

BOLTZMANN – Um epílogo trágico

Nothing is more practical than a good theory.

Ludwig Boltzmann

PAULO ROBERTO GOTAC*
Capitão de Mar e Guerra (Ref^{ls})

SUMÁRIO

Introdução
Quem foi
Leis da Termodinâmica
“Não acredito na existência dos átomos”
A Segunda Lei
Legado e Considerações Finais

INTRODUÇÃO

O presente artigo se propõe a apresentar uma panorâmica da vida e do infortúnio final do físico austríaco Ludwig Boltzmann, além de mostrar, de maneira bem resumida, os principais aspectos da sua importante e extensa obra científica,

com ênfase na abordagem atomista, por ele defendida com ardor, para descrever as principais características do comportamento dos gases; interpretar, à luz da visão molecular, as leis da termodinâmica, principalmente a segunda, incorporando, para isso, um modelo estatístico pela primeira vez admitido como presente no desenvol-

*Graduado em Física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Foi professor de Eletromagnetismo na Universidade Veiga de Almeida e na Universidade Católica de Petrópolis. Na ativa, foi chefe do Departamento Técnico do Centro de Munição da Marinha e chefe do Departamento de Pesquisa do Instituto de Pesquisas da Marinha. Após sua transferência para a reserva, foi chefe de Projeto do Instituto Nacional de Projetos Especiais e exerceu atividade docente na Escola Naval, em Eletromagnetismo e Física. Tem vários artigos sobre Física publicados em revistas.

vimento dos processos naturais; e explicar o aumento da entropia e a irreversibilidade que lhes são típicos.

O texto ora apresentado é bastante sintético e desprezioso ao abordar as numerosas realizações de Boltzmann, tais o volume e o alcance de sua obra. Nele não figura uma só equação entre as muitas com as quais ele lidou denodadamente por acreditar no poder da Matemática para embasar suas hipóteses. A exceção fica por conta da que define sua fórmula para exprimir a função entropia, que, por sua importância até em outras áreas da Física e da Matemática, não poderia deixar de ser explicitamente citada.

QUEM FOI

Ludwig Eduard Boltzmann [1] nasceu em Viena, Áustria, em 20 de fevereiro de 1844. Seu pai, Ludwig Georg Boltzmann, de quem ficou órfão com 15 anos de idade, precisava, na qualidade de funcionário da Receita do governo, mudar de domicílio com frequência, o que obrigou o filho a iniciar e completar sua educação primária em casa, com tutores particulares, sob a supervisão da mãe, Katharina Pauernfeind, natural de Salzburg.

Sua formação de ensino médio foi realizada na cidade de Linz. Em 1863, ingressou na Universidade de Viena, onde foi estudar Física. Lá demonstrou capacidade para analisar intrincados problemas de Física Matemática e contou com mestres famosos, como Josef Loschmidt (1821-1895) [2], o primeiro a estimar o tamanho médio das moléculas do ar, e Joseph Stefan (1835-1893) [3], famoso pela determinação experimental, em 1879, da fórmula da “quarta potência da temperatura”, que permite calcular a energia de radiação total de um corpo negro a uma temperatura absoluta T .



Boltzmann



Loschmidt

Ainda em Viena, tendo Stefan como orientador, defendeu, em 1866, sua tese de PhD, que abordou a Teoria Cinética dos Gases, utilizando o ponto de vista atomista que defendeu durante toda a vida, segundo o qual a matéria possui um componente último e indivisível, visão já sugerida desde os gregos, com Demócrito (cerca



Stefan



Maxwell

de 460/360 a.C.) e Epicuro (341/270 a.C.), passando por Laplace (1749-1827) e Isaac Newton (1643-1727), até cientistas contemporâneos seus, como o escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) [4] e os mestres acima citados. Com esta abordagem, Boltzmann tentava explicar as propriedades termodinâmicas dos gases supondo-os compostos por grande número de partículas interagindo de acordo com as leis da Mecânica Clássica de Newton.

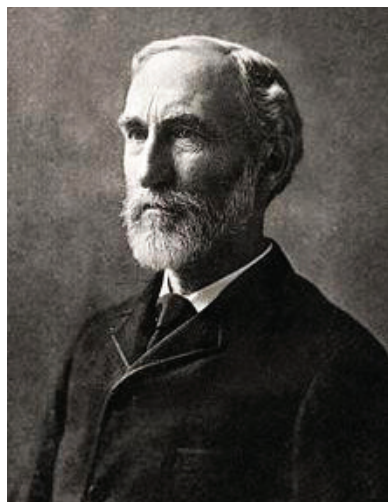
Em 1869, por indicação de Stefan, foi nomeado professor de Física Matemática

na Universidade de Graz, sul da Áustria, onde permaneceu durante 14 anos, e, em 1871, trabalhou em Berlim com expoentes como Gustav Kirchhoff (1824-1887) [5], o mesmo das leis dos circuitos elétricos, e Hermann von Helmholtz (1821- 1894) [6].

