

Em 1911, o físico Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926), trabalhando em seu laboratório, em Leiden (Holanda), mediu a resistividade de metais em baixíssimas temperaturas. O resultado foi surpreendente. Ao atingir 4,2 Kelvin (269 graus Celsius negativos), a resistência elétrica de um fio de mercúrio caiu subitamente a zero. Pela primeira vez, o ser humano observava uma corrente elétrica fluir sem dissipar calor.

Estava descoberta a supercondutividade.

A explicação teórica para o fenômeno levaria quase meio século. Hoje, 50 anos depois, a teoria, conhecida como BCS, é uma das mais fascinantes da física, sendo aplicada também à superfluidez, na qual a matéria escoa praticamente sem atrito.

Por anos, os pesquisadores debruçaram-se sobre esses dois fenômenos.

Porém, em 2003, uma nova surpresa: foi proposto teoricamente um novo tipo de superfluidez, no qual parte das partículas – diferentemente do que ocorre no fenômeno convencional – ‘dançavam’ sem pares.

A superfluidez com pares quebrados, como foi batizada, ganhou grande repercussão na comunidade científica internacional. Dois físicos brasileiros deram uma contribuição importante para o entendimento desse novo estado da matéria. Nas próximas páginas, o leitor vai conhecer um pouco mais sobre esses superfenômenos.

Heron Caldas

*Departamento de Ciências Naturais,
Universidade Federal de São João del-Rei (MG)*

Um novo



estado da matéria

A superfluidez com pares separados

Nos últimos 50 anos, surgiram várias teorias que empregam um mecanismo semelhante ao da BCS para explicar a formação de pares, em analogia com o fenômeno da supercondutividade, na qual a eletricidade é conduzida sem resistência e, conseqüentemente, sem dissipação de calor por meio do efeito Joule. Esse efeito, que explica o aquecimento de condutores ao serem percorridos por uma corrente (como ocorre no ferro e chuveiro elétricos, por exemplo), é uma homenagem ao físico britânico James Joule (1818-1889).

Essas teorias foram aplicadas não só à matéria comum (por exemplo, o mercúrio empregado por Onnes), mas também a outros sistemas físicos, como o núcleo atômico, aos *quarks* (constituintes dos prótons e nêutrons) e a gases formados por átomos mantidos a baixíssimas temperaturas.

Desses três exemplos, o último deles tem sido motivo de diversas conferências internacionais e centenas de publicações científicas. Seu entendimento teórico tornou-se de fundamental importância, pois foram desenvolvidas recentemente técnicas experimentais extraordinárias para lidar com esses dilutos gases em laboratório e para observar seu estado de mais baixa energia, de forma que esses estados podem até ser vistos e fotografados. Voltaremos a falar sobre isso mais adiante.

Antes disso, porém, vale discutir um ponto essencial para entender não só a teoria BCS, mas também os fenômenos explicados por ela. São os chamados pares de Cooper (de Leon Cooper, o 'C' de BCS, sendo o 'B' de John Bardeen (1908-1991) e o 'S' de John Schrieffer). Primeiro, é preciso dizer que esses pares podem ser formados por partículas com carga elétrica (elétrons, na supercondutividade) ou neutras (no caso dos gases de átomos ultrafrios, como mencionamos acima). Para entender um pouco mais das propriedades desses pares, será preciso discutir brevemente como os físicos classificam as partículas e quais as principais propriedades de cada um desses grupos.

FOTO GRUPO KEVSTONE



Figura 1. Representação artística que pode ser imaginada como um par de Cooper, formado por um férmion com *spin* 'para cima' e outro com *spin* 'para baixo'

Aglomerados e anti-sociais

Hoje, a física conhece centenas de partículas. Porém, todas elas podem ser divididas em dois grupos: i) o dos bósons e ii) o dos férmions. Os elétrons pertencem a este último. Uma analogia interessante feita sobre esses dois tipos de partículas é a seguinte: enquanto os bósons têm uma tendência enorme a 'aglomerar'-se (como ocorre em alguns gases atômicos ultrafrios), os férmions preferem manter-se 'afastados' uns dos outros. A explicação para este último caso é vista ainda no ensino médio: o chamado princípio da exclusão de Pauli (homenagem ao físico austríaco Wolfgang Pauli, 1900-1958) afirma que dois férmions (em geral, o exemplo mais citado é o dos elétrons) não podem ocupar simultaneamente o mesmo estado quântico (podemos pensar que eles evitam convergir para um mesmo 'local').

