



## SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



### Os Físicos Brasileiros e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 2001.

O PNF de 2001 foi atribuído aos físicos, os norte-americanos Eric Allin Cornell (n.1961) e Carl E. Wieman (n.1951), e o alemão Wolfgang Ketterle (n.1957), pela criação do **condensado Bose-Einstein** (CBE). Neste verbete, vou destacar os trabalhos de físicos estrangeiros e brasileiros que se relacionaram, diretamente ou indiretamente, com esse Prêmio, trabalhos esses que também receberam PNF (1981, 1989, 1996, 1997, 2005).

A possibilidade da existência de um CBE se deve aos trabalhos realizados pelos físicos, o indiano Satyendra Nath Bose (1894-1974) [*Zeitschrift für Physik* **26**, p. 178 (1924)] e o germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) [*Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Mathematisch-Physikalische Klasse, Sitzungsberichte*, p. 261 (1924); p. 3 (1925)]. Em seu trabalho, Bose considerou que os **pacotes quânticos de luz**, propostos por Einstein, em 1905, se comportavam como partículas indistinguíveis e satisfaziam a uma estatística diferente da **Estatística de Maxwell-Boltzmann** e, com isso, demonstrou a **fórmula da radiação do corpo negro**, obtida pelo físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918), em 1900 (vide verbete nesta série). Einstein, por sua vez, aplicou esse tipo de estatística Boseana a um gás perfeito monoatômico. Esse **gás de Einstein** diferia do **gás de Maxwell-Boltzmann** pois Einstein o considerou como sendo formado de partículas indistinguíveis e que ocupavam estados quânticos definidos. Essas idéias de Bose e Einstein constituem o que hoje se conhece como a **Estatística de Bose-Einstein** (vide verbete nesta série). É oportuno registrar que a revista inglesa *Philosophical Magazine* rejeitou o trabalho de Bose e ele então o enviou a Einstein que o traduziu para o alemão e o encaminhou para a revista alemã *Zeitschrift für Physik*, que então a publicou (vide referência acima).

Embora previsto teoricamente, a criação de um CBE só foi possível com o desenvolvimento de técnicas de obtenção de temperaturas ultrabaixas, conforme veremos a seguir. Segundo nos conta Ketterle (**Nobel Lecture**, 08 de dezembro de 2001), quando átomos bose-einsteinianos (bosônicos) são resfriados abaixo de uma dada temperatura crítica ( $T_C$ ), uma grande parte deles se condensa no mais baixo estado quântico. Com efeito, de acordo com a Mecânica Quântica, átomos na temperatura  $T$  e com a massa  $m$  podem ser considerados como pacotes de onda quânticos com o “comprimento de onda de Broglieano térmico” dado pela expressão:  $\lambda_{dB} = (2 \pi \hbar^2 / m k_B T)^{1/2}$ , com  $\hbar = h/2\pi$ , onde  $h$  é a **constante de Planck** e  $k_B$  é a **constante de Boltzmann**. Desse modo, quando um gás é resfriado ao ponto de tornar  $\lambda_{dB}$  comparável com a separação interatômica (lembrar que o comprimento  $\lambda_{dB}$  aumenta quando  $T$  diminui), os pacotes de onda atômicos se sobrepõem (“overlapping”) e o gás se torna uma “sopa quântica” de partículas indistinguíveis. Em vista disso, os átomos desse gás experimentam uma transição de fase quanto-mecânica e formam um CBE, ou seja, uma nuvem de átomos ocupando o mesmo estado quântico em uma temperatura precisa, a qual, para um gás ideal, com densidade atômica  $n$ , é dada pela expressão:  $n \lambda_{dB}^3 = 2,612$ . Portanto, para Ketterle (op. cit.), criar um CBE é extremamente simples: basta fazer um gás extremamente frio até que seus pacotes de onda atômicos comecem a se sobreporem, condensando-se em seguida. A dificuldade reside em obter temperaturas ultrafrias, uma vez que essa condensação ocorre em temperaturas da ordem de **nanoKelvin** ( $1nK = 10^{-9}$  K). Vejamos

como foram conseguidas essas temperaturas.