Em 1872, conheceu, em Graz, Henriette von Algoutier, então iniciando carreira de professora de Matemática e Física. Com ela se casou em 1876 e teve três filhas e dois filhos.

Em 1890, presidiu a cadeira de Física Teórica na Universidade de Munique e, em 1894, sucedeu seu mestre Stefan na Universidade de Viena, como titular de Física Teórica. Viajou duas vezes aos Estados Unidos da América, uma em 1904, para participar da Conferência de Física em Saint Louis, e outra em 1905, quando percorreu boa parte do território americano e visitou a Universidade de Berkeley, na Califórnia, onde proferiu palestras.

Sua visão sobre os princípios da Termodinâmica tem grande afinidade com o trabalho do notável físico americano Josiah Willard Gibbs (1839-1903) [7], um dos pilares desta ciência e também o



Gibbs

responsável pela formalização da Análise Vetorial como a conhecemos hoje.

Boltzmann suicidou-se durante as férias que passava com esposa e filhas, em um *resort* em Duino, região próxima a Trieste (então pertencente à Áustria), em 5 de setembro de 1906.

LEIS DA TERMODINÂMICA

A Termodinâmica consiste no estudo dos efeitos de trabalho, calor e energia num sistema físico. Seu desenvolvimento foi impulsionado pela Revolução Industrial do século XVIII e buscou aperfeiçoar o emprego de máquinas térmicas para otimizar a produção.

Baseia-se em duas leis básicas [8], que, apesar de toda a revolução conceitual da Física verificada ao longo dos séculos XX e XXI, se mantêm abrangentes e válidas. A primeira relaciona as várias formas de energia interna de um sistema ao trabalho realizado ao calor transferido e estipula que a quantidade total envolvida se conserva. Sua quantidade característica é a chamada energia interna. A segunda estabelece que os processos naturais ocorrem numa direção, mas não o fazem na direção inversa. É possível transformar todo o trabalho em energia térmica, mas é impossível transformar todo o calor em trabalho. De modo semelhante, a colocação de café numa xícara com leite, por exemplo, faz com que as duas substâncias, de certa forma, se fundam, mas não há processo espontâneo que as faça retornar à situação anterior de separadas. Uma forma de traduzir este fato é de que os eventos da natureza ocorrem no sentido de aumentar a desordem do sistema. A quantidade característica é a chamada entropia, representada geralmente pela letra S , que, indicativa desta unidirecionalidade, ao contrário da energia, não

se conserva, mas sempre aumenta nos processos naturais.

Costuma-se atualmente acrescentar mais duas leis formativas da Termodinâmica que não serão aqui descritas, por não apresentarem interesse ao conteúdo do presente trabalho: a lei zero, do equilíbrio térmico, situação na qual um gás, por exemplo, possui parâmetros macroscópicos, como pressão e temperatura, constantes, e a terceira, que descreve a Física do zero absoluto.

“NÃO ACREDITO NA EXISTÊNCIA DOS ÁTOMOS”

Após a apresentação de sua dissertação sobre a Teoria Cinética dos Gases, Boltzmann se tornou dedicado defensor do ponto de vista atomista para explicar o estado termodinâmico dos gases a partir do movimento de partículas indivisíveis, cujas colisões são comandadas pelas leis da Mecânica Clássica.

Tal proposição não teve muita acolhida nos principais centros científicos austríacos da segunda metade do século XIX [9], nos quais predominava uma visão fortemente influenciada mais por princípios filosóficos do que por procedimentos puramente científicos. Dentro desta perspectiva, bastava somente a observação concreta de elementos – pressão e temperatura, entre outros, no caso de gases – para descrever seus comportamentos, sem necessidade, portanto, de hipóteses e princípios atomistas baseados em componentes que ninguém ainda havia observado. Um dos mais importantes líderes desta crença foi o prestigiado Ernst Mach (o mesmo do Número de Mach, que expressa a relação entre a velocidade de um corpo e a velocidade acústica local do som) (1838-1916) [10]. Num encontro da Academia Imperial de Ciências, em Vie-



Mach

na, em janeiro de 1897, ao final de uma palestra proferida por Boltzmann, Mach, do alto de seu prestígio como físico e filósofo, declarou diante da plateia: “Não acredito na existência de átomos” [9].