Apesar desse comportamento 'anti-social', os férmions tendem, no caso dos fenômenos explicados pela teoria BCS, a agrupar-se na forma de pares, e assim, de certa forma, passam a se comportar como bósons (os físicos dizem que ocorre a 'bosonização' dos férmions). No caso da supercondutividade, os elétrons formam pares somente se a amostra atingir um valor abaixo de certa temperatura (a temperatura crítica ou simplesmente T_c). Acima dela, o fenômeno da supercondutividade ou não se manifesta, ou é destruído (ou seja, a amostra comporta-se como um condutor convencional, dissipando calor com a passagem da corrente por ela).

Na supercondutividade, cada elétron de um par de Cooper deve necessariamente ter *spins* contrários. O *spin* é uma propriedade típica do mundo microscópico dos átomos e de suas partículas subatômicas, e não existe nada semelhante no universo macroscópico de nosso cotidiano. No entanto, para nossos propósitos aqui, ele pode ser imaginado como algo próximo à rotação em torno de um eixo central. Assim como em um pião, esse movimento pode ocorrer tanto em sentido horário quanto anti-horário (no caso do *spin*, os físicos preferem dizer 'para cima' e 'para baixo'). A representação artística da figura 1 pode ser comparada a um par de Cooper.

A característica mais marcante dos pares de Cooper, no entanto, é o fato de eles fluírem sem resistência elétrica nos sólidos e serem, por essa razão, chamados supercondutores.

Quinto estado da matéria

Materiais supercondutores têm sido amplamente utilizados. Entre essas aplicações, está a construção de eletroímãs capazes de produzir campos magnéticos de alta intensidade para uso em medicina (ressonância magnética) e na física (nos aceleradores de partículas). No entanto, o fato mais intrigante sobre a supercondutividade não é nem a mera formação de pares de Cooper, nem a condução de corrente sem resistência elétrica, mas sim a subsequente condensação desses pares, conhecida como condensação de Bose-Einstein (CBE), que é, na verdade, um gás de átomos ultrafrios, apresentado no início deste artigo.

Um CBE é, por vezes, denominado quinto estado da matéria, por ter propriedades que o diferem dos sólidos, líquidos, gases e do plasma (este último, uma 'sopa' quentíssima de partículas em que os elétrons estão dissociados de seus núcleos). O CBE foi previsto a partir de artigos do físico indiano Satyendra Bose (1894-1974), em 1924, bem como do físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955), no ano seguinte.

Em um condensado de Bose-Einstein, os átomos bosônicos são resfriados a temperaturas próximas ao zero absoluto (ou seja, próximas a 273,15 graus Celsius negativos). Nessas condições, uma grande porção dos átomos colapsa em um único estado quântico, todos tendendo ao nível de energia acessível mais baixo possível. O impressionante nesse fenômeno subatômico é que ele pode ser observado (e fotografado) em escala macroscópica.

O leitor atento deve estar perguntando-se: li acima que a supercondutividade é formada por férmions. Como pode então haver condensação de Bose-Einstein com os pares de Cooper? Pergunta, sem dúvida, interessante.

Os elétrons que formam os pares supercondutores são proibidos de condensarem sozinhos (ou seja, quando não estão emparelhados), porque são férmions. De fato, o princípio da exclusão de Pauli, mencionado acima, proíbe isso. No entanto, quando férmions de *spins* contrários se atraem e se emparelham, formam objetos bosônicos compostos (que têm uma ‘tendência natural’ à aglomeração, como já dissemos). Outra representação artística está na figura 2. Quando a temperatura é suficientemente baixa, esses bósons compostos condensam-se, e um superfluido é produzido.

