



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Aprisionamento Óptico a Frio de Átomos (Pinças Ópticas, Melaço Óptico, Efeito Sísifo) e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1997.

O PNF de 1997 foi atribuído aos físicos, o francês Claude N. Cohen-Tannoudji (n.1933) e os norte-americanos Steven Chu (n.1948) e William D. Phillips (n.1948) pela descoberta, independente, de métodos de prender átomos a frio por intermédio de lasers. Cohen-Tannoudji concluiu seu curso secundário (*High School*) em sua cidade natal, Constantine, na Argélia francesa. Em 1953, foi admitido na *École Normale Supérieure*, em Paris. Em seu primeiro ano de estudo nessa Escola, foi aluno dos franceses, os matemáticos Henri Paul Cartan (1904-2008) e Laurent Moïse Schwartz (1915-2002), e o físico Alfred Kastler (1902-1984; PNF, 1966). Embora tivesse seu interesse inicial voltado para a Matemática, as aulas estimulantes de Kastler fizeram-no decidir por ser físico, cuja carreira iniciou-se em 1955, ao juntar-se ao grupo do próprio Kastler, do qual fazia parte o físico francês Jean Brossel (1918-2003) e seus alunos de doutoramento, os franceses Jacques Emile Blamont (n.1926) e Jacques Michel Winter. Enquanto se preparava para obter o seu diploma de *Agrégation* (uma espécie de Vestibular), Cohen-Tannoudji realizou cursos com vários físicos famosos, dentre os quais se destacam os franceses Albert Messiah (n.1921), Anatole Abragam (n.1914) e Claude Bloch, os norte-americanos Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965), Norman Foster Ramsey (n.1915; PNF, 1989) e George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) (de origem holandesa), e o austríaco Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945).

Depois de obter o *Agrégation*, em 1957, Cohen-Tannoudji realizou o Serviço Militar, em virtude da *Guerra da Argélia* (1954-1962), estudando o comportamento de foguetes na alta atmosfera, sob a supervisão de Blamont. Concluído esse Serviço, em 1960, ele voltou à *École Normale*, iniciando, então com Kastler e Brossel, seu trabalho de Doutoramento. Nessa ocasião o físico francês Bernard Cagnac (n.1931) havia concluído sua Tese de Doutoramento, na qual estudou o bombeamento (*pumping*) óptico de isótopos ímpares de mercúrio (Hg). Junto com Jean-Pierre Barrat, Cohen-Tannoudji estudou teoricamente esse bombeamento, principalmente os elementos não-diagonais da matriz densidade (as chamadas “coerências” atômicas), ocasião em que descobriu os **light shifts** para os vários **subníveis Zeeman** de um átomo. Objetivando detectá-los, Cohen-Tannoudji usou o equipamento de Cagnac e, na véspera de Natal de 1960, encontrou a primeira evidência experimental desse efeito, denominado de **Lamp shift**, por Kastler e Brossel, uma vez que ele foi produzido pela luz vindo da descarga de uma lâmpada (*lamp*). Os primeiros resultados desse efeito, conhecido posteriormente como **efeito Stark de corrente alternada**, foram publicados, em 1961, por Cohen-Tannoudji (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* **252**, p. 394), e por Barrat e Cohen-Tannoudji (*Journal de Physique et le Radium* **22**, p. 329; 443). Em vista disso, Cohen-Tannoudji desenvolveu um novo equipamento para estudar melhor esse efeito, e seus resultados foram discutidos em sua Tese de Doutoramento, defendida em dezembro de 1962.

Logo depois que Cohen-Tannoudji obteve o Doutoramento em Física, Kastler o indicou para ser professor da *Universidade de Paris*, na qual havia sido recentemente criado o *troisième cycle* (um curso equivalente ao Mestrado), para alunos graduados e com um programa flexível. Por indicação de Brossel, Cohen-Tannoudji começou a ensinar Mecânica Quântica nesse Curso. No entanto, Cohen-Tannoudji percebeu que os estudantes careciam de uma base melhor dessa disciplina. Assim, em 1967, começou a ministrar aulas de Mecânica Quântica para um nível mais baixo e, mais tarde, essas aulas

transformaram-se no famoso livro **Quantum Mechanics** (John Wiley, 1977), escrito com a colaboração de Franck Laloë e Bernard Diu.