A abordagem de Boltzmann, baseada na formulação de hipóteses em relação a elementos sem a necessária detecção sensorial, seguida de desenvolvimento matemático modelador das leis físicas vigentes e respectivas conclusões, com verificação experimental posterior, procedimento quase padrão nas atuais pesquisas físicas – até hoje ninguém “viu” um elétron –, ia na contramão das especulações dos adeptos da escola de Mach. Acreditava Boltzmann que tal procedimento permitiria, por meio de uma visão reducionista, aprofundar com mais generalidade a compreensão do comportamento dos gases e elucidar fenômenos até então inexplicáveis no contexto da Termodinâmica tradicional. Por exemplo, a temperatura estava associada à energia cinética média das moléculas.

Apesar disso, já era considerável o número de cientistas que ficaram no mesmo flanco de Boltzmann, entre os quais seus mestres, já citados, e importantes estrangeiros, como o escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) [4], com quem trocou ideias (sem ter se encontrado com ele) que contribuíram para o aperfeiçoamento do tratamento estatístico da distribuição das velocidades das moléculas componentes de um gás em equilíbrio, e o americano Josiah Willard Gibbs [7], cujo trabalho de criar as bases teóricas gerais da ciência da Termodinâmica possuía pontos comuns com as bases da chamada Mecânica Estatística, como ficou conhecida a estrutura conceitual fundada por Boltzmann e Maxwell [11].

Sua formação – caracterizada pela busca obstinada do conhecimento e pela crença no poder das hipóteses tratadas na “força bruta” pela Matemática aplicada às lei físicas vigentes – e seu senso de humor particular e irônico, às vezes insolente nas respostas aos opositores, provocaram críticas, mais agudas entre os meios intelectuais de seu país, e começaram a despertar grandes inimizades, o que acabou influenciando gradativamente seu estado psicológico.

Mesmo assim, diante dos apoios à alternativa molecular dos gases, recebidos por seus mestres e por influentes cientistas, como, por exemplo, o alemão Rudolf Clausius (1822-1888) [12], considerado um dos fundadores da ciência da Termodinâmica, prosseguiu com seu trabalho, publicando vários artigos importantes.

A SEGUNDA LEI

Talvez estimulado por Clausius, partiu para a tarefa de explicar, via visão molecular, a segunda lei da Termodinâmica, uma das mais fundamentais da natureza,



Clausius

importante no desenvolvimento das máquinas térmicas, indicadora de uma tendência natural segundo a qual os sistemas só se desenvolvem numa direção, sem retornar ao estado inicial – a chamada irreversibilidade, que faz com que os organismos envelheçam, mas jamais rejuvenesçam e que seja impossível ao café se separar espontaneamente do leite, ao qual está misturado –, ocorrência formalizada pela criação da função entropia, criada por Clausius, que só aumenta ao longo dos processos naturais, ao contrário da energia, que se mantém constante.

Assim, deduziu, em 1872, sua famosa equação de transporte, que tenta analisar o comportamento dos gases no caminho para o equilíbrio termodinâmico e que resultou no famoso Teorema H, no qual uma grandeza, $H(t)$ [13], onde t é o tempo, obtida por meio da análise das colisões das moléculas de acordo com a mecânica clássica, sempre diminui ao longo do processo, pois é negativa. Associou-a, então, pela introdução do sinal menos e da multiplicação por uma constante, à função entropia $S(t)$, que, sempre aumentando e chegando ao máximo no equilíbrio, se harmonizaria com a segunda lei.

Embora aguardado, tal resultado gerou polêmica, pois se baseava na Mecânica Clássica, cujas equações são reversíveis no tempo – em princípio, por elas, o desenvolvimento do sistema num sentido pode, embora nunca observado, espontaneamente voltar ao estado inicial, situação proibida pelos cânones da segunda lei.

Tal inconsistência criou um clima de restrição, não só nos opositores radicais a Boltzmann, mas também nos aliados com os quais mantinha contato no seu país e no exterior para discussão das ideias. Estes últimos se mantiveram discretos em relação às conclusões obtidas tanto pela sua equação de transporte como do seu Teorema H, por julgarem que não eram suficientemente gerais para representar a realidade da irreversibilidade.