Em verbete desta série vimos como se desenvolveram as técnicas de se obter temperaturas cada vez mais baixas, com base no **efeito Joule-Thomson** (EJ-T), e que permitiram a descoberta de dois fenômenos físicos: a **supercondutividade** ( $\sim 4,2$  K), em 1911, e a **superfluidez**, do hélio-4 ( $\sim 2,19$  K), em 1938, e do hélio-3 ( $\sim 2,7$  mK), em 1972. Contudo, para a descoberta ou a criação do CBE, que ocorreu em 1995, conforme veremos mais adiante, as técnicas baseadas no EJ-T não foram suficientes para a obter o CBE. Portanto, novas técnicas de abaixamento de temperaturas foram desenvolvidas, conforme mostraremos a seguir. A primeira delas decorreu de uma idéia apresentada, em 1959 (*Physica* **25**, p. 1159), por E. C. Hecht, e que foi retomada, em 1976 (*Physical Review Letters* **36**, p. 910), por W. C. Stwalley e L. H. Nosanow. Usando a Mecânica Quântica, esses físicos demonstraram que, como o hidrogênio (H) spin-polarizado não apresenta estados ligados, ele poderia permanecer um gás em temperaturas muito baixas, nas proximidades do zero absoluto ( $0\text{ K} = -273,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Nessas condições, ele seria um bom candidato para representar um CBE. Essa idéia motivou uma série de experiências em busca da estabilização do H spin-polarizado, como a anunciada nos seguintes trabalhos: em 1980, I. F. Silvera e J. T. M. Walraven (*Physical Review Letters* **44**, p. 164) e, independentemente, Richard W. Cline, D. A. Smith, Thomas J. Greytak e Daniel Kleppner (*Physical Review Letters* **45**, p. 2117); em 1982 (*Physica* **109**, p. 1964), W. N. Wardy, M. Morrow, R. Jochemsen e A. J. Berlinsky; em 1983 (*Physical Review Letters* **51**, p. 483), Harold J. Hess, David A. Bell, Gregory P. Kochanski, Cline, Kleppner e Greytak; em 1984 (*Physical Review Letters* **52**, p. 1508), B. R. Johnson, J. S. Denker, N. Bigelow, L. P. Lévy, J. H. Freed e David Morris Lee (n.1931; PNF, 1996); em 1985 (*Physical Review* **B32**, p. 5668), R. Sprik, Walraven e Silvera; e, em 1986 (*Physical Review* **B34**, p. 7670), D. A. Bell, Hess, Kochanski, S. Buchman, L. Pollack, Y. M. Xiao, Kleppner e Greytak. É oportuno destacar que, em 1983 (*Physical Review Letters* **51**, p. 666), B. C. Crooker, B. Hebral, E. N. Smith, Y. Takano e John D. Reppy analisaram a possibilidade de obter um CBE em um gás diluído e interagindo fracamente, e que, em 1986 (*Physical Review* **B34**, p. 3476), Hess, do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), começou a investigar o aprisionamento magnético de átomos. É oportuno registrar que Hess foi para o MIT para realizar um pós-doutoramento no “grupo do hidrogênio”, do qual fazia parte Kleppner e Greytak. Nesse “grupo”, Hess foi o primeiro a propor a técnica de **resfriamento evaporativo**, que falaremos mais adiante.

Os experimentos sobre estabilização do H spin-polarizado, acima referidos, foram realizados em um refrigerador de diluição, em uma cavidade (“cell”) cujas paredes eram revestidas de hélio (He) superfluido funcionando como um revestimento não-aderente (“nonstick”) ao gás hidrogênio (H). Este, por sua vez, era comprimido em uma bolha (“bubble”) de hélio (Sprik, Walraven e Silvera, op. cit.) ou em um arranjo tipo “pistão-cilindro” (Bell, Hess, Kochanski, Buchman, Pollack, Xiao, Kleppner e Greytak, op. cit.). Contudo, tais experimentos falharam pois quando a cavidade se tornava muito fria, o H aderiu ao He e se recombinavam. Quando se tentava arrefecer a cavidade para evitar a aderência H-He, a densidade atômica ( $n$ ) requerida para a criação de um CBE aumentava e, portanto, essa criação não acontecia. (Eric Allin Cornell e Carl E. Wieman, **Nobel Lecture**, 08 de dezembro de 2001.) As dificuldades apontadas acima levaram alguns grupos de físicos experimentais a desenvolver novas técnicas que permitisse obter temperaturas cada vez mais baixas, técnicas essas que envolviam o aprisionamento de átomos neutros, inicialmente, ou pelo uso de luz laser, ou pelo uso de campos elétrico e magnético, e, posteriormente, com uma mistura dessas duas técnicas, a hoje conhecida técnica **magneto-óptica**. Registre-se que o **laser** (“Light Amplification by Stimulated Emission Radiation”) foi inventado pelo físico norte-americano Theodore Harold Maiman (n.1927), em 1960 (*Nature* **187**, p. 493; *British Communications Electronics* **1**, p. 674). É oportuno salientar que a revista norte-americana *Physics Review Letters* rejeitou esse trabalho de Maiman sobre a invenção do laser e que havia sido anunciada no *New York Times* de 07 de julho de 1960. Porém, em 1961, a revista norte-americana *Physical Review* (**123**, p. 1145) publicou o artigo de Maiman sobre a sua invenção, uma vez que as duas revistas inglesas (*Nature* e *British*), já o haviam publicado.

