



# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)

## O Demônio de Maxwell Revisitado, os Coilguns, a Busca do Zero Absoluto e a Átomociência.

Segundo vimos em verbete desta série, o caráter probabilístico da **Segunda Lei da Termodinâmica** [formulada pelo físico alemão Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888), em 1865: - *A entropia do Universo tende para um máximo*] foi sugerido pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) em cartas que escreveu, em 1867 e em 1870, respectivamente, para os físicos ingleses, seus amigos Peter Guthrie Tait (1831-1901) e John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919; PNF, 1904). Nessas cartas, apresentou o seguinte exemplo. Seja um recipiente contendo um gás a uma temperatura fixa; suponhamos que no meio desse recipiente exista uma parede contendo uma janela que poderá ser manejada por um *doorkeep very intelligent and exceedingly quick microscopic eyes* (“porteiro muito inteligente e que tem olhos microscópicos e extremamente rápidos”). Este porteiro deixava passar, através dessa janela, partículas que tivessem velocidades altas e impediria a passagem das que tivessem velocidades baixas, já que, segundo sua distribuição de velocidades [distribuição essa que ele próprio havia proposto em 1860 (vide verbete nesta série)], num gás em equilíbrio, as partículas se distribuem com as mais variadas velocidades. Desse modo e por ação daquele “porteiro”, depois de certo tempo, um lado do recipiente estaria mais quente que o outro, mostrando, assim, que o fluxo de calor poderia ocorrer em dois sentidos, e não em apenas um, conforme indicava aquela Lei Termodinâmica. Registre-se que, conforme nos conta o físico e historiador da ciência, o holandês Abraham Pais (1918-2000) em seu livro **‘Subtle is the Lord...’ The Science and the Life of Albert Einstein** (Oxford University Press, 1983), quando Tait mostrou a carta ao físico inglês William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907), este chamou de **demônio de Maxwell** ao “porteiro” considerado por Maxwell. [Emilio Segrè, **From Falling Bodies to Radio Waves: Classical Physicists and their Discoveries** (Dover, 1984)].

Esse “paradoxo” de Maxwell foi solucionado pelo físico húngaro Leó Szilárd (1898-1964), em 1929 (*Zeitschrift für Physik* **53**, p. 840), ao propor que o **demônio de Maxwell** coletava **informação** cada vez que abrisse a “porta”. Essa **informação**, ainda segundo Szilárd, carrega entropia [ $S$  - conceito introduzido por Clausius, em 1865, e dado pela relação entre calor ( $Q$ ) e temperatura ( $T$ ):  $S=Q/T$ ] e, portanto, equilibrava a diminuição de entropia provocada pela escolha do “porteiro maxwelliano” – passagem apenas das moléculas de alta velocidade ( $T$  alta). Ainda para Szilárd, uma **unidade de informação** =  $k_B \ln 2$ , sendo  $k_B$  a **constante de Boltzmann**. É interessante registrar que esse “demônio” foi também “exorcizado”, em 1951 (*Journal of Applied Physics* **22**, p. 334), quando o físico francês Léon Nicolas Brillouin (1889-1969) demonstrou que a diminuição de entropia resultante das ações do **demônio de Maxwell** poderia ser superada pelo aumento da entropia na escolha entre as velocidades baixas e altas. Ainda é oportuno registrar que a

ideia de Szilárd sobre o significado físico da **informação**, é a base da Teoria Moderna da Informação [Mark George Raizen, **Demônios, Entropia e a Busca pelo Zero Absoluto**, *Scientific American Brasil* **107**, p. 50, Abril de 2011; [en.wikipedia.org/Raizen](http://en.wikipedia.org/Raizen) (acesso em 13/5/2011)].