Talvez com o intuito de se amenizar as críticas, prosseguiu ele com seus estudos para caracterizar a função entropia embutida na segunda lei da Termodinâmica. Com base ainda nos princípios da Mecânica Clássica, desta vez, porém, supondo presentes, provavelmente pela primeira vez na história da Física, conceitos de estatística e probabilidade como principais protagonistas, aplicados aos processos irreversíveis, supôs que um gás, na busca do equilíbrio, o estado mais provável, adquire valores da entropia dados pela famosa relação que hoje está inscrita no seu túmulo:

$$S = k \log(W)$$

Nesta equação, S é a entropia; k uma constante, mais tarde chamada de constante de Boltzmann; \log é o logaritmo natural; e W o número de microestados assumidos pelo gás até que seja atingido o macroestado de equilíbrio, possuindo este o valor máximo da entropia e sendo o mais desorganizado, teoricamente de valor infinito. A função logarítmica aparece

porque praticamente ela cresce cada vez menos para grandes valores de W , quase no equilíbrio, o que não ocorreria se a entropia fosse proporcional linearmente a W , pois, neste caso, S seria infinita, uma inconsistência.

Para reforçar os argumentos dos que não aceitavam a análise atomista de Boltzmann, o grande matemático francês Henri Poincaré (1854-1912) [14], estudando a estabilidade de sistemas mecânicos complexos, como o nosso planetário solar, por exemplo, provou, em 1893 – ano do falecimento do mestre e amigo de Boltzmann, Joseph Stefan¹–, o chamado Teorema da Recorrência [15], segundo o qual, ao longo da evolução, tais sistemas, transcorrido um tempo suficientemente longo, mas finito, retornarão a um estado bem próximo do estado inicial, fato também admitido por Boltzmann, mas com ocorrência extremamente rara.



Poincaré

O fato de Boltzmann possuir uma personalidade com tendências depressivas, agravadas pelas perdas de seus principais mestres e amigos, Loschmidt, Stefan e Maxwell (este em 1879), fez com que as críticas sistemáticas à Teoria Cinética dos Gases comesçassem a deteriorar seu estado de saúde, provocando, entre outros efeitos, aumento excessivo de peso e perda gradativa de visão.

Em 1905, após o retorno de sua segunda viagem aos Estados Unidos, já citada, começou a trabalhar sofregamente para defender suas ideias, época em que resolveu engajar-se em discussões de filosofia, um campo estranho à sua atividade científica, instado pela atmosfera cultural dominante da Viena do final do século XIX.

Tal esforço, estando ele já acima dos 60 anos, o levou à necessidade de reservar períodos de descanso e férias cada vez mais frequentes, o que, muitas vezes, acentuou seu sentimento de frustração. O último destes “repousos” teve lugar em



Sepultura no Cemitério Central de Viena

1 Dois anos depois, morreria seu outro guia, Josef Loschmidt.

um *resort* na aldeia de Duíno, próximo a Trieste. Após três dias lá, passou à esposa Henriette Boltzmann e às filhas que o acompanhavam uma sensação de que estava se recuperando de suas mazelas psicológicas e físicas. Na tarde de 5 de setembro de 1906, elas se dirigiram à praia próxima, com a promessa de que mais tarde Boltzmann as encontraria. Com a demora de sua chegada, no entanto, Henriette pediu à filha de 15 anos, Elsa, que regressasse aos aposentos a fim de chamá-lo. Foi Elsa quem se deparou com a terrível cena de seu pai autoenforcado, pendendo de um travessão do teto do quarto.

LEGADO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O legado do trabalho de Boltzmann foi reconhecido já nos primeiros anos do século XX e contribuiu para o conhecimento de aspectos importantes do comportamento dos gases. Alguns até acreditam que Max Planck (1858-1947) tenha formulado, em 1900, sua revolucionária hipótese de quantização da energia de radiação do corpo negro, ponto de partida para a teoria quântica que iria revolucionar a Física do século XX, tomando como inspiração a noção de microestados de Boltzmann, embora este praticamente nada conhecesse, até o ano de sua morte, sobre a inusitada proposta de Planck.

Em 1905, ano que ficou conhecido como *Annus Mirabilis* da Física, um jovem cientista de 26 anos, Albert Einstein (1879-1955), publicou quatro trabalhos que constituíram divisores de águas no panorama conceitual da Física, com repercussões até hoje [16]. Num deles, Einstein utilizou a visão atomista de Boltzmann para apresentar interessante elucidação do fenômeno observado por microscópio, em 1828, pelo botânico

escocês Robert Brown (1773-1858) [17], segundo o qual grãos de pólen imersos em meios líquidos ou gasosos se moviam de maneira irregular e incessante, como se possuíssem vida própria, movimento conhecido hoje como browniano. O trabalho de Einstein consistiu em admitir a existência de átomos presentes no meio, que bombardeavam continuamente os grãos de pólen, calculando a frequência média das colisões.