As primeiras idéias de que a luz laser poderia ser usada para esfriar átomos foram desenvolvidas

na década de 1960. Com efeito, em 1962 (*Zhurnal Eksperimental'noi Teoretiskoi Fiziki* **42**, p. 1567), o físico russo Gurgem Ashotovich Askar'yan (1929-1997) estudou as chamadas “forças dispersivas” ou “forças de gradiente”, que decorrem da interação entre um momento de dipolo elétrico induzido e o gradiente do campo luminoso incidente. Essas mesmas “forças” foram analisadas, em 1968 (*Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **7**, p. 348), pelo físico russo Vladilen S. Letkhov. Ainda em 1968 (*Institute of Electrical and Electronic Engineers: Journal of Quantum Electronics* **4**, p. 467), Theodor W. Hänsch (n.1941; PNF, 2005) e Peter Toschek mostraram como a distribuição de moléculas é afetada pela saturação no interior de um laser. Em 1970 (*Physical Review Letters* **24**; **25**, pgs. 156; 1321), Arthur Ashkin publicou dois artigos nos quais demonstrou, respectivamente, que feixes de laser de íon de argônio (Ar), de 514 nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) e dirigidos em sentidos contrários, poderiam ser presos em esferas de látex colocadas em água; e que um feixe de átomos poderia ser defletido pela pressão de radiação ressonante. É interessante registrar que, mais tarde, em 1980 (*Applied Optics* **19**, p. 660), Ashkin e J. M. Dziedzic conseguiram aprisionar esferas de látex, colocadas em água, usando feixes de lasers; e, em 1987, Ashkin e Dziedzic (*Science* **235**, p. 1517) e Ashkin, Dziedzic e T. Yamane (*Nature* **330**, p. 769), anunciaram que haviam aprisionado partículas de tamanho micrométrico, respectivamente, vírus de tabaco em forma coloidal e a bactéria *e-coli*, usando a técnica das **pinças ópticas** (“optical tweezers”) que havia sido descoberta por Ashkin, em 1979, conforme veremos mais adiante.

Novas técnicas do uso de laser para aprisionar átomos foram desenvolvidas na década de 1970. Em 1974 (*Physical Review Letters* **32**, p. 129), John Bjorkholm e Ashkin estudaram os efeitos de auto-aprisionamento de um feixe de laser em um vapor de sódio (Na) atômico. Ainda em 1974, em trabalhos independentes, Bernard Cagnac, Gilbert Grynberg e F. Biraben (*Physical Review Letters* **32**, p. 643); Marc D. Levenson e Nicolaas Bloembergen (n.1920; PNF, 1981) (*Physical Review Letters* **32**, p. 645); e Hänsch, Kenneth C. Harvey, G. Meisel e Arthur Leonard Schawlow (1921-1999; PNF, 1981), conseguiram um sinal de absorção de dois-fótons que exibia uma estreita característica **Doppler-livre**. Em 1975, também em trabalhos independentes, David J. Wineland e Hans Georg Dehmelt (n.1922; PNF, 1989) (*Bulletin of the American Physical Society* **20**, p. 637); e Hänsch e Schawlow (*Optics Communications* **13**, p. 68), sugeriram o mecanismo de **resfriamento Doppler** para diminuir a velocidade dos átomos, por intermédio de um feixe de laser dirigido no sentido contrário ao movimento desses átomos. Registre-se que esse resfriamento leva esse nome porque um átomo em movimento muda sua frequência por causa do **efeito Doppler** (vide verbete nesta série). Em 1976, Ennio Arimondo e G. Orriols (*Lettere al Nuovo Cimento* **17**, p. 333) e, independentemente, G. Alzetta, Adriano Gozzini, L. Moi e Orriols (*Nuovo Cimento* **B36**, p. 5) descreveram a técnica conhecida como CPT (“Coherent Population Trapping”), segundo a qual os átomos mais lentos são colocados em um “estado escuro”, que os tornam “transparentes” ao laser utilizado, isto é, não absorvem fótons; por isso, ela ficou conhecida como **transparência induzida eletromagneticamente**. Em 1978, novos trabalhos sobre o aprisionamento atômico com laser foram apresentados por Ashkin (*Physical Review Letters* **40**, p. 729), que desenvolveu a técnica de aprisionamento de átomos por pressão de radiação ressonante, técnica essa conhecida como **pinças ópticas** (“optical tweezers”); e por Bjorkholm, Richard R. Freeman, Ashkin e D. B. Pearson (*Physical Review Letters* **41**, p. 1361), que conseguiram aprisionar átomos focando um feixe atômico com um laser. Observe-se que esse tipo de aprisionamento atômico decorria, segundo Ashkin, de uma “força de espalhamento”, pois a luz quando atinge um objeto (átomos, no caso) é espalhada em todas as direções. É oportuno registrar que, ainda em 1978, foram realizadas as primeiras experiências sobre o resfriamento de íons por laser, como a conduzida por Wineland, R. Drullinger e F. Walls (*Physical Review Letters* **40**, p. 1639) ao resfriarem uma nuvem de íons de magnésio (Mg), e a realizada por W. Neuhauser, M. Hohenstatt, Toschek e Dehmelt (*Physical Review Letters* **41**, p. 233) relacionada com o resfriamento de íons de bário (Ba). Em 1979 (*Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **29**, p. 614), Victor I. Balykin, Letkhov e V. Mushin anunciaram que haviam resfriado átomos livres de sódio (Na) em um campo de laser ressonante com escaneamento de frequência. É interessante notar que as experiências sobre resfriamento

atômico e iônico analisadas acima, são exemplos microscópicos dos efeitos macroscópicos mecânicos da luz observados pela primeira vez, em 1901 (*Annalen der Physik Leipzig* **6**, p. 433), pelo físico russo Pyotr Nikolayevich Lebedev (1866-1912) e, independentemente, em 1903 (*Annalen der Physik Leipzig* **12**, p. 225), pelos físicos norte-americanos Ernest Fox Nichols (1869-1924) e Gordon Ferrie Hull (1870-1956).