Gás ultrafrio

Vamos falar um pouco mais sobre a superfluidez. Um superfluido é um fluido que escoia praticamente sem atrito interno (ou seja, tem baixa viscosidade) e conduz calor de forma muito eficiente, quando atinge temperaturas muito baixas (próximas ao zero absoluto). O elemento químico hélio, em estado líquido, exhibe esse fenômeno, que é análogo à superfluidez apresentada pelos condensados de Bose-Einstein ‘armadilhados’. Para se ter uma idéia da superfluidez, se pingássemos algumas gotas de hélio líquido no interior de um recipiente (um copo, por exemplo), elas subiriam por suas paredes. Se fizéssemos o mesmo com gotas de água, elas praticamente ficariam restritas ao local em que caíram.

Desde a previsão teórica do condensado de Bose-Einstein, foram necessários 70 anos para a ‘criação’ desse fenômeno em laboratório. O primeiro condensado puro foi produzido, em 1995, pelos físicos norte-americanos Eric Cornell e Carl Wieman, da Universidade do Colorado (Estados Unidos). Eles utilizaram um gás formado por átomos de rubídio resfriado a uma temperatura inferior a 170 bilionésimos de Kelvin (que correspondem a 103,15 bilionésimos de grau Celsius negativos). Independentemente, o CBE foi obtido pelo físico alemão Wolfgang Ketterle,

ÁREA É CELEIRO DE NOBEL

A importância dos temas ligados à supercondutividade e à superfluidez, explicados pela teoria BCS, reflete-se na quantidade de prêmios Nobel concedidos diretamente relacionados ao tema. E também na rapidez e nos recordes associados ao recebimento deles.

Onnes, que descobriu a supercondutividade em 1911, recebeu o Nobel dois anos depois. Bardeen ganhou seu segundo Nobel em 1972, pela teoria da supercondutividade, tornando-se assim a única pessoa até hoje a receber dois Nobel em Física. O primeiro, em 1956, foi pela descoberta do efeito transistor, com os norte-americanos William Shockley (1910-1989) e Walter Brattain (1902-1987).

Em 1986, o físico alemão Georg Bednorz e o físico suíço Alex Mueller descobriram o primeiro supercondutor a altas temperaturas (conhecidos pela sigla SCAT), que têm temperatura crítica alta se comparada à dos supercondutores convencionais, cujo recorde atual é de aproximadamente 135 graus Celsius negativos. Os dois receberam o Nobel em Física um ano depois da publicação do artigo que anunciou a descoberta experimental. Foi o reconhecimento mais rápido da história dessa premiação.

O curioso é que a maioria dos SCAT é má condutora de eletricidade em temperatura ambiente, o que faz com que eles sejam utilizados como isolantes em linhas de transmissão elétrica de alta voltagem. Passados 21 anos da descoberta, não há uma teoria que descreva ou explique satisfatoriamente os SCAT.

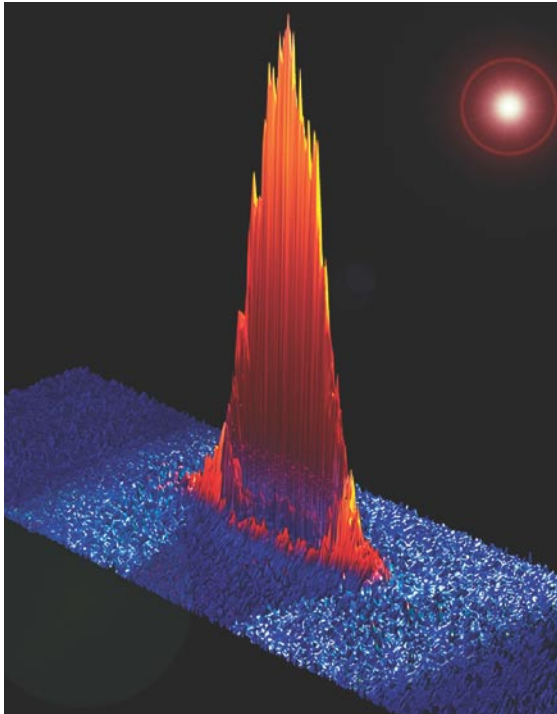
do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), também nos Estados Unidos, empregando átomos de sódio. Pelos feitos, o trio ganhou o Nobel de Física em 2001. O Brasil recentemente criou um CBE (ver ‘Condensado nacional’, em *CH* 242).

