

## Prêmio Nobel de Física de 1997

Vanderlei Salvador Bagnato  
*Instituto de Física de São Carlos,  
Universidade de São Paulo, Caixa Postal 369,  
13560-250 - São Carlos/SP - Brasil*

Trabalho recebido em 10 de fevereiro de 1998

Todos os anos a Real Academia Sueca de Ciências se reúne, através do Comitê do Prêmio Nobel, para prestigiar as pessoas de maior destaque nos vários ramos do conhecimento humano. Cientistas de diversas áreas são indicados para receber a láurea máxima da ciência que é o Prêmio Nobel. Entre essas áreas, a Física normalmente recebe um destaque especial devido ao fato de ser considerada a “mãe da Ciência”. Este ano, o Comitê do Prêmio Nobel procurou valorizar o trabalho da subárea de Física Atômica. A Física Atômica estuda os aspectos mais intrínsecos e os segredos mais íntimos da matéria, pois tudo é constituído de átomos. Os trabalhos dos físicos que ganharam este ano o Prêmio Nobel procuram desenvolver técnicas que permitam não só estudar em detalhes, cada vez maior, o que acontece no interior do átomo mas também manipulá-lo com respeito aos seus graus de liberdade de movimento. O desenvolvimento de técnicas de manipulação atômica, permitem seu emprego em benefício da sociedade. Os físicos que ganharam o Prêmio Nobel deste ano, são: William Phillips, americano, da Escola Normal Superior, de Paris, National Institute for Standard and Technology (NIST) em Gaithersburg, EUA; o francês Claude Cohen-Tannoudji da Escola Normal Superior, de Paris e o americano Steven Chu da Universidade de Stanford. Estes físicos têm em comum o pioneirismo no desenvolvimento de técnicas experimentais ou no desenvolvimento do entendimento teórico de técnicas que permitem controlar o movimento de átomos por meio da incidência de raio laser. William Phillips foi o primeiro a demonstrar que o feixe de átomos podia ser freado, fazendo uso da força exercida pelo raio laser sobre os átomos. Steven Chu foi o primeiro a demon-

strar que com o raio de luz era possível criar um meio que removia energia dos átomos no chamado “melaço atômico”. Através disso, os átomos irradiados atingem temperaturas muito baixas, próximas do zero absoluto. Finalmente, Claude Cohen-Tannoudji foi o teórico que conseguiu explicar, através da teoria, tudo aquilo que estava sendo feito em laboratório, principalmente entender mecanismos novos no processo de resfriamento atômico.

A área de pesquisa prestigiada pelo Prêmio Nobel deste ano, é extremamente interessante e, de fato, abriu novas possibilidades para a ciência. O desenvolvimento das técnicas que permitem manipular a entidade atômica tem possibilitado enormes avanços técnico-científicos. Para citar alguns, podemos falar da espectroscopia atômica que é o estudo e a investigação do átomo, através da luz. Quando os átomos estão parados, ou aprisionados, a precisão com que podemos entender os fenômenos que ocorrem na sua estrutura interna é muito maior do que nas situações convencionais, onde esse confinamento não é possível. As técnicas para confinar e aprisionar estes átomos, utilizando luz laser, possibilitou também a criação de matéria num estado muito próximo do zero absoluto. Em baixas temperaturas, átomos se comportam de maneira diferente, não mais em movimentos desordenados mas, obedecendo um comportamento coletivo que é denominado condensação de Bose-Einstein [1] que foi prevista no início deste século pelo famoso físico Albert Einstein. A recente realização deste experimento só pode ser feita devido às técnicas de resfriamento e confinamento atômico que tem como pioneiros os ganhadores do Prêmio Nobel de Física deste ano.