Vejamos agora as novas técnicas de resfriamento atômico (óptico e magneto-óptico) desenvolvidas na década de 1980, em vários laboratórios localizados na Rússia, nos Estados Unidos e na França. Em 1981 (*Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **34**, p. 463), S. V. Andreev, Balykin, Letokhov e Valdimir G. Minogin, na Rússia, conseguiram resfriar átomos neutros de Na, na temperatura de 1,5 K, usando um laser de frequência fixa dirigido em sentido contrário ao movimento desses átomos. Em 1982 (*Physical Review Letters* **48**; **49**, pgs. 596; 1149), William D. Phillips (n.1948; PNF, 1997), Harold J. Metcalf e John V. Prodan, nos Estados Unidos, usaram a técnica conhecida como **resfriamento Zeeman** ("Zeeman cooling") para resfriar átomos de Na, na temperatura de 70 mK, usando um feixe de laser. Registre-se que essa técnica, que havia sido proposta por Phillips, em 1979, ao *Office of Naval Research* do NBS ("National Bureau of Standards"), usa um campo magnético para mudar os **subníveis Zeeman** (vide verbete nesta série) de energia do átomo, mantendo-o em ressonância com um laser de frequência fixa. Em 1983 (*Physical Review Letters* **51**, p. 1336), David E. Pritchard, também nos Estados Unidos, anunciou que havia resfriado átomos neutros em uma armadilha magnética. Novos resultados decorrentes da técnica do **resfriamento Zeeman** foram apresentados, em 1984 (*Progress in Quantum Electronics* **8**, pgs. 119; 231) e 1985 (*Journal of the Optical Society of América* **B2**, p. 1751; *Comments on Atomic and Molecular Physics* **16**, p. 79), por Phillips, em trabalhos realizados com Prodan e Metcalf, apenas com Prodan, e apenas com Metcalf.

Dificuldades com as técnicas de resfriamento de átomos tratadas acima, fizeram com que as mesmas fossem re-examinadas e, em consequência, novas outras foram propostas. Por exemplo, na França, Claude N. Cohen-Tannoudji (n.1933; PNF, 1997), desenvolveu algumas dessas novas técnicas. Vejamos quais. Para a preparação de sua Tese de Doutorado, realizada sob a supervisão dos físicos franceses Alfred Kastler (1902-1984; PNF, 1966) e Jean Brossel (1918-2003), Cohen-Tannoudji e seu colega Jean-Pierre Barrat estudaram o bombeamento ("pumping") óptico de isótopos ímpares de mercúrio (Hg), que havia sido o objeto da Tese de Doutorado de Cagnac. Nesse estudo, eles investigaram os elementos não-diagonais da matriz densidade (as chamadas "coerências" atômicas) características daquele bombeamento e, teoricamente, previram os deslocamentos ("shifts") de vários **subníveis Zeeman** atômicos. Objetivando detectá-los, Cohen-Tannoudji usou o mesmo equipamento de Cagnac e, na véspera do Natal de 1960, encontrou a primeira evidência experimental desse efeito, denominado inicialmente de "lamp shift", por Kastler e Brossel, uma vez que ele foi produzido pela luz vinda da descarga de uma lâmpada. Os primeiros resultados desse efeito, posteriormente conhecido como "light shift" e, também, como **efeito Stark de corrente alternada**, foram apresentados em 1961, por Cohen-Tannoudji (*Comptes Rendus de l'Académie de Sciences de Paris* **252**, p. 394), e por Cohen-Tannoudji e Barrat (*Journal de Physique et le Radium* **22**, pgs. 329; 443). Entusiasmado com esse resultado, Cohen-Tannoudji desenvolveu um novo equipamento para estudar melhor esse efeito, e seus resultados foram discutidos em sua Tese de Doutorado, defendida em dezembro de 1962, na *Universidade de Paris*, na qual foi posteriormente professor, por indicação de Kastler. Foi nessa Universidade que Cohen-Tannoudji iniciou o estudo da interação fóton-átomo no limite de alta intensidade. Ora, como nesse limite o tratamento perturbativo não é aplicável, ele desenvolveu o conceito de "átomo vestido", que é um sistema global "átomo + fóton" descrito por uma Hamiltoniana independente do tempo e possuindo níveis de energia verdadeiros. (Claude N. Cohen-Tannoudji, **Nobel Lecture**, 08 de dezembro de 1997.)

