

A condensação de Bose-Einstein é um fenómeno surpreendente e as propriedades do estado da matéria que dela resulta - o condensado de Bose-Einstein (BEC) - são ainda mais “estranhas”, quando as comparamos com as propriedades dos sistemas macroscópicos com que lidamos na nossa experiência quotidiana. Apesar de ter sido previsto por Einstein em 1925, só em 1995 foi possível observar o BEC, tendo para isso sido necessário produzir em laboratório um sistema à temperatura mais baixa do Universo. A descoberta experimental deste novo estado da matéria foi galardoada com o Prémio Nobel da Física de 2001.

Neste artigo, serão descritas as dificuldades associadas à descoberta do BEC e as singulares propriedades deste estado, assim como a sua relação com os fenómenos da supercondução e da superfluidez.

MARGARIDA M. TELO DA GAMA

Departamento de Física e Centro de Física Teórica e Computacional

da Universidade de Lisboa,

Av. Prof. Gama Pinto, 2, 1649-003, Lisboa

margarida@cii.fc.ul.pt

ESTADOS ESTRANHOS DA MATÉRIA: SUPERCONDUTORES E SUPERFLUIDEZ

BEC: um estado quântico à escala macroscópica

A Mecânica Quântica descreve a matéria e a luz em todos os seus detalhes, e, em particular, o seu comportamento à escala atómica. Nesta escala, o comportamento da matéria e da luz é bizarro, e afasta-se das imagens clássicas de “partículas” e “ondas”: a luz comporta-se por vezes “como a matéria”, e a matéria comporta-se também “como luz”. Contudo, estas novas ideias trazem consigo uma surpreendente simplificação. A matéria e a luz comportam-se exactamente da mesma forma, umas vezes como partículas e outras como ondas. Apesar de “estranho”, este comportamento pode ser previsto quantitativamente, e medido com grande precisão.

Richard Feynman defendia que todo o mistério da Mecânica Quântica é revelado na experiência da fenda dupla, que põe em evidência padrões de interferência para fótons e electrões. Versões virtuais desta experiência, inspiradas numa descrição do próprio Feynman, podem ser realizadas em www.colorado.edu/physics/2000/index.pl.

ANINHOS DA RCONDU- FLUIDOS

O princípio da sobreposição descreve a interferência de ondas e o padrão observado na experiência da fenda dupla (experiência de Young). Duas fendas são iluminadas pela mesma fonte e a luz é projectada num alvo colocado mais à frente. Se a distância entre as fendas for adequada (da ordem do comprimento de onda da luz) observa-se um padrão de interferência no alvo. Quando a crista de uma onda se sobrepõe à cava da outra, os seus efeitos anulam-se (interferência destrutiva); por outro lado se as duas ondas forem sobrepostas em crista (ou em cava) o efeito ondulatório é reforçado (interferência construtiva); a sucessão periódica destes dois tipos de interferência, em função da distância percorrida pelas ondas, dá origem ao padrão de interferência observado no alvo, formado por riscas alternadamente claras (onde a intensidade da luz é máxima) e escuras (onde a intensidade é mínima).

Nada deste tipo acontece se a barreira que antecede o alvo for bombardeada por partículas clássicas, isto é, “bolinhas”: classicamente o padrão formado por partículas que passam

através de uma fenda dupla é a soma dos padrões correspondentes a cada uma das fendas isoladas, e não há interferência. Por isso, a observação da interferência de electrões feita por C. J. Davisson e L. H. Germer no final dos anos 20, foi, do ponto de vista clássico, muito surpreendente, e demonstrou experimentalmente que os electrões não são “bolinhas”. Na experiência, os electrões (tal como as ondas de luz) sobrepõem-se e dão origem a um padrão de interferência muito semelhante ao observado na experiência de Young. A existência destas “ondas de matéria” tinha sido proposta por L. de Broglie em 1923 (Prémio Nobel da Física em 1929).

Ao contrário do que acontece com uma bolinha, que pode ter uma energia qualquer, os estados quânticos são discretos. A energia das partículas quânticas não pode tomar valores arbitrários. A natureza discreta do espectro (conjunto de estados) de energia de uma partícula tem, como veremos, efeitos dramáticos a baixas temperaturas.