Na *Universidade de Paris* e paralelamente ao ensino que aí ministrava, Cohen-Tannoudji criou seu próprio Grupo de Pesquisas e, contando com uma plêiade de talentosos estudantes franceses: Nicole Polonsky, Serge Haroche (n.1944), Jacques Dupont-Roc, Claude Landré, Gilbert Grynberg, Maryvonne Ledourneuf e Claude Fabre, começou o estudo da interação fóton-átomo no limite de alta intensidade. Ora, como nesse limite o tratamento perturbativo não é mais aplicável, Cohen-Tannoudji 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. É oportuno registrar que Cohen-Tannoudji e Dupont-Roc mostraram, em 1972 (*Physical Review A* **5**, p. 968), que o **light shift** poderia ser descrito em termos de campos elétricos ou magnéticos fictícios.

Em 1973, Abragam indicou Cohen-Tannoudji para ser Professor de Física Atômica e Molecular no *Collège de France*. Neste Colégio e na década de 1980, Cohen-Tannoudji montou um laboratório objetivando aplicar o conceito de **átomo vestido**, que havia desenvolvido anteriormente, para, basicamente, manipular átomos com fótons e, desse modo, conseguir o **esfriamento óptico** de átomos isolados. Nesse laboratório, contou com novos colaboradores dentre os quais se destacam Serge Reynand, Christian Tanguy, Jean Dalibard, Alain Aspect (n.1947), Christophe Salomon, Ennio Arimondo, Harold J. Metcalf, R. Kaiser e N. Vansteenkiste, com os quais desenvolveu projetos pioneiros de pesquisa. Por exemplo, em 1985 (*Journal of the Optical Society of America B* **2**, p. 1707), Dalibard e Cohen-Tannoudji usaram o **átomo vestido** para interpretar, de maneira simples, as flutuações das **forças de dipolos**. Estas, também conhecidas como **forças dispersivas** ou **forças de gradiente**, que decorrem da interação entre um momento de dipolo induzido e o gradiente do campo luminoso incidente, foram primeiramente estudadas pelos físicos russos Gurgem Ashotovich Askar'yan (1929-1997), em 1962 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **42**, p. 1567), e Vladilen Stepanovich Letokhov (1939-2009), em 1968 (*Pis'ma Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **7**, p. 348). No trabalho referido acima, Dalibard e Cohen-Tannoudji estudaram a dependência da velocidade daquelas **forças** em termos dos gradientes espaciais dos estados de energia **vestidos**, e, também, as transições espontâneas entre tais estados. Destaque-se que a emissão espontânea representa um importante papel como um mecanismo de amortecimento e, também, como uma fonte de fótons fluorescentes. Desse modo, esse trabalho foi fundamental para entender o movimento atômico em uma onda laser (sobre laser, ver verbetes nesta série), base do processo de esfriamento óptico-atômico que Cohen-Tannoudji e seu grupo desenvolveriam posteriormente, conforme veremos a seguir.

Ainda em 1985 (*Physical Review Letters* **55**, p. 48), Chu e os físicos norte-americanos Leo Hollberg, John E. Bjorkholm, Alex Cable e Arthur Ashkin (n.1922) desenvolveram um mecanismo de resfriamento usando seis feixes de laser opostos em pares e dispostos em três direções perpendiculares entre si. Dessa forma, um feixe de átomos de sódio (Na) foi desacelerado por um laser oposto ao movimento do feixe, 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, os átomos de Na encontravam fótons com a energia certa 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** (MO) (*optical molasse*), que freava os átomos. Desse modo, formou-se uma nuvem do tamanho de uma ervilha composta de átomos de Na na temperatura em torno de 240 μK ($1 \mu\text{K} = 10^{-6}$ K), correspondendo a uma velocidade de 30 cm/s. O mecanismo de resfriamento descrito acima, conhecido como **resfriamento Doppler** (*Doppler cooling*), fora sugerido, em 1975, em trabalhos independentes dos físicos norte-americanos Theodor W. Hänsch (n.1942; PNF, 2005) (de origem alemã) e Arthur Leonard Schawlow (1921-1999; PNF, 1981) (*Optical Communications* **13**, p. 68), e David J. Wineland e Hans Georg Dehmelt (n.1922; PNF, 1989) (de origem alemã) (*Bulletin of the American Physical Society* **20**, p. 637). Note-se que esse resfriamento leva o nome de Doppler porque, como um átomo em movimento muda a sua frequência por causa do **efeito Doppler** (vide verbete nesta série), é necessário diminuir a velocidade dos átomos para melhorar a precisão das medidas de suas frequências.