Em 1973, Cohen-Tannoudji foi ensinar no *Collège de France*, indicado por seu antigo professor, o físico francês Anatole Abragam (n.1914). Nesse Colégio e na década de 1980, ele montou um laboratório e, junto com alguns colaboradores (Arimondo, Alain Aspect, Jean Dalibard, R. Kaiser, Metcalf, Christophe Salomon e N. Vansteenkiste), aplicou o conceito de "átomo vestido" para

manipular átomos com fótons e, com isso, conseguir o resfriamento óptico de átomos isolados. Em 1985 (*Journal of the Optical Society of America* **B2**, p. 1707), Cohen-Tannoudji e Dalibard usaram aquele conceito para interpretar as “forças de dipolos” (“forças dispersivas” ou “forças de gradiente”) que haviam sido estudadas por Askar’yan, em 1962, e por Letokhov, em 1968, conforme vimos anteriormente. Nesse artigo, eles analisaram a dependência da velocidade dessas “forças” em termos dos gradientes espaciais dos estados de energia “vestidos”, e, também, as emissões espontâneas entre tais estados, pois essas emissões representam um importante papel como um mecanismo de amortecimento, além de constituírem uma fonte de fótons fluorescentes, conforme veremos a seguir. Em 1987 (*Physical Review Letters* **59**, p. 1659), Cohen-Tannoudji, Aspect, Dalibard, Metcalf e Salomon investigaram a correlação entre as modulações espaciais daqueles estados “vestidos” e as modulações espaciais das emissões espontâneas entre esses mesmos estados. Dessa análise, eles observaram que o átomo considerado, ao absorver um fóton, era capaz de subir uma barreira de potencial, mas logo perdia energia, pela emissão espontânea de um fóton mais energético do que a energia do fóton que o levava para cima; voltava então a subir, ao receber um novo fóton, e logo caía, como no caso anterior, e assim sucessivamente. Portanto, como em cada caída o átomo perdia mais energia do que recebia em cada subida, o resultado final resultava em um resfriamento. Registre-se que, em analogia com o ser mitológico Sísifo, que rolava, sem cessar, uma pedra morro acima, Cohen-Tannoudji deu a esse mecanismo de resfriamento o nome de **resfriamento Sísifo** (“Sisyphus cooling”). Contudo, esse tipo de resfriamento apresentava um limite de aplicabilidade, devido ao recuo dos fótons: absorvedor e emissor espontâneo. Para contornar essa dificuldade, Cohen-Tannoudji, Arimondo, Aspect, Kaiser e Vansteenkiste propuseram um resfriamento do tipo **resfriamento sub-recuo** (“subrecoil cooling”), também conhecido como VSCPT (“Velocity Selective Coherent Population Trapping”) (baseado na CPT, vista acima), em trabalhos publicados em 1988 (*Physical Review Letters* **61**, p. 826) e 1989 (*Journal of the Optical Society of America* **B6**, p. 2112). Destaque-se que, na década de 1990, Cohen-Tannoudji e seus colaboradores estenderam a técnica VSCPT para duas e três dimensões e, com isso, conseguiram atingir temperaturas na escala do **nanoKelvin** (nK). (Para detalhes e resultados dessa nova técnica, ver Cohen-Tannoudji, op. cit.)

Paralelamente a essas técnicas sobre o resfriamento atômico e desenvolvidas por físicos franceses, do outro lado do Atlântico, físicos norte-americanos também pesquisaram outras técnicas tendo em vista esse resfriamento. O físico norte-americano Steven Chu (n.1948; PNF, 1997), depois de obter o seu Doutorado, em 1976, na *Universidade de Berkeley*, sob a orientação do físico norte-americano Eugene D. Commins, Chu foi trabalhar, no outono de 1978, nos *Bell Laboratories*, em Holmdel, New Jersey, onde também trabalhava Ashkin. Inicialmente, realizou trabalhos com Hyatt M. Gibbs, S. L. McCall e A. Passner, sobre a microscopia de raios-X e, em 1980 (*Physical Review Letters* **45**, p. 1715), esses quatro cientistas realizaram uma experiência sobre a transferência de energia no rubi (óxido de alumínio:  $Al_2O_3$ ), ocasião em que Chu descobriu uma nova técnica de construção de lasers de picosegundo ( $10^{-12}s$ ). Em 1985 (*Physical Review Letters* **55**, p. 48), Chu, Leo Hollberg, Bjorkholm, Alex Cable e Ashkin desenvolveram um mecanismo usando seis feixes de laser oposto em pares e dispostos em três direções perpendiculares entre si. Dessa forma, um feixe de átomos de Na foi desacelerado por um laser oposto ao seu movimento, e em seguida esses átomos foram conduzidos para a região de intersecção dos seis lasers, regulados na frequência correta para freá-los. Assim, em qualquer direção, aqueles átomos encontravam fótons com a energia correta e eram levados de volta para a região de interceptação dos lasers; estes, então, funcionavam como um líquido viscoso, denominado por eles de **melaço óptico** (“optical molasse”), que freava os átomos de Na, numa temperatura em torno de 240  $\mu$ K.