Aliás, sobre **informação**, é interessante salientar que o físico norte-americano John Archibald Wheeler (1911-2008) no livro **Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics** (W. W. Norton and Company, 1998) [escrito com a colaboração do físico norte-americano Kenneth William Ford (n.1926)], afirmou que: - *A informação é o cerne da física. Este apotegma wheeleriano baseou-se em sua convicção de que: - Medida, o ato de tornar potencialidade em atualidade, é um ato de escolha, escolha entre possíveis resultados. Depois da medida, não há caminhos a serem tomados. Antes da medida, todos os caminhos são possíveis – podemos mesmo dizer que todos os caminhos são considerados de uma única vez... . As leis da física nos dizem somente o que pode acontecer. A medida real nos diz o que está acontecendo (ou o que aconteceu).*

Voltemos ao **demônio de Maxwell** e o uso desta “experiência de pensamento” (*gedankenexperiment*) para obter temperaturas cada vez mais baixas. Em verbetes desta série vimos que a liquefação dos gases permitia obter temperaturas baixas. Por exemplo, em 1823, o físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867) liquefez, sob pressão, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), o brometo de hidrogênio (HBr) e o cloro (Cl<sub>2</sub>) e, com isso, conseguiu obter temperaturas ~ - 17,7 °C. Por sua vez, em 1883, os poloneses, o físico Zygmunt Florent Wroblewski (1845-1888) e o químico Karol Stanislaw Olszewski (1846-1915) liquefizeram o oxigênio, (O), o nitrogênio (N) e o monóxido de carbono (CO); em 1898, o físico e químico inglês Sir James Dewar (1842-1923) liquefez o hidrogênio (H); em 1908, o físico holandês Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926; PNF, 1913) liquefez o hélio (He) conseguindo a temperatura de - 268,9 °C (~ 4,2 K), ocasião em que descobriu a **supercondutividade**; em 1938, os físicos, o russo Pyotr Leonidovich Kapitza (1894-1984; PNF, 1978), e os canadenses John Frank Allen (1908-2001) e Augustin Donald Misener (1911-1996) descobriram que o hélio-4 (<sup>4</sup>He) líquido se torna **superfluido** (HeII) na temperatura de ~ 2,19 K. Por fim, em 1972, os físicos norte-americanos Douglas D. Osheroff (n.1945; PNF, 1996), Robert Coleman Richardson (n.1937; PNF, 1996) e David Morris Lee (n.1931; PNF, 1996) descobriram a **superfluididez** do hélio-3 (<sup>3</sup>He) na temperatura ~ 2,7 mK (1 m = 10<sup>-3</sup> K).

As baixas temperaturas registradas acima tiveram como base o **efeito Joule-Thomson** (vide verbete nesta série). Contudo, para conseguir temperaturas ainda mais baixas, da ordem de micro (1 μ = 10<sup>-6</sup>) e de nano (1 n = 10<sup>-9</sup>) K, foi necessário o desenvolvimentos de novas técnicas envolvendo **resfriamento a laser** (vide verbete nesta série), dentre as quais destacamos: **resfriamento Doppler** (1975); **pinças ópticas** (1978); **resfriamento Zeeman** (1982); **melaço óptico** (1985); **resfriamento Sísifo** (1987); **armadilha magneto-óptica** (1987); **resfriamento sub-Doppler** (1988); **armadilha Penning** (1990/1991); e **resfriamento evaporativo** (1995). Dentre os resultados obtidos por essas novas técnicas, registre-se a criação do **condensado de Bose-Einstein** (CB-E) [uma condensação de cerca de dois mil átomos de rubídio-87 (<sup>87</sup>Rb), na temperatura de 20 nK], em 1995, em experiências realizadas sob a liderança dos físicos norte-americanos Eric Allin Cornell (n.1961; PNF, 2001) e Carl E. Wieman (n.1951; PNF, 2001), e do alemão Wolfgang Ketterle (n.1957; PNF, 2001).

Apesar de seu grande sucesso, como a criação do CB-E, o método de **resfriamento a laser** apresentava uma limitação, pois só se aplicava aos átomos da primeira coluna da Tabela Periódica dos Elementos (vide verbete nesta série), como sódio (Na) ou potássio (K), pois eles transitam facilmente entre o estado fundamental e seu primeiro estado excitado. Por outro lado, no caso do **resfriamento evaporativo** (remoção de átomos quentes, deixando os mais frios), ele só funciona bem usando o **resfriamento a laser**. Em vista disso, novas técnicas em busca de temperaturas baixas foram então desenvolvidas (Raizen, op. cit.).