Logo em 1986, Cohen-Tannoudji e alguns de seus colaboradores (Salomon, Dalibard, Aspect e Metcalf) começaram a investigar um novo mecanismo de resfriamento estudando o movimento de um átomo em um intenso feixe de laser estacionário. Assim, analisando a correlação entre as modulações espaciais de estados **vestidos** de energia e as modulações espaciais das emissões espontâneas entre esses mesmos estados, 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 novamente caía, como no caso anterior, e assim sucessivamente. Assim, como em cada caída o átomo perdia mais energia do que recebia em cada subida, o resultado final resultava em um resfriamento. Em analogia com o ser mitológico Sísifo - que rolava uma enorme pedra até o alto de um morro, mas quando já se encontrava bem avançado na encosta, a pedra, impelida por uma força repentina, rolava de novo para a planície; Sísifo a empurrava de novo morro acima, coberto de suor, mas em vão [T. Bulfinch, 1965. **O Livro de Ouro da Mitologia: Histórias de Deuses e Heróis** (EDIOURO, 1965)] -, Cohen-Tannoudji deu a esse mecanismo de resfriamento o nome de **resfriamento (efeito) Sísifo** (*Sisyphus cooling*). Note que o artigo desses cinco cientistas foi publicado em 1987 (*Physical Review Letters* **59**, p. 1659). Observe que mecanismos de resfriamento semelhantes a esse, conhecidos como **resfriamento sub-Doppler** e **resfriamento por gradiente de polarização**, foram obtidos por Phillips e colaboradores, em 1988, e por Chu e colaboradores, em 1989, conforme veremos a seguir.

Apesar do sucesso do **resfriamento Sísifo**, ele apresentava um limite de aplicabilidade devido ao recuo dos fótons - absorção e emissão - espontâneos. Para contornar essa dificuldade, foram propostos dois tipos de resfriamento do tipo **resfriamento sub-recuo** (*subrecoil cooling*). O primeiro deles, conhecido como VSCPT (*Velocity Selective Coherent Population Trapping*), foi inicialmente proposto por Cohen-Tannoudji, Aspect, Arimondo, Kaiser e Vansteenkiste, em trabalhos publicados em 1988 (*Physical Review Letters* **61**, p. 826) e em 1989 (*Journal of the Optical Society of America* **B6**, p. 2112). O segundo deles, conhecido como **resfriamento Raman** (*Raman cooling*), foi inicialmente desenvolvido por Mark A. Kasevich e Chu, em 1992 (*Physical Review Letters* **69**, p. 1741). É oportuno registrar que o VSCPT teve como origem a descoberta do CPT (*Coherent Population Trapping*), em 1976, por G. Alzetta, A. Gozzini, L. Moi e G. Orriols (*Il Nuovo Cimento* **B36**, p. 5), e por Arimondo e Orriols (*Lettere Il Nuovo Cimento* **17**, p. 333). Segundo esse método CPT (também conhecido como **transparência induzida eletromagneticamente**), os átomos mais lentos são colocados em um **estado escuro**, que os torna *transparentes* ao laser utilizado, isto é, não absorvem fótons.