Uma das importantes técnicas desenvolvidas pelos ganhadores do Prêmio Nobel, expressamente mencionada pelo Comitê do Prêmio Nobel, abre perspectivas de emprego em todo mundo para a construção de melhores e mais precisos relógios atômicos. O relógio atômico é um dispositivo que mede o tempo utilizando o átomo. Com o aprisionamento e resfriamento realizados pelas técnicas modernas, é possível criar amostras que são consideradas idéias para o desenvolvimento desses dispositivos atômicos para medida de tempo e frequência. Uma vez conseguidas essas altíssimas precisões, que chega a 1 segundo em 1 milhão de anos, é possível o desenvolvimento de um relógio atômico com essa precisão, o que deverá melhorar em muito o sistema de posicionamento de navios e objetos, o sistema de navegação aérea e outros sistemas, incluindo telecomunicação via satélite, etc....

### A técnica de resfriamento e aprisionamento atômico

Para a compreensão das razões que levaram o Comitê a prestigiar a área de resfriamento e aprisionamento atômico, temos que entender um pouco dos princípios desta técnica.

Consideremos um feixe de luz incidindo sobre um átomo. A luz é na verdade composta de uma infinidade de corpúsculos energéticos (fótons) que quando colidem com o átomo são capazes de transferir momentum a ele, resultando em uma força na direção de propagação da luz. É através do uso desta força, gerada pela transferência de fótons ao átomo que torna-se possível o uso da luz como “pinça” de átomos. Se este feixe de luz estiver propagando contrário ao movimento atômico, a troca sucessiva de fótons promove a desaceleração dos átomos e eventualmente sua parada completa no espaço. Neste ponto a entidade atômica poderá ser investigada com respeito aos seus detalhes mais intrínsecos, revelando coisas não estudadas por normalmente serem camufladas por outros efeitos que ocorrem quando o átomo está em situações normais, não parado. A possibilidade de criar estas amostras atômicas em baixas velocidades (baixas temperaturas) é que possibilitarão investigar matéria no regime ultra frio observando efeitos nunca antes sonhados de serem observados.

Consideremos agora dois feixes de Luz (Figura 1) contrapropagantes interagindo com um átomo. Se estes feixes estão corretamente sintonizados com relação à chamada frequência natural de absorção do átomo, à medida que este caminha para nestes feixes, haverá uma força sempre contrária ao seu movimento. Esta força tem origem através de uma compensação entre o efeito Doppler de seu movimento e a sintonização do feixe de luz com relação à sua frequência de absorção.

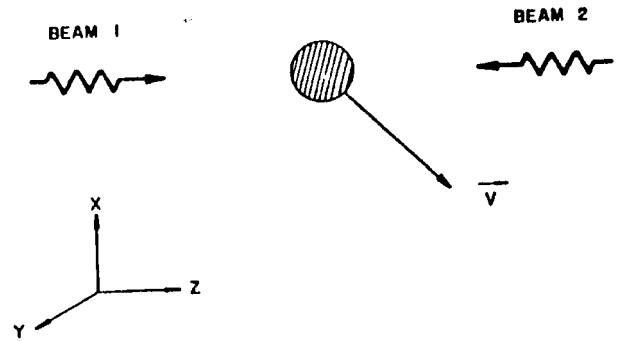


Figura 1 - Dois feixes contrapropagantes interagindo com átomo produzindo uma força viscosa que remove energia.

A força criada por dois feixes de luz, como descrito acima pode ser facilmente calculada mostrando ser equivalente a uma força viscosa do tipo  $-\alpha v_x$ . Esta força de radiação serve somente para resfriar os átomos removendo sua energia através desta viscosidade. Numa situação onde seis destes feixes de luz formam três pares contrapropagantes e mutuamente ortogonais entre si, temos um meio viscoso tridimensional para o átomo, que é denominado de melação óptica. Se quisermos uma força que confine o átomo num determinado ponto do espaço precisamos criar uma força restauradora da posição. Isto é feito utilizando-se um campo magnético que varia linearmente no espaço. Devido ao desdobramento da estrutura interna do átomo um campo magnético inhomogêneo, cria-se uma regra de seleção para transições radiativas dependentes da posição em que o átomo se encontre.