Uma primeira ideia de acelerar um projétil magnético com alta velocidade foi proposta teoricamente pelo matemático e físico alemão John Karl Friedrich Gauss (1777-1855), e consistia de algumas espiras (“coils”) arranjadas de modo a possuir a forma de um barril, que eram ligadas e desligadas em sequência, ocasionando o deslocamento do projétil pela força magnética. Esse mecanismo ficou conhecido com *Gauss gun* (“canhão de Gauss”) ou *coilgun* (“canhão de espira”) ([wikipedia/coilgun](http://wikipedia/coilgun)). Por outro lado, a inibição das transições (espontâneas ou induzidas) entre auto-estados de um átomo, inibição essa decorrente de medidas frequentes, foi proposta pelo físico russo Leonid A. Khalfin, em 1957/1958, e demonstrada, em 1977, pelos físicos indianos Baidyanath Misra e Ennackel Chandy George Sudarshan (n.1931) (naturalizado norte-americano) e, em 1982, por eles, porém, com a colaboração de C. B. Chiu. Essa inibição ficou conhecida como o famoso (EZQ) (vide verbete nesta série); este efeito tem sido previsto e observado em outras situações físicas das consideradas por Misra e Sudarshan, como, por exemplo, em sistemas quânticos instáveis que apresentam um pequeno desvio temporal na lei do *decaimento exponencial*. Nesses períodos não-exponenciais, há uma inibição (“congelamento”) do decaimento do sistema. Quando nesses períodos há uma intensificação do decaimento, diz-se que ocorreu um *efeito anti-Zenão* (EA-Z). Por exemplo, em 2001 (*Physical Review Letters* 87, 040402), M. C. Fischer, B. Gutiérrez-Medina e o físico norte-americano Mark George Raizen (n.1955), na *Universidade do Texas* (UT), em Austin, observaram os efeitos EZQ e EA-Z em um sistema quântico instável, de acordo com o que foi inicialmente proposto por Misra e Sudarshan. Eles prenderam átomos de cálcio (Ca) ultrafrios em uma rede opticamente acelerante e mediram a perda devido ao processo de tunelamento, desacelerando o sistema e, portanto, parando o tunelamento.

Ainda na UT, o físico norte-americano Robert E. Hebner, Diretor do *Centro de Eletromecânica* dessa Universidade, juntamente com seu grupo de pesquisas (J. H. Beno, K. Davey, M. M. Flynn, J. Hahne, C. Hearn, R. J. Hayes, J. R. Jackson, A. Ouroua, M. A. Pichot, E. Schroeder, D. A. Weeks, A. T. Wilder e J. J. Zierer), em 2004, havia desenvolvido mecanismos de propulsão de trens e navios, apresentados em diversos Congressos e Simpósios [[www.utexas.edu/hebner.html](http://www.utexas.edu/hebner.html) (acesso: 19/5/2011)]. Ele também sugeriu uma proposta de usar um coilgun

para ricochetear um gás na parte de trás de um projétil magnético (Raizen, op. cit.).

Por essa época, Raizen e seu grupo, tendo a colaboração de químico israelense Uzi Even (n.1940), estavam trabalhando no sentido de esfriar átomos usando feixes supersônicos (um gás escapando sob pressão de várias atmosferas em um furo no vácuo, se resfria enquanto se expande), já que estes são praticamente monoenergéticos. A primeira ideia deles foi a de construir um rotor com pás que se moviam, nas extremidades, à metade da velocidade do feixe de gás supersônico. Quando dirigiam pulsos do feixe em direção às pás

em retrocesso, esperavam que os átomos de gás diminuíssem a velocidade, da mesma maneira como a raquete de tênis em recuo consegue parar a bola (Raizen, op. cit.).