A técnica VSCPT foi estendida a duas dimensões por John Lawall, François Bardou, Bruno Saubamea, K. Shimizu, Michèle Leduc, Aspect e Cohen-Tannoudji, em 1994 (*Physical Review Letters* **73**, p. 1915), e a três dimensões por Lawall, Simone Kulin, Saubamea, Nick Bigelow, Leduc e Cohen-Tannoudji em 1995 (*Physical Review Letters* **75**, p. 4194). Assim, o aprimoramento da VSCPT permitiu que fossem atingidas temperaturas na escala de **nano Kelvin** ($1\text{nK} = 10^{-9}\text{ K}$). Por exemplo, em 1995 (*Physical Review Letters* **75**, p. 4575), Cohen-Tannoudji, J. Reichel, Bardou, M. Ben Dahan, E. Peik, S. Rand e Salomon conseguiram resfriar átomos de césio (Cs) na temperatura de 3 nK; em 1997 (*Physical Review Letters* **79**, p. 3146), Saubamea, T. W. Hijmans, Kulin, E. Rasel, Peik, Leduc e Cohen-Tannoudji conseguiram resfriar átomos de hélio (He) na temperatura de 5 nK. Outros resultados desse resfriamento obtidos pelo grupo de Cohen-Tannoudji, bem como algumas de suas aplicações, por exemplo, o relógio atômico de Cs, construído em 1992 (*Metrologia* **29**, p. 201), por Kurt Gibble e Chu, e o de 1994 (*Physica Scripta* **T51**, p. 78), construído por S. N. Lea, André Clairon, Salomon, P. Laurent, B. Lounis, Reichel, A. Nadir e G. Santarelli, podem ser vistos nos trabalhos relacionados na *Nobel Lecture* de Cohen-Tannoudji, intitulada **Manipulating Atoms with Photons** (*Nobel e-Museum*, 08 de Dezembro de 1997).

O interesse inicial de Chu pela Física deveu-se ao estímulo de Thomas Miner que foi seu professor dessa disciplina no *Garden City High*, em New York. Com a orientação de Miner, Chu construiu um pêndulo para realizar medidas de precisão da aceleração da gravidade. É oportuno registrar que o aprendizado de Chu na construção de novos pêndulos permitiu-lhe desenvolver a

técnica de esfriar átomos com laser e, conseqüentemente, levá-lo ao Nobelato, como veremos a seguir.

Chu realizou seu *College* na *Rochester University*. Muito embora houvesse se interessado pela Matemática, foi o estudo do livro **The Feynman Lectures in Physics** (Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1966) que o fez decidir-se pela Física Teórica quando escolheu a *Berkeley University* para iniciar, em 1970, sua pós-graduação. Depois de realizar seu *qualifying exam*, começou a trabalhar com Eugene D. Commins, em problemas teóricos de Astrofísica. Contudo, ao realizar um *play-experiment* e mostrar que a famosa Relação de Incerteza de Acústica ($\Delta v \Delta t \geq 1$) não funcionava, pois encontrara que $\Delta v \Delta t \approx 0.1$, Chu decidiu ser um físico experimental. Em 1974, os físicos franceses Claude C. Bouchiat (n.1932) e Marie-Anne Bouchiat (n.1934) começaram a analisar, sob o ponto de vista teórico, a quebra de paridade nos átomos. Essa quebra indicava a presença da partícula Z^0 nas transições atômicas, conforme previa a Teoria Eletrofraca de Salam (1968)-Weinberg (1967) (vide verbete nesta série). Dessa maneira, Chu escolheu como tema de seu Doutorado (defendido em 1976) a observação experimental da não-conservação da paridade em Física Atômica. Contando então com a orientação de Commins e com a colaboração de R. Conti, Chu realizou aquela observação e seu resultado foi apresentado por esses três cientistas, em 1977 (*Physics Letters* **A60**, p. 96).

No outono de 1978, Chu foi trabalhar no *Bell Laboratories* (BL), no qual, nos primeiros anos de sua permanência, estudou a microscopia de raios-X e realizou, com Hyatt M. Gibbs, S. L. McCall e A. Passner, uma experiência sobre a transferência de energia no rubi (óxido de alumínio: Al_2O_3), e que resultou no artigo que eles publicaram em 1980 (*Physical Review Letters* **45**, p. 1715). Na realização desses trabalhos no BL, Chu descobriu uma técnica de construção de lasers de picosegundo ($1ps = 10^{-12}$ s). Ainda por essa época, Chu interessou-se pela espectroscopia do positrônio. Este representa um átomo formado pelo elétron e o pósitron e foi observado pela primeira vez pelo físico norte-americano Martin Deutsch (1917-2002), em 1951, no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) (vide verbete nesta série). Como a vida média desses átomos é extremamente curta ($1,4 \times 10^{-7}$ s), havia dificuldade para produzir bastante deles para poder realizar a espectroscopia desejada. Assim, com auxílio de Allen P. Mills Junior, especialista em positrônio, Chu pôde aprimorar a técnica de pulsos de laser de ps que havia descoberto, e juntos realizaram a mais acurada medida de correções da Eletrodinâmica Quântica de um sistema atômico, qual seja, eles mediram o intervalo de energia 1S-2S do positrônio, conforme eles anunciaram em 1982 (*Physical Review Letters* **48**, p. 1333).

