

ARREFECIMENTO E APRISIONAMENTO DE ÁTOMOS COM LASERS

A. S. RODRIGUES

Centro de Física do Porto, Departamento de Física
Faculdade de Ciências do Porto
Rua do Campo Alegre, 687, 4150 Porto

O estudo das propriedades intrínsecas de átomos isolados foi sempre um campo fértil de investigação científica. Em particular levou à formulação da Mecânica Quântica no início deste século, e à Electrodinâmica Quântica em meados do mesmo. Esses avanços dependeram de medidas precisas das propriedades dos átomos. Para que se possa aprofundar o conhecimento ao nível atómico da estrutura da matéria, é necessário aumentar a precisão de tais medidas. Infelizmente isso não é fácil: em sólidos e líquidos os átomos não podem ser isolados da interação com os átomos vizinhos, e em gases o movimento térmico aleatório torna difíceis as medidas precisas. Em última análise não basta diminuir os efeitos do movimento térmico, é necessário reduzir este.

Os laureados com o Prémio Nobel de 1997 estiveram ao longo de vários anos na vanguarda dos esforços para conseguir esse fim. Átomos podem agora ser arrefecidos fazendo incidir luz laser directamente sobre eles. A pressão de radiação exercida pela luz laser pode ser explorada para desacelerar os átomos, que, uma vez arrefecidos, podem ser aprisionados, ou confinados a uma pequena região do espaço.

Num gás à temperatura ambiente, os átomos deslocam-se a uma velocidade média da ordem de 500ms^{-1} , e uma velocidade quadrática média (v_{rms}) da ordem de 450ms^{-1} . O mecanismo mais básico de arrefecimento laser foi primeiro proposto por Theodor Hänsch e Arthur Schawlow, para átomos neutros, e por David Wineland e Hans Dehmelt, para iões, em 1975. Se um feixe laser incidir sobre as moléculas exerce uma pressão de radiação, correspondente à transmis-

são ao átomo do quantum de momento linear do fóton absorvido (ver caixa na página seguinte). Eventualmente o átomo emite outro fóton por emissão espontânea, que transporta uma quantidade de movimento com a mesma grandeza. No entanto a direcção de emissão deste fóton é aleatória, pelo que em média o átomo sofre uma força na direcção do feixe de luz. Essa força é igual ao momento linear de um fóton multiplicado pela taxa de absorção. Será portanto tanto maior quanto mais perto estiver a frequência do laser de uma frequência de excitação do átomo.

Se tivermos dois feixes laser iguais a viajar em direcções opostas, e com uma frequência um pouco abaixo de uma frequência de excitação do átomo, e se este tiver uma velocidade ao longo da direcção dos feixes, o átomo 'verá' o feixe contra o qual viaja a uma frequência mais alta (e portanto mais perto da ressonância) e o feixe em cuja direcção viaja a uma frequência mais baixa (mais longe da ressonância), devido ao efeito Doppler.



Cohen-Tannoudji, da École Normale Supérieure de Paris, deu uma contribuição decisiva para a teoria do arrefecimento de átomos com a radiação.



Steven Chu (esquerda), então nos Laboratórios Bell, e William Phillips, no National Institute of Standards and Technology, realizaram em 1985 os trabalhos pioneiros de demonstração experimental da técnica de arrefecimento e confinamento de átomos com feixes laser.

Como a probabilidade de absorver um fóton é maior em ressonância, o átomo absorve mais fótons que o retardam do que fótons que o aceleram, com um efeito médio de desaceleração. Os átomos vêem assim reduzida a sua velocidade média na direcção dos feixes reduzida, bem como v_{rms} . Isto corresponde a uma diminuição da temperatura, e é apelidado de arrefecimento Doppler. Existe um limite inferior para a temperatura assim alcançada, dado pelo equilíbrio entre a força de 'atrito' devida à troca de fótons e uma força de Langevin devida à aleatoriedade da reemissão dos fótons pelo átomo. Para átomos de sódio esse limite é de $240\mu K$.

Uma vez arrefecidos os átomos, podem ser confinados no espaço fazendo incidir sobre eles três pares de feixes orientados em direcções mutuamente perpendiculares. O 'atrito' assim criado é semelhante ao movimento browniano de uma partícula num fluido viscoso. O grupo de Steven Chu dos Laboratórios Bell foi o primeiro a demonstrar um tal sistema em 1985 [1], que apelidaram de 'melaço' óptico.