A temperatura absoluta é uma medida da agitação térmica dos átomos ou moléculas, ou da sua energia cinética média, e a probabilidade de ocupação de um estado quântico depende da temperatura. No zero absoluto ($T=0$ K) o movimento térmico cessa, e os átomos estão no estado fundamental, o estado de energia mais baixa.

A temperaturas finitas, os átomos estão distribuídos por todos os estados acessíveis, com uma probabilidade que decresce exponencialmente com a energia do estado, medida em termos da energia térmica, kT , onde k é a constante de Boltzmann e T a temperatura absoluta.

À temperatura ambiente, as leis quânticas coincidem com as leis clássicas e podemos imaginar os átomos de um gás como bolas de bilhar que chocam entre si e com as paredes do recipiente que os contém, isto é, tudo se passa como se os átomos fossem, de facto, “bolinhas” (Fig. 1). A estas temperaturas, a energia média dos átomos é elevada, e o seu comprimento de onda é tão pequeno (muito menor do que a distância média entre dois átomos) que fenómenos de interferência quântica não ocorrem na prática. Neste regime, a energia térmica é muito maior do que a diferença de energia entre dois estados consecutivos e as partículas estão distribuídas por muitos estados quânticos, com uma probabilidade dada pela famosa distribuição de Maxwell, de acordo com a teoria clássica.

Quando a temperatura baixa, a energia média dos átomos diminui e o comprimento de onda térmico (o comprimento de onda de uma partícula com energia igual à energia térmica) aumenta. A temperaturas suficientemente baixas este comprimento é da ordem da distância inter-atómica, os fenómenos de interferência quântica tornam-se relevantes e as propriedades do sistema mudam

radicalmente (Fig. 1). Neste regime, as leis clássicas falham e um sistema de partículas exibe uma transição de fase para um novo estado condensado.

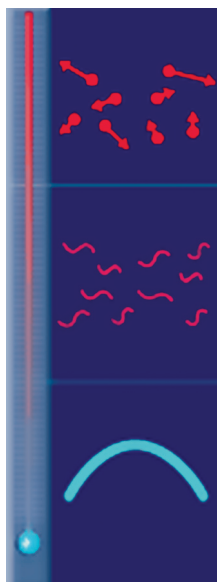


Fig. 1 À medida que a temperatura baixa o comprimento de onda de De Broglie aumenta e os fenómenos de interferência quântica tornam-se cada vez mais importantes. Abaixo de uma determinada temperatura crítica, as ondas individuais ligam-se formando uma única onda de matéria.

No estado condensado, as ondas dos átomos individuais ligam-se formando uma única onda de matéria: esta é a “assinatura” do novo estado da matéria (Fig. 1) previsto, em meados dos anos 20, por Einstein e conhecido por condensado de Bose-Einstein.

De facto, em 1924 um jovem desconhecido físico indiano, S. Bose, escreveu e enviou a Einstein um artigo onde apresentava uma derivação inovadora da distribuição de equilíbrio de fótons. Bose supôs que o número de fótons num determinado estado quântico (definido pela energia ou frequência das partículas) pode variar entre zero e infinito e, usando resultados conhecidos da Física Estatística, reproduziu a famosa lei da radiação do corpo negro, derivada originalmente por M. Planck (Prémio Nobel da Física em 1918).

Einstein entusiasmou-se com a ideia de Bose e publicou quase imediatamente dois artigos onde desenvolvia a teoria quântica para partículas que, como os fótons, podem ocupar o mesmo estado quântico. A contribuição decisiva de Einstein consistiu em notar que se o número de partículas for conservado, como acontece com átomos, o sistema de partículas independentes exibe uma transição de fase a baixas temperaturas. Este aspecto escapou totalmente a Bose porque este considerou apenas o caso dos fótons que, como

não são conservados (podem desaparecer quando a energia do sistema é reduzida), não condensam.

A condensação de partículas independentes é, por si só, um fenómeno surpreendente, mas a surpresa teria sido muito maior se Einstein tivesse suspeitado das propriedades do novo estado da matéria - o condensado de Bose-Einstein ou BEC. Contudo, passaram muitos anos sem que se chegasse a conhecer qualquer sistema com estas características, e o próprio Einstein parecia não acreditar que o BEC pudesse ser observado. Talvez por esta razão não tenha voltado a trabalhar neste problema.