Em 1983, Chu foi designado Chefe do *Departamento de Pesquisa em Eletrônica Quântica* do BL, localizado em Holmdel, New Jersey, onde também trabalhava Ashkin, que tinha um sonho de aprisionar átomos com laser desde 1970, quando defletiu um feixe de átomos pela pressão de radiação ressonante (*Physical Review Letters* **24**, p. 156), e aprisionou pequenas esferas dielétricas (*Physical Review Letters* **25**, p. 1321). Portanto, para realizar esse sonho, Ashkin propôs, em 1978 (*Physical Review Letters* **40**, p. 729), uma nova técnica para aprisionar átomos, conhecida como **pinças ópticas** (*optical tweezers*). Ainda em 1978 (*Physical Review Letters* **41**, p. 1361), com a colaboração de Bjorkland, Richard R. Freeman e D. B. Pearson, Ashkin deu um primeiro passo para o aprisionamento (*trapping*) atômico óptico quando focou um feixe atômico com um feixe de laser. Observe-se que esse tipo de aprisionamento 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 também interessante observar que, ainda nesse mesmo ano de 1978, foram realizadas as primeiras experiências sobre o resfriamento (*cooling*) de íons por laser. Com efeito, Wineland, R. Drullinger e F. Walls (*Physical Review Letters* **40**, p. 1639) anunciaram que haviam resfriado uma nuvem de íons de magnésio (Mg), e W. Neuhauser, M. Hohenstatt, Peter Toschek e Dehmelt (*Physical Review Letters* **41**, p. 233) descreveram o resfriamento de íons de bário (Ba). Note-se que tais experiências são exemplos microscópicos dos efeitos macroscópicos mecânicos da luz observados pela primeira vez, em 1901, pelo físico russo Pyotr Nikolayevich Lebedev (1866-1912) (*Annalen der Physik, Leipzig* **6**, p. 433) e, independentemente, pelos físicos norte-americanos Ernest Fox Nichols (1869-1924) e Gordon Ferrie Hull (*Physical Review* **17**, p. 307).

Uma vez em Holmdel, Chu juntou-se a Ashkin e, com a colaboração de Bjorkholm, Hollberg e Cable, obtiveram, em 1985, o **melaço óptico** (MO) referido anteriormente. Esse MO, contudo, apresentava uma dificuldade, pois não conseguia aprisionar os átomos que por lá passavam, uma vez que eram contidos apenas por cerca de 0,5 s. Essa dificuldade decorria do famoso Teorema Óptico de Earnshaw [proposto pelo clérigo e físico-matemático inglês Samuel Earnshaw (1805-1888), em março de 1839, por ocasião de uma reunião da *Cambridge Philosophical Society*], discutido por James P. Gordon e Ashkin, em 1980 (*Physical Review* **A21**, p. 1606) e, em 1983 (*Optical Letters* **8**, p. 511), segundo o qual não poderia haver aprisionamento atômico usando espalhamento de luz. Essa dificuldade começou a ser contornada quando os físicos, os norte-americanos David E. Pritchard, Eric L. Raab, Carl E. Wieman (n.1951; PNF, 2001), Richard N. Watts (1957-1996) e o brasileiro Vanderlei Salvador Bagnato (n.1958), em 1986 (*Physical Review Letters* **57**, p. 310), sugeriram que o aprisionamento de átomos neutros poderia ser realizado usando uma combinação de campos externos magnéticos ou elétricos (vide verbete nesta série). Ao tomar conhecimento dessa proposta, Dalibard sugeriu um esquema específico de aprisionamento unidimensional usando um campo magnético. Por fim, em 1987 (*Physical Review Letters* **59**, p. 2361), Raab, Mara G. Prentiss, Cable, Chu e Pritchard apresentaram a técnica de aprisionamento de átomos, hoje conhecida como MOT (*Magnetic-Optic Trap*), que representa uma generalização da ideia de Dalibard. Registre-se que o aprisionamento magnético de átomos neutros foi também obtido, ainda em 1987 (*Physical Review Letters* **58**, p. 2194), por Bagnato, G. P. Lafyatis, A. Martin, Raab, R. Ahmad-Bitar e Pritchard.