Sabedor da proposta de Hebner sobre a aceleração de um projétil magnético com o ricochete de um gás, Raizen teve a ideia de usar a proposta de Hebner, porém sem o projétil magnético, pois o papel deste seria representado pelas próprias moléculas do feixe supersônico que apresentam um pequeno paramagnetismo quando estão em movimento (excitadas). Assim, em 2007 (*New Journal of Physics*, p. 96; 358), ele e sua equipe (E. Narevicius, C. G. Parthey, A. Libson, M. F. Riedel e Even; E. Narevicius, Parthey, Libson, J. Narevicius, I. Chavez e Even) conseguiram parar feixe de átomos de neônio (Ne) e moléculas de oxigênio (O). Ainda em 2007 (*Physical Review* A75, p. 031402; A76, p. 031402), independentemente, o físico alemão Frédéric Merkt e sua equipe (N. Vanhaecke, U. Meier, M. Andrist e B. H. Meier; S. D. Hogan, D. Sprecher, Andrist e B. H. Meir) haviam conseguido imobilizar átomos de hidrogênio ( ${}^1\text{H}^1$ ) e de deutério ( ${}^1\text{H}^2$ ).

Muito embora o processo de resfriamento de muitos átomos e seu aprisionamento em campos magnéticos estáticos tivesse sido um sucesso, ele apresentava um limite na temperatura, pois com ele apenas se conseguia a temperatura de 0,01 K. Em busca de temperaturas cada vez menores do que essa, em visita que fez em fevereiro de 2004 ao físico de plasmas, o norte-americano Nathaniel Joseph Fisch (n.1950), da *Universidade de Princeton*, ele lhe contou que havia desenvolvido uma técnica de fazer uma corrente de elétrons atravessar um *plasma* (gás de elétrons e íons positivos) e forçando-os a se mover em determinada direção. Dessa conversa, surgiu-lhe a ideia de fazer algo parecido com átomos ou moléculas, ou seja, construir uma “porta” que permitisse a passagem de átomos em uma única direção. Conhecendo a história do demônio de Maxwell descrita acima, Raizen e seu grupo começaram a colocar em prática essa ideia, conhecida hoje como resfriamento por fóton único. Basicamente, ela consiste no seguinte: átomos em determinada temperatura são mantidos em uma armadilha magnética. A “porta maxwelliana” é constituída de dois lasers. O primeiro laser é ligado quando os átomos estão na situação indicada acima. Quando um segundo laser é ligado alguns átomos passam para o lado “direito” da “porta” mantendo a mesma velocidade das que tinham quando estavam no lado “esquerdo”. Contudo, quando alguns destes átomos que estão “à direita” querem voltar para o lado “esquerdo”, o primeiro laser faz com que elas ricocheteiam. Quando todos os átomos estão “à direita” e na mesma temperatura inicial, os dois lasers (“porta maxwelliana”) são desligados, ocasionando que os átomos voltem ao volume inicial, porém, como estão se expandindo, sua temperatura diminui. Essa técnica [denominada por Raizen de átomociência, com possíveis grandes aplicações em medicina (pequenas quantidades de isótopos de cálcio –  ${}_{20}\text{Ca}^{48}$ , e de itérbio –  ${}_{70}\text{Yb}^{178}$ ) e em litografia óptica] foi descrita, em 2010, por M. Jerkins, Chavez, Evan e Raizen (*Physical Review* A82, 033414), e por R. J. Clark, T. R. Mazur, Lisbon e Raizen (*Applied Physics* B76, on-line). (Raizen, op. cit.).

Concluindo este verbete, é interessante destacar que, em 2009, Raizen, T. Li, S. Keifets e D. Medelin estudaram o *movimento browniano* (vide verbete nesta série) de pequenas esferas (contas) de vidro mantidas em *pinças ópticas* (vide verbete nesta série) no ar, e, em 2010 (*Science* 10, p. 1126), eles conseguiram medir a velocidade instantânea de uma partícula browniana, conforme o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) havia previsto em seu trabalho de 1907 (*Zeitschrift für Elektrochemie* 13, p. 41). Para mais detalhes do trabalho de Raizen e seu grupo, ver: [george.ph.utexas.edu/publications.html](http://george.ph.utexas.edu/publications.html).

---



[ANTERIOR](#)

[SIGUIENTE](#)