As propriedades do BEC são estranhas e totalmente contra-intuitivas. Uma das mais surpreendentes é a superfluidez, ou escoamento sem atrito. O condensado tem uma rigidez colectiva que o “protege” dos processos de interacção partícula a partícula responsáveis pela viscosidade fluida ou resistência ao fluxo, daí resultando a superfluidez do BEC.

Observação do BEC: um estado proibido

Um cálculo exacto mostra que a transição de Bose-Einstein ocorre quando o número de átomos num cubo de lado igual ao comprimento de onda térmico excede ligeiramente 2,6. Isto significa que, quanto mais denso for o gás, mais alta será a temperatura crítica.

Contudo o BEC é um estado metastável, ou seja, que compete com outras fases, e a sua observação requer que o gás seja ultra-diluído, o que por sua vez implica temperaturas de transição ultra-baixas. A diluição é necessária para evitar que o sistema condense no estado líquido normal ou congele, antes de ocorrer a condensação de Bose-Einstein. É preciso manter o gás ultra-rarefeito, com densidades da ordem de 10^{12} átomos por cm^3 (10 ordens de grandeza inferiores à da densidade do líquido ou do sólido), o que implica um arrefecimento até 0,000 000 1 K, ou seja, até um décimo de milionésimo de grau acima do zero absoluto. A esta temperatura os átomos movem-se muito devagar, com velocidades da ordem dos milímetros por segundo.

Outra condição para observar o condensado é ter os átomos confinados no espaço durante e depois do arrefecimento. Como o BEC é metastável, o confinamento não pode envolver qualquer tipo de contacto, para evitar a nucleação do líquido ou do sólido. Isto elimina todos os métodos convencionais de baixas temperaturas (criogenia), e deixa como única opção a utilização de campos eléctricos e magnéticos, tanto para arrefecer como para aprisionar os átomos.

A primeira fase do arrefecimento utiliza lasers. A alta intensidade e direcionalidade de um feixe de laser disponibilizam uma densidade de energia e de momento que

permite a sua utilização para alterar o movimento dos átomos. Estes podem ser arrefecidos porque, ao absorverem um fóton, têm que “acomodar” o seu momento linear. Se as condições forem adequadas (absorção próxima de uma ressonância atómica numa colisão frontal), o resultado final é a redução da velocidade do átomo. A emissão do fóton pelo átomo excitado transporta momento numa direcção arbitrária, deixando o átomo, em média, com uma velocidade mais baixa.

Esta imagem simples de um “bilhar” de átomos e feixes de fótons dá uma ideia do princípio geral deste processo. Mas como o arrefecimento envolve trocas de energia e de momento selectivas entre a luz e os átomos, esse “bilhar” tem que ser cuidadosamente controlado para que se produza o efeito desejado. As condições necessárias para o arrefecimento são obtidas usando o efeito de Doppler e o facto de a interacção entre a luz e átomos neutros ser amplificada muitas vezes perto de uma ressonância atómica.

A segunda condição que a observação do condensado exige é o aprisionamento dos átomos arrefecidos numa pequena região do espaço. Tal como num problema à nossa escala, o confinamento no espaço é conseguido usando forças que variam com a posição, e, neste caso, essas forças resultam de campos magnéticos com perfis adequados de modo a criar uma armadilha, ou seja, uma região do espaço onde os átomos tendem a ficar presos. Da mesma maneira que uma bola no fundo de uma taça fica presa num mínimo do campo gravítico, o confinamento é conseguido criando um campo em que a energia potencial depende da posição e é mínima no centro da armadilha. As armadilhas magnéticas são facilmente integradas no equipamento de arrefecimento com lasers, e o conjunto dos dispositivos deste tipo é conhecido como armadilhas ópticas e magnéticas.