Quando em 1987 Hänsch deixou a *Universidade de Stanford* para dirigir o Departamento de Óptica Quântica do *Instituto Max Planck*, na Alemanha, Chu foi convidado para substituí-lo. Em Stanford, entre 1988 e 1997, Chu realizou uma série de novos trabalhos, dentre os quais se destacam: em 1989, o resfriamento por **gradiente de polarização**, conforme registramos antes; o **chafariz atômico** [o primeiro foi realizado ainda em 1989 (*Physical Review Letters* **63**, p. 612), por Kasevich, Erling Riis, Chu e Ralph G. DeVoe]; a interferometria atômica e o resfriamento a laser com pulsos Raman [com os primeiros trabalhos publicados por Kasevich e Chu, em 1991 (*Physical Review Letters* **67**, p. 181) e em 1992 (*Applied Physics* **B54**, p. 321)]; e a Física de Polímeros, com ênfase na manipulação de moléculas de DNA, entre 1990 e 1997, em trabalhos realizados com os colaboradores Steve Kron, T. T. Perkins, D. E. Smith, S. R. Quake e R. G. Larson, conforme se pode ver nos artigos relacionados na *Nobel Lecture* de Chu, intitulada **The Manipulation of Neutral Particles** (*Nobel e-Museum*, 08 de Dezembro de 1997).

O interesse de Phillips por Ciência, principalmente por Química, foi motivado ao receber um microscópio de seus pais, ainda quando criança, por volta de 1956. No início da década de 1960, começou a perceber a beleza e a simplicidade da Física quando estudava no *Camp Hill High School*, próximo de Harrisburg, na Pennsylvania. No outono de 1966, Phillips entrou para o *Juniata College*, em Huntingdon, ainda na Pennsylvania. Foi nesse Colégio que se apaixonou pela Física ao ver o filme, levado por seu Professor de Física Ray Pfrogner, da aula pública **The Character of Physical Law**, ministrada pelo físico norte-americano Richard Phillips Feynman (1918-1988; PNF, 1965). Os primeiros trabalhos de Phillips em Física Experimental foram realizados em ESR (*Electron Spin Resonance*), sob a supervisão de Wilfred Norris, Chefe do Departamento de Física daquele Colégio.

Depois de graduado no *Juniata*, em 1970, e aceito na *Universidade de Princeton* (quebrando a máxima de que nenhum aluno do *Juniata* era aceito nessa Universidade!), Phillips decidiu fazer a sua pós-graduação em Física no MIT, trabalhando no grupo do físico norte-americano Daniel Kleppner (n.1932). Como projeto inicial de Tese de Doutorado, ele escolheu medir o momento magnético (μ) do próton em água (H_2O), usando o maser (vide verbete nesta série) de hidrogênio (H) de alto-campo daquele grupo, dispositivo esse manipulado por Frederick Walther. Ao realizar essa medida, Phillips teve a oportunidade de lidar com outros físicos, principalmente Barry Taylor e Edward Williams, do então NBS (*National Bureau of Standards*), em Gaithersburg, em Maryland. Incentivado por Kleppner, durante a realização dos experimentos de sua tese, Phillips também participou de experimentos sobre a colisão de átomos excitados por lasers, no grupo de Pritchard e J. Kinsey. Por fim, esses dois tipos de experiências fizeram parte de sua Tese de Doutorado, defendida no MIT, em 1976.

Depois de obter o Doutorado (*PhD: Philosophical Doctor*), Phillips permaneceu no MIT durante dois anos, trabalhando ainda com Pritchard e Kinsey, em colisões atômicas, e com Kleppner e Thomas J. Greytak, em BEC (*Bose-Einstein Condensation*). Contudo, em 1978, Phillips foi convidado para trabalhar no NBS [posteriormente transformado em NIST (*National Institute of Standards and Technology*) com Williams e T. Olsen sobre as medidas de precisão da razão giromagnética do próton (vide verbete nesta série)]. Nesse Instituto, sua experiência com lasers levou ao desenvolvimento da técnica de resfriamento a laser que lhe deu o Nobelato. Vejamos como.