O “melaço” descrito acima, no entanto, apresentava uma dificuldade, pois não conseguia aprisionar os átomos que por lá passavam, uma vez que os mesmos eram contidos apenas por cerca de 0,5 s. É oportuno notar que essa dificuldade decorria do famoso Teorema Óptico de Earnshaw conforme foi mostrado, em 1979, por Wineland e Wayne M. Itano (*Physical Review* **A20**, p. 1521) e, independentemente, por Minogin e O. T. Serimaa (*Optics Communications* **30**, p. 373); em 1980 e



1983 (*Physical Review* **A21**, p. 1606; *Optical Letters* **8**, p. 511), por James P. Gordon e Ashkin; e em 1981 (*Optics Communications* **37**, p. 442), por Minogin. Segundo esses trabalhos, aquele Teorema impedia o aprisionamento atômico usando espalhamento de luz. [Registre-se que, em 1842 (*Transactions of the Cambridge Philosophical Society* **7**, p. 97), o Reverendo Samuel Earnshaw (1805-1888), demonstrou que “partículas sob a ação de forças que variam com o inverso do quadrado da distância não podem estar em equilíbrio estático”.]

A dificuldade apontada acima começou a ser contornada com os trabalhos realizados pelos grupos de pesquisas liderados, independentemente, por Phillips, por Weiman, e por Chu. Com efeito, em 1985, Prodan, Alan L. Migdall, Phillips, Ivan So, Metcalf e Dalibard (*Physical Review Letters* **54**, p. 992); Wolfgang Ertmer, Rainer Blatt, John L. Hall (n.1934; PNF, 2005) e M. Zhu (*Physical Review Letters* **54**, p. 996); e Migdall, Prodan, Phillips, T. H. Bergman e Metcalf (*Physical Review Letters* **54**, p. 2596) desenvolveram uma nova técnica de confinamento magnético de átomos, com o uso adicional de um pulso curto de luz de laser para freá-los. Observe-se que o grupo de Ertmer usou uma técnica conhecida como C-C (“chirp-cooling”). Em 1986, Richard N. Watts (1957-1996) e Weiman (*Optics Letters* **11**, p. 291), e, independentemente, Pritchard, Eric I. Raab, o físico brasileiro Vanderlei Salvador Bagnato (n.1958), Wieman e Watts (*Physical Review Letters* **57**, p. 310), mostraram (seguindo uma sugestão de Dalibard) que o aprisionamento de átomos neutros poderia ser conseguido usando uma combinação de campos externos magnéticos ou elétricos. Também em 1986 (*Physical Review Letters* **57**, p. 314), Chu, Bjorkholm, Ashkin e Cable desenvolveram uma armadilha para aprisionar átomos com um único feixe de laser localizado. É oportuno salientar que foi nesse trabalho que apareceu a primeira figura colorida na *Physical Review Letters*. Em 1987 (*Physical Review Letters* **58**, p. 2194), Bagnato, G. Lafyatis, Alex Martin, Raab, R. Ahmad-Bitar e Pritchard conseguiram o aprisionamento magnético de átomos neutros. Ainda em 1987 (*Physical Review Letters* **59**, p. 2631), Raab, Mara G. Prentiss, Cable, Chu e Pritchard desenvolveram a técnica conhecida como MOT (“magneto-optical trap”), que é uma armadilha (“trap”) de prender átomos usando campo magnético. Observe-se que essa técnica, que é uma extensão tridimensional da idéia unidimensional sugerida por Dalibard, em 1986, combina aprisionamento (“trapping”) e resfriamento (“cooling”), e apresenta um amplo alcance de velocidade para a captura de átomos. Em 1988 (*Journal of the Optical Society of América* **B5**, p. 1225), D. W. Sesko, C. Fan e Wieman apresentaram novos resultados da medida de temperaturas de átomos próximas do limite esperado usando a técnica do **melaço óptico**. É oportuno destacar que, em 1987 (*Physical Review* **A35**, p. 4354), Bagnato, Pritchard e Kleppner demonstraram que para um sistema de N átomos não-interagentes presos em um potencial do oscilador harmônico esféricamente simétrico com frequência  $\omega$ , a temperatura crítica ( $T_0$ ) para um CBE é dada por:

$$k T_0 = [N \zeta(\frac{1}{2})]^{-1/2} \hbar \omega, \text{ onde } \zeta(\frac{1}{2}) \sim 1,202 \text{ é a } \textit{função zeta de Riemann}.$$