Esta técnica de arrefecimento atingiu os 10 microkelvin com 10^{11} átomos por centímetro cúbico. Estas condições, se bem que extraordinárias, estão ainda muito longe das condições necessárias para observar o BEC. Mas a técnica foi de tal maneira importante neste contexto, que o Prémio Nobel da Física foi atribuído a S. Chu, C. Cohen-Tannoudji e W. D. Phillips em 1997, dois anos depois de o BEC ter sido observado.

Era evidente que a observação do BEC viria também a ser reconhecida com o prémio Nobel, porque, se ninguém duvidava da existência do BEC, as condições necessárias para o observar eram tão formidáveis que exigiam novas técnicas de arrefecimento. Para os átomos se verem uns aos outros, as ondas de matéria têm que ser suficientemente estendidas para se sobreporem. O “tamanho” destas ondas é dado pelo comprimento de onda térmico, que tem que ser maior do que a distância inter-atómica para permitir que a estatística quântica se faça sentir. Como vimos, isto

implica baixas energias (isto é, baixas temperaturas) e densidades de partículas elevadas, condições em que todas as espécies atómicas formam moléculas ou condensam. O desafio que se punha era passar dos microkelvin aos nanokelvin, mantendo o gás no estado metastável.

A ideia (genialmente simples!) consistiu em desligar os lasers e arrefecer os átomos na armadilha magnética por evaporação forçada. Neste processo, átomos com energias acima da média saem por cima da barreira de potencial, deixando na armadilha a maioria dos átomos a uma temperatura mais baixa. Nos passos seguintes, a altura da armadilha é diminuída gradualmente, deixando na armadilha átomos a temperaturas sucessivamente mais baixas. A fracção de energia removida é muito maior do que a fracção de átomos que escapam da armadilha em cada passo, e o processo de arrefecimento é eficaz. É também extremamente simples e muito semelhante ao que acontece quando deixamos arrefecer uma chávena de café: as moléculas mais energéticas evaporam, deixando na chávena as moléculas menos energéticas e o café frio.

Foi em Junho de 1995 que E. Cornell e C. Wieman anunciaram a observação de um condensado de átomos de ^{87}Rb . A equipa identificou o condensado de Bose-Einstein através da observação de um pico, que aumentava à medida que a temperatura diminuía (Fig. 2). Para temperaturas perto dos 10nK, quase todos os átomos de ^{87}Rb se concentravam no pico correspondente ao estado condensado.

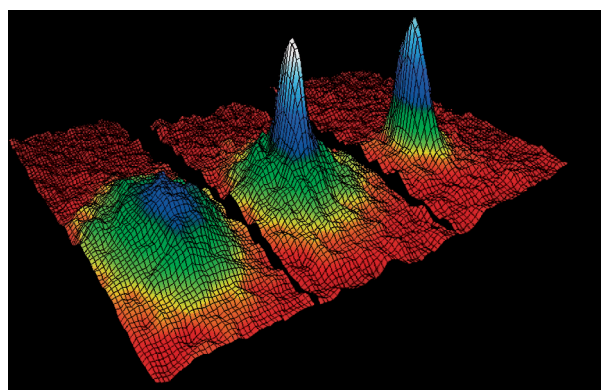


Fig. 2 BEC de ^{87}Rb observado por Cornell e Wieman em 1995. A temperatura decresce da esquerda para a direita, de centenas a dezenas de nK (10^{-9} K). À temperatura mais baixa, quase todos os átomos (cerca de 10^7) de ^{87}Rb estão no estado condensado, indicado pelo pico na figura. A densidade do gás é da ordem de 10^{12} por cm^3 , correspondente a um confinamento da ordem das dezenas de micrometros, numa armadilha com dimensões da ordem do centímetro.

O grupo de W. Ketterlee, que prosseguia estudos paralelos com ^{23}Na , observou uns meses mais tarde um condensado com um número de átomos duas ordens de grandeza

superior, o que lhes permitiu estudar as propriedades do BEC. Ketterle verificou que todos os átomos estavam realmente ligados numa única onda de matéria. Separou o condensado em dois e observou um padrão de interferência muito claro (Fig. 3), pondo em evidência a coerência da onda macroscópica do BEC.

O prémio Nobel da Física foi atribuído a Cornell, Ketterle e Wieman em 2001.