Em 1978, quando ainda se encontrava no MIT realizando seu primeiro pós-doutorado, Phillips leu o artigo de Ashkin sobre as **pinças ópticas**, que havia acabara de ser publicado. Ainda em 1978, ele tomou conhecimento de outras experiências sobre resfriamento de íons, relatadas acima. Porém, observou Phillips, tais experiências somente aprisionavam íons, mas não átomos neutros. Ora, Phillips sabia que, em 1976 (*Optics Communications* **19**, p. 72), os físicos russos Letokhov, Vladimir G. Minogin e B. D. Pavlik sugeriram um método geral de mudar a frequência de um feixe de laser [conhecido posteriormente como FC (*frequency chirping*)] de modo a interagir com todas as partículas (átomos e moléculas) de um dado feixe e permanecer em ressonância somente com os que serão resfriados. Sabia também que, em 1979 [*Pis'ma Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **29**, p. 614; *Soviet Physics (JETP) Letters* **29**, p. 560], Letokhov, com a colaboração dos físicos russos Victor Balykin e V. Mushin e, Balykin, em 1980 (*Optics Communications* **33**, p. 31), haviam aplicado, sem sucesso, a FC. Por fim, Phillips sabia ainda que, em 1981 [*Pis'ma Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **34**, p. 463; *Soviet Physics (JETP) Letters* **34**, p. 442], S. V. Andreev, Balykin, Letokhov e Minogin resfriaram átomos neutros de Na, na temperatura de 1,5 K, usando um laser de frequência fixa dirigido em sentido contrário ao movimento desses átomos.

Quando chegou no NBS (Washington, DC), Phillips juntou-se a Metcalf e John V. Prodan e, usando a ideia da FC, desenvolveram a CCT (*chirp-cooling technique*) cujos primeiros resultados foram apresentados em 1983, no livro intitulado **Laser Spectroscopy VI** [H. Weber and W. Luthy (Editors), Springer-Verlag, Berlin]. Novos resultados dessa técnica foram descritos por Phillips e Prodan no livro **Laser-cooled and Trapped Atoms**, editado por Phillips, e publicado pelo NBS, ainda em 1983, e no livro **Coherence and Quantum Optics V** (Plenum Press, 1984), editado pelos físicos norte-americanos Leonard Mandel (1927-2001) e Emil Wolf (n.1922).

Além da técnica CCT, Phillips, Metcalf e Prodan desenvolveram uma outra técnica conhecida como **resfriamento Zeeman** (RZ) (*Zeeman cooling*). Com efeito, eles usaram um campo magnético para mudar os níveis de energia dos átomos, os **níveis Zeeman**, e mantiveram-no em ressonância com um laser de frequência fixada, segundo proposta apresentada por Phillips, em 1979, no *Office of Naval Research* do NBS. Com essa nova técnica, em 1982, Phillips e Metcalf (*Physical Review Letters* **48**, p. 596), e Prodan, Phillips e Metcalf (*Physical Review Letters* **49**, p. 1149), usaram um feixe de laser e esfriaram átomos de Na na temperatura de 70 mK ($1 \text{ mK} = 10^{-3} \text{ K}$). Novos resultados com essa técnica foram apresentados por Phillips, Prodan e Metcalf, em 1984 (*Progress in Quantum Electronics* **8**, p. 119), e em 1985 (*Journal of the Optical Society of America* **B2**, p. 1751), e por Metcalf e Phillips, ainda em 1985 (*Comments on Atomic and Molecular Physics* **16**, p. 79).

Apesar do sucesso da técnica RZ, ela não conseguia parar os átomos e, conseqüentemente, não revertia suas velocidades. As primeiras experiências de parar átomos magneticamente foram realizadas, também em 1985, por Prodan, Alan Migdall, Phillips, Ivan So, Metcalf e Dalibard (*Physical Review Letters* **54**, p. 992) e por Migdall, Prodan, Phillips, T. H. Bergeman e Metcalf (*Physical Review Letters* **54**, p. 2596), trabalhando com a técnica referida acima (RZ) e com o uso adicional de um pulso curto de luz para frear o átomo. A parada magnética de átomos também foi realizada por Wolfgang Ertmer, Rainer Blatt, John Hall e M. Zhu (*Physical Review Letters* **54**, p. 996), que pertenciam a um outro Departamento da NBS, em Boulder, no Colorado, porém usando a técnica CCT.