Consideremos um átomo cujo estado fundamental apresenta spin  $S = 0$  e cujo estado excitado apresenta spin  $S = 1$ . Coloquemos este átomo na presença de um campo inhomogêneo como mostra a Figura 2. Os feixes de luz contra-propagantes discutidos anteriormente terão agora polarizações circulares e opostas, mas ainda serão sintonizados para o vermelho, preservando a presença da força viscosa discutida anterior-

mente. Na presença de um campo do tipo  $B(z) = -B_0 z$  os níveis de energia do átomo abre-se mostrando três níveis para o estado  $S = 1 (m_s = 1, 0, -1)$  e deixando inalterado o estado  $S = 0$ .

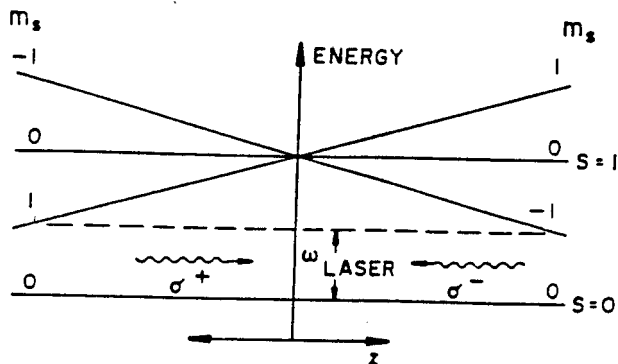


Figura 2 - Sistemas de níveis e transições para aprisionamento atômico.

A força que surge sobre o átomo, nesta situação é dependente da posição e o mecanismo para que isto ocorra é o seguinte: quando o átomo desloca-se à direita, a transição eletrônica ( $S = 0, m_s = 0$ )  $\rightarrow$  ( $S = 1, m_s = 1$ ) é aquela que fica mais próxima da ressonância com o laser aplicado da direita para a esquerda. Como este feixe de luz tem polarização circular levogira, pelas regras de seleção para transições atômicas este é o feixe que interagirá mais forte com o átomo, exercendo uma força que procura restaurar a posição de equilíbrio,  $z = 0$ . Quando o átomo desloca-se para a esquerda o mesmo tipo de mecanismo, só que agora favorecendo a transição ( $S = 0, m_s = 0$ )  $\rightarrow$  ( $S = 1, m_s = 1$ ) é que atua, resultando numa força da esquerda para a direita, procurando novamente restaurar a posição do átomo ao redor do ponto de equilíbrio  $z = 0$ .

O resultado global da força dissipativa mais a força restauradora é que o átomo fica sujeito a uma força total do tipo oscilador harmônico amortecido.

$$m \frac{dv_z}{dt} = -K_z z - \alpha v_z \quad (1)$$

Se ao invés de uma dimensão os feixes de luz e o campo magnético atuam nas três direções ( $x, y, z$ ), a força da equação (1) pode ser generalizada produzindo um átomo visco- confinado no espaço.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -K \vec{r} - \alpha \vec{v} \quad (2)$$

Na presença de um vapor atômico este sistema captura e aprisiona átomos e por isto é chamado

de *armadilha magneto-óptica* (MOT). A existência de emissão espontânea faz com que a força da equação (2) tenha a adição de um termo  $F_{esp}$ , que é aleatória no espaço e portanto  $\langle F_{esp} \rangle = 0$ . A existência desta componente aleatória da força faz com que a mínima velocidade atingida pelo átomo, neste sistema, não seja zero, mas um valor mínimo atingido quando a componente aleatória equilibra as demais forças do sistema. Este limite é chamado de limite Doppler e para átomos de sódio ele corresponde a uma temperatura de  $240 \mu K$ , sendo mais baixa para outros alcalinos.

A armadilha MOT é um meio simples e rápido de obter amostras gasosas relativamente densas ( $10^{10}$  a  $10^{11}$  átomo/cm<sup>3</sup>) com temperaturas equivalentes da ordem de  $100 \mu K$ . Foi a flexibilidade e simplicidade das armadilhas MOT que tornou a área de átomos frios atraente e merecedora da premiação que recebeu.