As técnicas de resfriamento atômico tratadas acima, **melaço óptico** (1985) e MOT (1987), não se comportavam exatamente como se esperava na determinação da temperatura dos átomos confinados. Em vista disso, os grupos de pesquisa, sob a orientação de Philips, de Chu e de Cohen-Tannoudji, começaram a desenvolver uma nova técnica conhecida como **resfriamento sub-Doppler**, cujo primeiro resultado foi apresentado, em 1988 (*Physical Review Letters* **61**, p. 169), por Paul D. Lett, Watts, Christoph I. Westbrook, Phillips, Phillip L. Gould e Metcalf. Para o desenvolvimento dessa técnica foi importante o método TOF (“time-of-flight”), sugerido por Metcalf, segundo o qual os átomos são inicialmente capturados em um “melaço óptico”, e, então, eles são relaxados por um feixe de laser do tipo “melaços”. Com isso, eles conseguiram resfriar átomos de Na na temperatura de 40  $\mu$ K, superando a temperatura de 240  $\mu$ K conseguida com a técnica **melaço óptico**, conforme vimos acima. Em 1989, novos resultados dessa nova técnica foram conseguidos por Dalibard e Cohen-Tannoudji (*Journal of the Optical Society of América* **B6**, p. 2023); por P. J. Ungar, David S. Weiss, Erling Riis e Chu (*Journal of the Optical Society of América* **B6**, p. 2058); por Weiss, Riis, Yaakov Shevy, Ungar e Chu (*Journal of the Optical Society of América* **B6**, p. 2072); e por Lett, Phillips, Steve L. Rolston, Carol E. Tanner, Watts e Westbrook (*Journal of the Optical Society of América* **B6**, p. 2084). Assim como Cohen-Tannoudji, Chu e Phillips continuaram, na década de 1990, a trabalhar em novas técnicas de resfriamento de

átomos, cujos resultados encontram-se registrados em suas **Nobel Lecture**: Cohen-Tannoudji (op. cit.); Steven Chu (08 de dezembro de 1997); e William D. Phillips (08 de dezembro de 1997). Muito embora as técnicas desenvolvidas para o resfriamento atômico, por laser e por armadilhas magneto-ópticas, permitissem obter temperaturas cada vez mais baixas, conforme destacamos acima, elas, contudo, eram insuficientes para a criação de um **condensado Bose-Einstein** (CBE), uma vez que aquelas técnicas não conseguiam a temperatura e a densidade atômica necessárias para essa criação. Para tal criação, foi importante os trabalhos desenvolvidos por Wieman e Cornell, na *Universidade do Colorado*, em Boulder, assim como o de Ketterle, no MIT. Vejamos como esses físicos conseguiram criar um CBE, em 1995. É oportuno registrar que Wieman, que foi aluno de Iniciação Científica de Kleppner no MIT, obteve o seu Doutorado, em 1977, na *Universidade de Stanford*, sob a direção de Hänsch; Ketterle doutorou-se, em 1986, na *Universidade de Munique*, orientado por Herbert Walther e Hartmut Figger, do *Instituto Max Planck de Óptica Quântica*; e Cornell (aluno de Pritchard) teve a sua Tese de Doutorado supervisionada por Francis Everett e John Turneasure, e defendida em 1990, no MIT.

Segundo Cornell e Wieman (op. cit.), o interesse deles para a produção de um CBE em um gás diluído começou em 1990, em decorrência de um trabalho realizado C. R. Monroe, W. Swann, H. Robinson e Wieman, ainda em 1990 (*Physical Review Letters* **65**, p. 1571), no qual eles usaram a técnica MOT, descrita acima, para aprisionar átomos em uma pequena célula cheia de vapor a baixa pressão. Logo depois, em 1991 (*Journal of the Optical Society of America* **B8**, p. 946), Sesko, T. G. Walker e Wieman mostraram que a pressão luminosa de fótons re-irradiados limita a densidade dos átomos aprisionados por aquela técnica. Em virtude disso, e agora com a colaboração de Cornell, Wieman começou a modificar a MOT. Assim, ainda em 1991 (*Physical Review Letters* **67**, p. 2439), Cornell, Monroe e Wieman estudaram o aumento da densidade dos átomos aprisionados usando um melhoramento daquela técnica, que chamaram de M-MOT-L (“Multiple-MOT-Loading”). Em 1993 (*Physical Review Letters* **70**, p. 414), Monroe, Cornell, C. A. Sackett, C. J. Myatt e Wieman realizaram experiências sobre o resfriamento usando colisões elásticas foto-associativas de átomos de césio (Cs) na temperatura de 30  $\mu$ K. Aliás, a colisão de átomos ultrafrios também foi objeto de estudo, usando espectroscopia de duas-cores e ainda em 1993 (*Physical Review Letters* **70**, p. 3225), por parte de Bagnato, Luís G. Marcassa, C. C. Tsao, Y. Wang e J. Weiner. Também em 1993 (*Optics and Photonics News* **4**, p. 8), S. L. Gilbert e Wieman anunciaram que haviam resfriado e armazenado átomos em temperaturas entre 1 e 0.1 mK. Em 1994 (*Journal of the Optical Society of America* **B11**, p. 946), Wolfgang Petrich, Michael H. Anderson, J. R. Ensher e Cornell descreveram um outro aprimoramento da MOT, denominado por eles de CMOT (“Compressed MOT”). Em 1995 (*Physical Review Letters* **74**, p. 3352), Petrich, Anderson, Ensher e Cornell estudaram a estabilidade do aprisionamento magnético confinante para o resfriamento evaporativo de átomos neutros. Por fim, em 1995 (*Science* **269**, p. 198), Anderson, Ensher, M. R. Matthews, Wieman e Cornell anunciaram que haviam criado o primeiro CEB, ao condensaram cerca de dois mil átomos de rubídio-87 ( ${}_{37}\text{Rb}^{87}$ ), na temperatura de 20 nK.