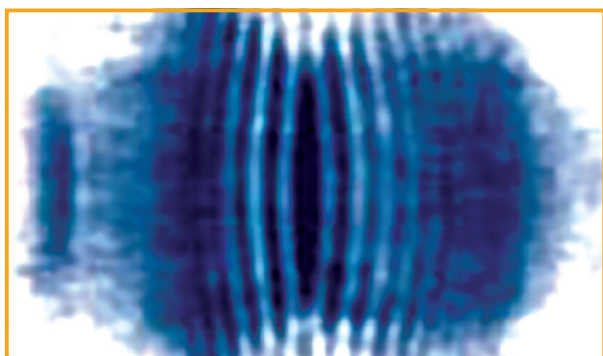


Fig. 3 Padrão de interferência de ondas de BEC do ^{23}Na .

Supercondutores e superfluidos

Em 1911, H. Kamerlingh Onnes observou que a resistência eléctrica do mercúrio desaparece à temperatura do hélio líquido. Onnes chamou ao fenómeno supercondutividade (Prémio Nobel da Física em 1913). Apesar de Onnes ter também notado a superfluidez do ^4He , a sua descoberta é atribuída a P. Kapitza, que, em 1938, observou que a viscosidade do ^4He líquido cai abruptamente (10^8 vezes) a uma temperatura de 2,17 K (Prémio Nobel da Física de 1978).

Supõe-se que a superfluidez, observada na fase líquida do ^4He por Onnes e Kapitza, é uma manifestação da condensação de Bose-Einstein, isto é, a tendência das partículas de condensarem no estado de uma partícula de energia mais baixa.

A transição do ^4He superfluido ocorre a 2,18K, uma temperatura surpreendentemente próxima da estimativa de 3,2 K obtida para um sistema de partículas independentes, com massa e densidade idênticas às do ^4He líquido.

A supercondutividade é o desaparecimento total da resistência eléctrica, abaixo de uma temperatura crítica, característica do material. Um supercondutor é um condutor perfeito onde, uma vez estabelecida, a corrente eléctrica persiste indefinidamente.

Para entendermos a supercondução temos que perceber a que se deve a resistência eléctrica num condutor “normal”.

Os metais são bons condutores da electricidade, mas mesmo os melhores condutores (como o cobre, o ouro ou a prata) oferecem resistência à passagem da corrente. É devido a esta resistência que os fios condutores aquecem e há perdas de energia eléctrica na transmissão.

A resistência decresce à medida que a temperatura baixa, porque é devida em grande parte ao movimento térmico dos átomos, que perturba o movimento dos electrões. Na condução de corrente “normal”, os portadores de carga são os electrões livres dos metais (cerca de 10^{23} por cada centímetro cúbico de metal). Em equilíbrio e na ausência de campo eléctrico, o movimento dos electrões é aleatório e há, em média, tantos electrões a deslocar-se num determinado sentido como no sentido oposto, pelo que não há corrente. Na presença de um campo eléctrico aplicado, esta simetria é quebrada e o excesso de electrões num dos sentidos constitui a corrente eléctrica. As vibrações térmicas dos átomos da rede cristalina dispersam estes electrões em todas as direcções, o que se manifesta globalmente como uma resistência ao movimento dos electrões, limitando o fluxo de carga quando o campo eléctrico está ligado, e anulando a corrente eléctrica logo que este é desligado.

Quanto mais baixa for a temperatura, menores serão as vibrações térmicas e, por isso, a resistência diminui à medida que a temperatura diminui. Mas esta variação é suave, e, idealmente, a resistência devia desaparecer apenas no zero absoluto, onde toda a agitação térmica pára. Mesmo isto é verdade apenas para cristais perfeitos, porque os cristais reais têm imperfeições ou defeitos (impurezas, sítios vazios, átomos no sítio errado) que contribuem para a resistência eléctrica independentemente das vibrações térmicas, e esta contribuição não desaparece quando $T=0$ K.

