolvimento da Física.

Em 1895, há um século portanto, Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) professor de física na Universidade de Würzburg, Alemanha, descobriu os raios X: sob determinadas condições, descargas elétricas davam lugar a uma radiação invisível que atravessava a matéria permitindo a fotografia dos ossos do homem.

Em 1896, Henri Becquerel (1852-1908) comunicou à Academia de Ciências de Paris que o sulfato duplo de urânio e de potássio emite espontaneamente radiações invisíveis que enegrecem as chapas fotográficas e que são diferentes dos raios X.

Em 1898, Pierre (1859-1906) e Marie Curie(1867-1934) descobriram dois novos elementos que também emitem radiações - o polônio e o radium e batizaram esses fenômenos com o nome radioatividade.

Finalmente, em 1897, Joseph John Thomson (1856-1940), professor de Física experimental na Universidade de Cambridge descobriu que campos elétrico e magnético desviam os raios catódicos, determinou a relação entre a carga e a massa das partículas que ele supunha que formavam esses raios, achou que esta relação era independente do gás que estava no tubo - descobriu assim o eletron, "matéria num novo estado", do qual são feitos todos os elementos químicos. Foi ainda Thomson quem propôs o primeiro modelo atômico - eletrons embebidos numa gelatina de cargas positivas com raio igual ao raio atômico da

Thomson quem propôs o primeiro modelo atômico - elétrons embebidos numa gelatina de cargas positivas com raio igual ao raio atômico da teoria cinética dos gases, 10^{-8} cm, o modelo do pudding de passas e induziu Rutherford a descobrir o núcleo atômico.

A física do século XX começava pois já antes de terminarem os anos 1800 e quem dissesse que com a mecânica de Newton e a eletrodinâmica de Maxwell estaria esgotada a capacidade de descrição teórica dos fenômenos físicos, estaria condenado a uma grande decepção. Encerrava-se efetivamente a capacidade de explicação daquelas duas grandes teorias, iniciava-se, com o século XX, o coroamento da bela física clássica com a eclosão da teoria da relatividade, aos gigantes Newton e Maxwell juntava-se outro gigante, Albert Einstein. E os fenômenos atômicos, a começar pelo elétron, passaram a obedecer a novos princípios, a novas leis irreduzíveis à física clássica - a mecânica quântica, à qual estão associados os nomes de Max Planck e ainda Albert Einstein, de Lord Rutherford e Niels Bohr, de Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, de Wolfgang Pauli, Pascual Jordan e Max Born. E em nossos dias, de Richard Philip Feynman, e Julian Schwinger, de Hideki Yukawa e Sin-Itiro Tomonaga e de Steven Weinberg e companheiros dos modelos de unificação das forças físicas.