Vejamos, agora, o trabalho independente de Ketterle para também criar um outro CEB. Segundo nos conta o físico brasileiro Cláudio Lenz Cesar (n.1964) [*Ciência Hoje* **30**, p. 16 (2001)], no MIT, Kleppner, com o seu grupo de pesquisa e do qual ele participava, a partir de 1991, desenvolveu uma técnica para resfriar átomos, por processo de evaporação. Nesse processo de evaporação, inicialmente a amostra gasosa atômica é aprisionada em uma armadilha magneto-óptica, em uma quantidade bastante grande, cerca de um bilhão de átomos, em uma temperatura da ordem de  $\mu$ K, e depois são transferidos para uma armadilha magnética, para que seja iniciado o resfriamento evaporativo, que consiste em remover os átomos mais quentes da amostra aplicando radiofrequência e, assim, reduzir ainda mais a temperatura, para a ordem de nK. Desse modo, os primeiros resultados foram apresentados em 1992, em trabalhos realizados por Ketterle e Pritchard (*Applied Physics* **B54**, p. 403; *Physical Review* **A46**, p. 4051) e por Ketterle, Martin, Michael A. Joffe e Pritchard (*Physical Review Letters* **69**, p. 2483), nos quais conseguiram aprisionar uma amostra gasosa de H, com densidade atômica dada por  $8 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ , em temperaturas da ordem de  $10^{-5}$  K. Mais tarde, em 1993 (*Physical Review Letters* **70**, p. 2253), Ketterle, K. B. Davis, Joffe,

Martin e Pritchard conseguiram um aumento da densidade de átomos aprisionados usando a MOT. Em 1995 (*Physical Review Letters* **74**, p. 5202), Davis, Marc-Oliver Mewes, Joffe, Michael R. Andrews e Ketterle estudaram o resfriamento evaporativo de átomos de Na. Por fim, em 1995 (*Physical Review Letters* **75**, p. 3969), Davis, Mewes, Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn e Ketterle anunciaram que haviam criado um outro CEB, condensando quinhentos mil ( $5 \times 10^5$ ) átomos de sódio-23 ( $_{11}\text{Na}^{23}$ ), na temperatura de 2  $\mu\text{K}$ . É oportuno salientar que, nesse mesmo número **75** da *PRL*, porém na página 1687, C. C. Bradley, Sackett, J. J. Tollett e Randall G. Hulet (aluno de doutorado de Kleppner) anunciaram a evidência de um CBE, ao condensarem  $2 \times 10^4$  átomos de lítio-5 ( $_{3}\text{Li}^5$ ), em uma temperatura entre 100-400 nK.

É interessante registrar que, segundo me falou César, em e-mail do dia 29 de maio de 2008, foi ele, Cesar, quem desenvolveu a primeira espectroscopia a laser dos átomos aprisionados, em 1993, no “grupo do hidrogênio” do MIT, e que permitiu, em 1995, a criação de um CEB com o maior número de átomos por parte desse “grupo”, conforme registramos acima. Ainda nesse e-mail, Cesar me falou que Ketterle fez pós-doutoramento com Pritchard, cujo laboratório foi passado para Ketterle quando este foi contratado como professor do MIT. Em comentário feito também nesse e-mail, César diz que Kleppner pode ser considerado o “quase-pai do CEB”, por ter sido o orientador de quase todos os físicos envolvidos na criação do primeiro CEB, por haver desenvolvido a técnica do **resfriamento por evaporação forçada**, e por ter dominado a corrida em busca dessa criação. Contudo, ele perdeu a corrida porque trabalhou com hidrogênio que, por possuir uma seção de choque muito pequena, levava tempos muitos longos na termalização e, portanto, a evaporação se tornava baixa.

Na conclusão deste verbete (que homenageia os físicos brasileiros Vanderlei Salvador Bagnato e Cláudio Lenz Cesar), é interessante registrar que Bagnato e sua equipe de colaboradores (E. A. L. Henn, J. A. Seman, E. R. F. Ramos, A. H. Iavaranni e T. Amthor), conseguiram criar, em 2007 (*American Journal of Physics* **75**, p. 907; *Ciência Hoje* **41**, p. 54), o primeiro CBE latino-americano, no Instituto de Física de São Carlos, da Universidade de São Paulo, condensando cerca de  $10^5$  átomos de rubídio-87 ( $_{37}\text{Rb}^{87}$ ), na temperatura em torno de 180 nK. Por fim, aproveito a oportunidade para agradecer a Cláudio Lenz Cesar, a leitura crítica deste artigo.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)