As referidas técnicas utilizadas de resfriamento atômico desenvolvidas com a participação de Chu – MO (1985) e MOT (1987) – não se comportavam exatamente como se esperava na determinação da temperatura dos átomos confinados, segundo observaram Phillips, Paul D. Lett e Phillip L. Gould, em 1987. Em vista disso, esses físicos, com novos colaboradores, passaram a desenvolver uma outra

técnica conhecida como **resfriamento sub-Doppler** (RSD), cujo pioneiro resultado foi apresentado por Lett, Watts, Christoph I. Westbrook, Phillips, Gould e Metcalf, em 1988 (*Physical Review Letters* **61**, p. 169). Para o desenvolvimento dessa nova técnica foi importante o método TOF (*time-of-flight*), sugerido por Metcalf, segundo o qual os átomos são inicialmente capturados em um MO e, então, são relaxados por um feixe de laser do tipo MO. Assim, eles conseguiram resfriar átomos de Na na temperatura de 40 μK , superando o limite teórico previsto pelo **resfriamento Doppler**, que era a temperatura de 240 μK . Assim, logo em 1989 (*Journal of the Optical Society of America* **B6**, p. 2084), um resultado desse novo método foi publicado por Lett, Phillips, Steve L. Rolston, Carol E. Tanner, Watts e Westbrook. Ainda em 1989, esse tipo de resfriamento foi confirmado por P. J. Ungar, David S. Weiss, Riis e Chu (*Journal of the Optical Society of America* **B6**, p. 2058), e por Weiss, Riis, Yaakov Shevy, Ungar e Chu (*Journal of the Optical Society of America* **B6**, p. 2072), e, ainda, por Dalibard e Cohen-Tannoudji (*Journal of the Optical Society of America* **B6**, p. 2023). Esse mecanismo de resfriamento, que recebeu de Cohen-Tannoudji o nome de **efeito Sísifo**, segundo registramos antes, teve uma descrição didática apresentada por esse físico francês em 1990 (*Physics Today* **43**, p. 33).

A partir de 1989, Phillips e seu grupo começaram a desenvolver uma espécie diferente de medida da temperatura de átomos resfriados por laser, conhecida como OL (*optical lattices*). Na técnica anterior (TOF), a distribuição de velocidades dos átomos era determinada depois de eles serem relaxados por um MO. Essa nova técnica, na qual a temperatura dos átomos era medida no local (*situ*), foi sugerida por Gould, e baseou-se em um trabalho publicado, em 1969 (*Physical Review* **188**, p. 1969), por B. R. Mollow ao estudar a luz fluorescente espalhada por um sistema de dois níveis, conhecido como TM (*triplete Mollow*). O primeiro resultado obtido por essa nova técnica foi anunciado, em 1990 (*Physical Review Letters* **65**, p. 33), em um trabalho publicado por Westbrook, Watts, Tanner, Rolston, Phillips, Lett e Gould. Até o recebimento do PNF/1987, o trabalho de Phillips, com antigos e novos colaboradores, centrou-se nessa nova técnica e aplicações, cujos resultados se encontram registrados em sua *Nobel Lecture* intitulada **Laser Cooling and Trapping of Neutral Atoms** (*Nobel e-Museum*, 08 de Dezembro de 1997). Dentre esses trabalhos, destacam-se os publicados em 1997: M. Gatzke, G. Birkl, Poul S. Jessen, A. Kastberg, Rolston e Phillips (*Physical Review* **A55**, p. R3987); G. Raithel, Birkl, Kastberg, Phillips e Rolston (*Physical Review Letters* **78**, p. 630); Raithel, Birkl, Phillips e Rolston (*Physical Review Letters* **78**, p. 2928); Phillips (*Materials Science and Engineering* **B48**, p. 13); e K. Helmerson, R. Kishore, Phillips e H. H. Weetall (*Clinical Chemistry* **43**, p. 379).

NOTA: A técnica de "pinças ópticas" é usada por alguns pesquisadores brasileiros, entre eles os grupos de Moysés Nussenzveig, da UFRJ, e Carlos Lenz, da Unicamp.



ANTERIOR

SEGUINTE