Robert Brown

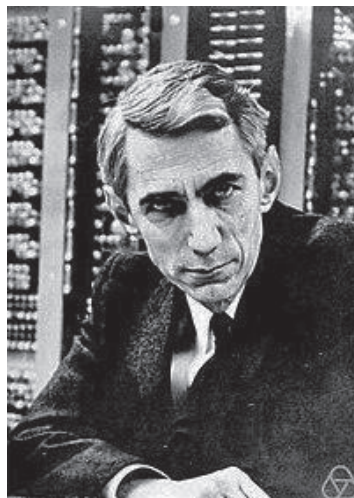


Perrin

Três anos depois, em 1908, o físico francês Jean Baptiste Perrin (1870-1942) [18] realizou uma série de delicados experimentos, cujas conclusões se harmonizavam com os dados obtidos por Einstein na sua análise. Para muitos estudiosos, tais resultados, apoiados pelos experimentos de Perrin, agraciado em 1926 com o Nobel de Física por seus estudos relacionados à estrutura descontínua da matéria, representam a primeira evidência da existência dos átomos, até então admitida por muitos, mas baseada somente em hipóteses.

Outro trabalho do Annus Mirabilis que implicitamente incorporou a visão atomista de Boltzmann foi o que versou sobre o chamado Efeito Fotoelétrico [16], no qual Einstein supôs a granulação da luz (fótons) para explicar a emissão de elétrons de uma placa metálica quando atingida por radiação luminosa, o que lhe rendeu o Nobel de Física em 1921.

Por outro lado, a fórmula da entropia de Boltzmann passou a se revelar como uma das mais importantes da Física. A constante k que lá figura é uma das constantes fundamentais da natureza. Foi baseado



Shannon

nela que o engenheiro norte-americano Claude Shannon (1916-2001) [19], em parceria com o matemático Warren Weaver (1894-1978) [20], criou sua Teoria Matemática da Informação [21], em que introduziu o conceito de entropia da informação, definida como o grau médio de incerteza no conteúdo de uma informação e de sua fonte.

📁 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:
<CIÊNCIA&TECNOLOGIA>; Física; Termodinâmica;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Boltzmann.
- [2]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Johann_Josef_Loschmidt.
- [3]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Josef_Stefan.
- [4]. GOTAC, P.R. “O esquecido Maxwell”. Revista do Clube Naval, nº 373, jan/fev/mar, 2015.
- [5]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Gustav_Kirchhoff.
- [6]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Hermann_von_Helmholtz.
- [7]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Josiah_Willard_Gibbs.

- [8]. Disponível em: <https://www.khanacademy.org/science/biology/energy-and-enzymes/the-laws-of-thermodynamics/a/the-laws-of-thermodynamics>.
- [9]. LINDLEY, D. Boltzmann's atom. Free Press, 2001.
- [10]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Ernst_Mach<http://www.ifsc.usp.br/~strontium/Teaching/Material2013-2%20FCM0102%20Fisica%20II-EESC/Exercicio%20T18.49.pdf>.
- [11]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o_de_Maxwell-Boltzmann.
- [12]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Clausius.
- [13]. REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA, nº 2, São Paulo, 2008.
- [14]. Disponível em: <https://www.somatematica.com.br/biograf/poincare.php>.
- [15]. Disponível em: <http://tiorema.blogspot.com/2013/06/teorema-da-recorrendencia-de-poincare.html>.
- [16]. GOTAC, P.R. “Einstein - do Annus Mirabilis à visita ao Brasil”. Revista Marítima Brasileira, v. 136, nº 07/09, jul/set. 2016.
- [17]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Robert_Brown.
- [18]. Disponível em: <https://www.google.com/search?q=Jean+Perrin&oq=Jean+Perrin&aqs=chrome..69i57j46j08&sourceid=chrome&ie=UTF-8>.
- [19]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Claude_Shannon.
- [20]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Warren_Weaver.
- [21]. SHANNON, Claude E.; Weaver, Warren (1949). The Mathematical Theory of Communication. Illinois: Illini Books. 117 p. Library of Congress Catalog Card nº 49, 1922.