Contudo, Onnes notou que o mercúrio perde toda a resistência abaixo de 4,2 K. A esta temperatura, ainda há agitação térmica e, claro, (quase todos) os defeitos da rede. Nem as vibrações térmicas nem os defeitos parecem ter qualquer efeito na condução dos electrões no mercúrio abaixo de 4,2 K. Portanto, o que está em jogo na “supercondução” é um mecanismo novo e diferente do que acabámos de descrever. Este mecanismo é robusto e deve-se em última análise à condensação dos electrões (ou melhor de pares de electrões) num estado quântico macroscópico semelhante ao condensado de Bose-Einstein.

Um supercondutor não é apenas um condutor perfeito. É também caracterizado pela expulsão de campos magnéticos estáticos do seu interior, um fenómeno conhecido como efeito de Meissner que joga um papel fundamental em muitas aplicações. Consideremos um supercondutor acima da temperatura crítica (Fig. 4 (a)). O metal (não magnético) comporta-se como o vácuo, e as linhas do campo magnético atravessam-no sem sofrer alterações. Considere-

mos agora o mesmo material abaixo da temperatura crítica (Fig. 4 (b)). O campo magnético é expelido do interior do supercondutor. O processo é reversível: se aquecermos o supercondutor acima da temperatura crítica, as linhas de campo magnético voltam a atravessar o metal. O efeito de Meissner explica-se facilmente com base no fenómeno das correntes induzidas: na presença de um campo magnético, quando a temperatura desce abaixo da temperatura crítica, são geradas supercorrentes permanentes que produzem um campo magnético tal que anula o campo externo no interior do supercondutor.

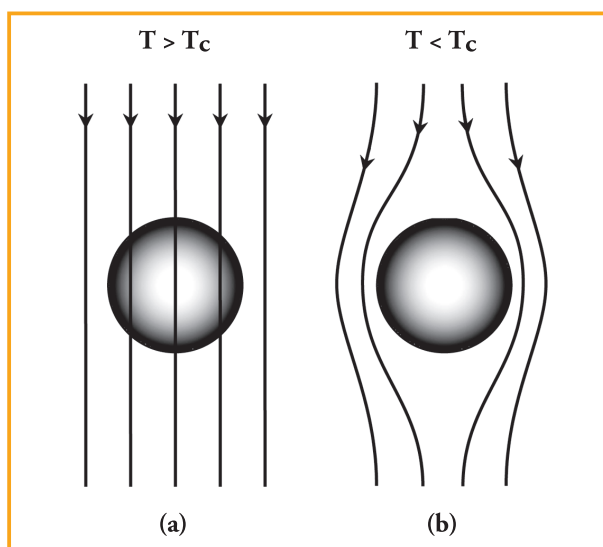


Fig. 4 Efeito de Meissner: acima de T_c as linhas do campo magnético atravessam o material. Abaixo de T_c o campo magnético é expulso do interior da amostra.

O efeito de Meissner dá origem à repulsão entre os supercondutores e magnetes permanentes. As correntes que cancelam o campo exterior criam um campo magnético que é uma imagem no espelho do campo do magnete, e que a distâncias curtas pode ser suficiente para equilibrar o seu peso. A este fenómeno chama-se levitação magnética e uma das suas aplicações mais conhecidas (e espectaculares) consiste na construção de comboios ultra-rápidos que deslizam sem atrito sobre uma almofada magnética.

As aplicações dos supercondutores na construção de magnetes supercondutores são já comuns: magnetes supercondutores capazes de criar campos magnéticos muito intensos são usados na técnica de imagem por ressonância magnética (MRI) em medicina, na investigação da estrutura de moléculas complicadas através da ressonância magnética nuclear (NMR), ou no confinamento de plasmas no âmbito do reactor de fusão. A descoberta dos supercondutores de alta temperatura torna viáveis, na opinião de alguns, aplicações da supercondutividade em larga

escala: cabos supercondutores e comboios levitados magneticamente, apesar de uma teoria satisfatória desta classe de supercondutores ainda não existir. E termino com as palavras de um cientista contemporâneo de Einstein

“... A ciência tem tido aplicações maravilhosas, mas uma ciência que tenha como único objectivo as aplicações, não é ciência, é apenas culinária.” H. Poincaré

BIBLIOGRAFIA

1. www.colorado.edu/physics/2000/index.pl
2. www.superconductors.org
3. www.nobel.se/physics/laureates/index.html.