Se tivermos um feixe de átomos com velocidade v numa dada direcção e sentido, e sobre eles actuar um feixe de fótons, em sentido oposto, com frequência ν perto de uma ressonância dos átomos do feixe, por cada fóton absorvido um átomo perde uma certa fracção da sua velocidade inicial. Isto resulta da conservação da quantidade de movimento:

$$\Delta v = v - v' = h\nu/mc = h/m\lambda$$

dado que a quantidade de movimento transportada por um fóton é $h\nu/c$, onde $k = 2\pi/\lambda$.

Assim, se por exemplo tivermos átomos de céσιο (Cs), há dois níveis ressonantes com radiação de comprimento de onda $\lambda = 0,82\mu m$. Sendo a massa do céσιο, $m_{Cs} = 22 \times 10^{-23}g$, verifica-se da equação anterior que cada fóton absorvido leva a uma redução da velocidade de $3,6mms^{-1}$.

Medidas realizadas subsequentemente por esse grupo e pelo de William Phillips [2] no National Institute of Standards and Technology (NIST) revelaram que as temperaturas obtidas eram inferiores ao limite previsto pela teoria. A dependência na intensidade dos feixes laser e na sua dessintonia também não estavam de acordo com o previsto. A explicação veio em 1988 pelo grupo de Cohen-Tannoudji na École Normale Supérieure [3] e pelo de Chu [4] (então já em Stanford). Na realidade os átomos não têm apenas dois níveis mas um conjunto de subníveis Zeeman. Por bombagem óptica é possível alterar a população relativa desses subníveis, levando a uma distribuição de populações que depende da polarização do laser. Além disso a interacção com a luz leva a variações na energia dos subníveis. Em parti-

cular se tivermos os dois feixes laser que se propagam em sentidos opostos com polarizações perpendiculares, a polarização resultante varia ao longo do espaço, passando de linear a circular direita, a linear, a circular esquerda, e assim sucessivamente, com intervalos de $\lambda/8$. Isso quer dizer que um átomo que se desloque ao longo do eixo vê a energia dos seus subníveis variar sinusoidalmente. Ao mesmo tempo a população de equilíbrio varia também no espaço. Sob certas condições os átomos mudam de nível quando estão no máximo de energia de um nível, para o mínimo de energia de outro nível, perdendo assim energia cinética continuamente.

Estes resultados abrem as portas a aplicações que vão de melhores relógios atómicos (até 1000 vezes mais precisos), manipulação de objectos macroscópicos com luz (microlentes, cristais líquidos, pinças ópticas), litografia (escrever em circuitos impressos linhas de largura atómica), até ao estudo de estados quânticos macroscópicos como condensados de Bose-Einstein, laser atómico (já realizados), e a redes cristalinas ópticas (i.é, fótons regularmente colocados num potencial criado pelos feixes laser), manipulação e armazenagem de átomos de antimatéria. As temperaturas alcançadas com estas técnicas continuam a baixar, atingindo já a ordem dos nanokelvin e até (a uma dimensão) dos picokelvin.

Referências

- [1] CHU, S.; HOLLBERG, L. W.; BJORKHOLM, J. E., "A. Cable and A. Ashkin", *Phys. Rev. Lett.* **55**, 48 (1985).
- [2] GOULD, P.; LETT, P. and PHILLIPS, W., in *Laser Spectroscopy VIII*, Springer Verlag, Berlin, p. 58 (1987).
- [3] DALIBARD, J.; SALOMON, C.; ASPECT, A.; ARIMONDO, E.; KAISER, R.; VANSTEENKISTE, N. and TANNODJI, C. Cohen, in *Atomic Physics 11*, World Scientific, Singapore, p. 199 (1989).
- [4] PHILLIPS, W.; WESTBROOK, C. I.; LETT, P.; WATTS, R. N.; GOULD, P. and METCALF, H. J., in *Atomic Physics 11*, World Scientific, Singapore p. 633 (1989).

Sugestões de leitura

- New mechanisms for laser cooling*, C. N. Cohen-Tannoudji e W. D. Phillips, "Physics Today" **43**, 10, p. 33 (1990).
- Laser trapping of neutral particles*, S. Chu, "Scientific American" **266** 2, p. 49 (1992).
- Laser-cooled atoms clinch Nobel prize*, Richard Thomson, "Physics World" **10**, 11, p. 51 (1997).
- A condensação de Bose-Einstein e a sua recente observação experimental*, E. S. Lage, "Gazeta de Física" **18** 3, p. 28 (1995).
- A Física das baixas temperaturas*, J. Bessa Sousa, "Colóquio Ciências" da Fundação Calouste Gulbenkian **10**, p. 3 (1992).

Augusto S. Rodrigues é doutorado pela Universidade de Arizona, EUA, em Óptica não Linear, sendo actualmente professor Auxiliar do Departamento de Física da Faculdade de Ciências do Porto.