## O Mito de Sísifo [2]

Em 1988, William Phillips e equipe resfriaram átomos de sódio a  $40 mK$  em uma armadilha superando o limite teórico anterior ( $240 \mu K$ ) estabelecido pelo limite Doppler. O resultado foi confirmado e explicado pelos grupos de Cohen-Tannoudji e de Chu (agora em Stanford). Segundo Cohen-Tannoudji, o processo de Phillips podia ser comparado ao mito de Sísifo, personagem da mitologia grega, condenado a empurrar morro acima uma pedra pesada, que rolava para baixo assim que atingia o topo e tinha que ser empurrada de novo. Os átomos perdiam energia como se estivessem subindo um "morro" e em seguida o laser os transferia para um 'vale', para recomeçarem a subida - por isso, o novo processo ganhou o nome de 'resfriamento de Sísifo'. As explicações técnicas para o resfriamento sob Doppler foram fundamentais para o entendimento de outros efeitos.

Outro limite parecia existir para o resfriamento: o de recuo, ou seja, o ganho de velocidade do átomo quando emite um fóton. Tal limite corresponde à temperatura de  $2,4 \mu K$  para átomos de sódio e de  $0,2 \mu K$  para os de césio, mais pesados. Mas entre 1988 e 1995 Cohen-Tannoudji e equipe superaram também esse limite. Eles impediram os átomos mais lentos de absorver fótons, evitando a emissão posterior, causa do recuo. Para isso, usaram mecanismo descoberto em 1970 na

Universidade de Pisa (Itália): o de por os átomos mais lentos em um ‘estado escuro’, que os torna ‘transparentes’ ao *laser* (não absorvem fótons). Os experimentos, com átomos de hélio (limite de recuo de  $4\mu\text{K}$ ) confinados por seis feixes de *laser*, atingiram em 1995 a temperatura de  $0,18\mu\text{K}$ , o que corresponde a uma velocidade de apenas 2 cm/s. O mesmo grupo acaba de atingir (resultado publicado em outubro) a temperatura de  $0,005\mu\text{K}$ , também usando átomos de hélio.

### Aplicação de átomos frios

Átomos resfriados por laser e confinados em armadilhas tem contribuído muito para o avanço do conhecimento científico em áreas como espectroscopia atômica, colisões atômicas, óptica quântica e outros. Mesmo em física nuclear e das partículas elementares, átomos frios tem sido empregados com sistemas interessantes para o estudo da força eletro-física. Mas não é somente em física básica que átomos frios têm

encontrado aplicações. Em metrologia de tempo e frequência, os átomos aprisionados são agora considerados sistemas ideais para construção de relógios atômicos de altíssimas precisões. Com tais relógios espera-se melhorar o sistema de telecomunicações e modernizar o sistema de posicionamento global. Na área de nanotecnologia, átomos frios têm encontrado aplicações interessantes. Com as técnicas envolvendo forças de radiação, é possível criarmos estruturas espaciais em feixes atômicos, as quais são posteriormente transferidas para uma superfície via deposição direta. A cada dia novas aplicações são encontradas para átomos frios.

### Interação com o Brasil

Dos três físicos que ganharam o Prêmio Nobel 1997, dois deles já tiveram ou ainda tem colaboração com grupos de pesquisa brasileira. Phillips já esteve no Brasil onde colaborou no Instituto de Física de São Carlos - USP com o Grupo de Óptica.

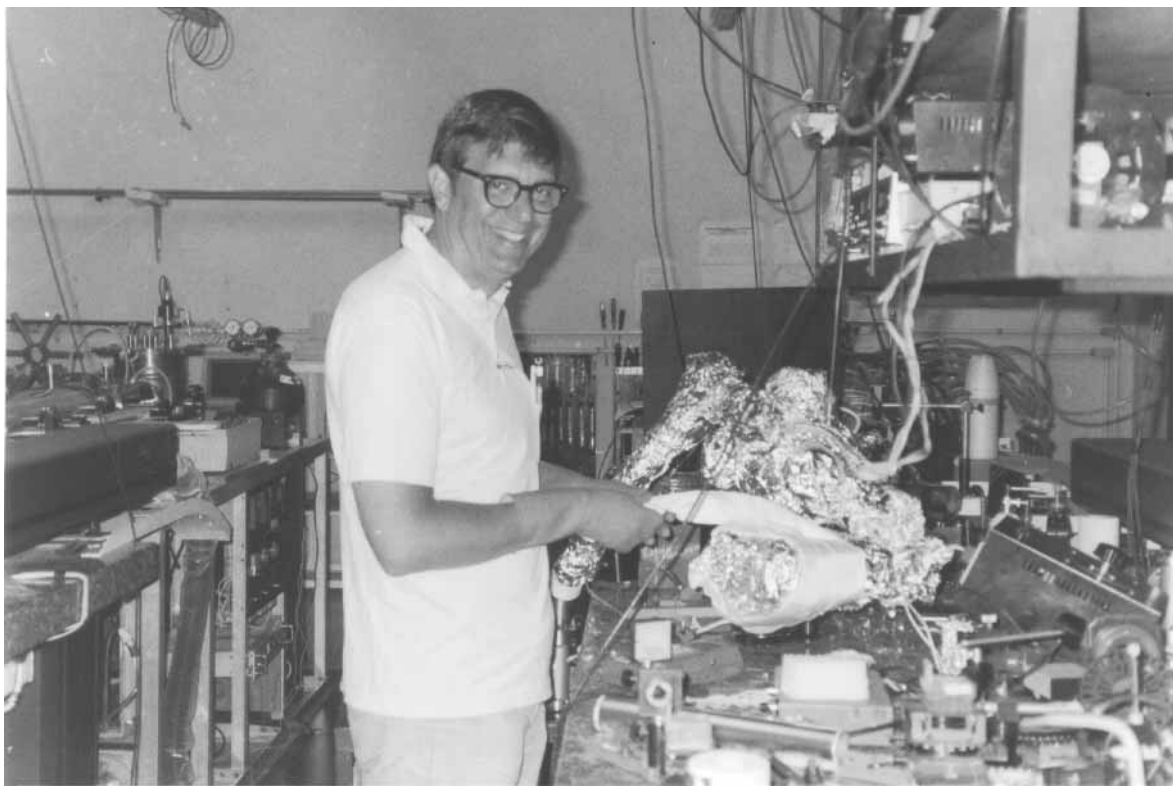


Figura 3 - Phillips trabalhando em um dos experimentos de São Carlos.

Durante sua estadia em São Carlos foi realizada pela primeira vez o aprisionamento de átomos de Na diretamente da fase de vapor térmico. Este feito promoveu avanços significativos, principalmente no estudo de processos colisionais envolvendo átomos de sódio. A colaboração com o grupo do Prof. Phillips continua até hoje, havendo periodicamente troca de pesquisadores, tendo ocorrido inúmeras publicações conjuntas entre os dois grupos. Na figura 3 vemos Phillips trabalhando num dos experimentos de São Carlos em 1992.

Também tem forte colaboração com o Brasil o Prof. Cohen-Tannoudji. Desde sua primeira participação no Simpósio Franco-Brasileiro em 1982, no Rio de Janeiro, tornou-se amigo a nível pessoal e

científico de vários grupos de pesquisa como é o caso dos Grupos de Óptica de São Carlos, Recife e Rio de Janeiro. Juntamente com o físico brasileiro Moysés Nussenzveig, Cohen-Tannoudji elaborou o convênio Franco-Brasileiro (CNPq-CNAS) na área de Óptica/Espectroscopia que foi de fundamental importância para o crescimento da área no Brasil.

### Referências

- [1] V.S. Bagnato, “A Condensação de Bose-Einstein”, *Rev. Bras. Ens. Fís.*, **19**, 11 (1997).
- [2] Veja também Texto de L. Dovidovich (*Ciência Hoje*, vol. 23, 1997).