Uma consequência direta dessas realizações é que, nos últimos 12 anos, experimentos com átomos ultrafrios têm sido usados, de modo sem precedentes na história da física, para testar previsões da mecânica quântica (teoria que descreve os fenômenos no mundo extremamente diminuto das moléculas, dos átomos e das partículas subatômicas), bem como para explorar o que é chamado pelos físicos de fenômenos de muitos corpos, como a supercondutividade e a superfluidez.



Figura 2. Os férmions com *spins* contrários que formam um par de Cooper perderam suas identidades individuais. Os pares comportam-se agora, efetivamente, como bósons, que podem se aglomerar

Figura 3. Representação de imagem bidimensional da separação de fases em uma 'nuvem' de átomos de lítio-6. A região central da 'cauda' vermelha e semitransparente é formada por átomos totalmente emparelhados. Os picos em vermelho opaco, de cada lado e em volta da base, são os átomos excedentes, não emparelhados. A luz ao fundo é uma representação do laser de prova utilizado na captura dessa imagem



Sem parceiros

Em 2003 outra surpresa (agradável). O volume 90 (página 0470020) da prestigiosa revista científica *Physical Review Letters* trazia um artigo assinado por um pós-doutorando no MIT, o físico chinês Wensheng Liu, e o físico norte-americano Frank Wilczek (ganhador do prêmio Nobel de Física em 2004, juntamente com David Gross e David Politzer). Nele, os autores propuseram um novo fenômeno: a chamada superfluidez com pares quebrados (tradução, do inglês, para *breached-pair superfluidity*).

Esse novo tipo de superfluidez seria formado por um gás de átomos neutros – porém, fermiônicos – emparelhados. No entanto, a diferença crucial, tanto com a supercondutividade quanto com o condensado de Bose-Einstein, era que esse superfluido continha também átomos não emparelhados. E isso impressionou seus propositores.

Os resultados teóricos indicavam que, naquela situação, átomos emparelhados e não emparelhados estariam misturados de forma homogênea, ainda assim dotando a matéria de superfluidez.

Um novo estado da matéria? Sim, podemos imaginá-lo assim; um estado em que a matéria é assimétrica. Vejamos por quê.

Nesse novo estado, há mais férmions de um tipo que do outro (ou seja, há um desequilíbrio entre o número de férmions com *spin* para cima e aqueles com *spin* para baixo). Portanto, alguns deles necessariamente irão ficar sozinhos, sem formar pares. Daí vem o termo 'assimétrica'.

A grande repercussão na comunidade científica internacional desse novo estado de matéria fermiônica ocorreu porque, do ponto de vista de aplicação tecnológica, ele teria propriedades fascinantes. Para citar um entre alguns exemplos possíveis: uma amostra de matéria contendo elétrons e dotada desse tipo de superfluidez iria comportar-se, ao mesmo tempo, como um supercondutor e como um condutor convencional (fio de cobre, por exemplo) de eletricidade.

Baile estudantil

Quais as conseqüências da assimetria no número de candidatos à formação de pares para o comportamento da matéria? Essa é uma pergunta que tem despertado grande interesse dos teóricos da área, que vêm estudando essa questão, por exemplo, em supercondutores com propriedades magnéticas e mesmo na matéria densa e fria que forma o núcleo das estrelas de nêutrons (neste último caso, são alguns *quarks* que não encontram parceiros para formar pares).

Vamos reproduzir aqui uma analogia usada por Wilczek para explicar o que seria a superfluidez com pares quebrados. Imagine que, em um baile estudantil, há mais moças (representando férmions de *spin* para baixo) que rapazes (*spin* para cima). A questão que surge é a seguinte: as moças sem parceiros... a) formariam um tipo de círculo em torno de todos os casais que estão dançando (criando assim uma fase distinta, apenas com átomos não emparelhados)? ou b) iriam se misturar a todos os casais que estão dançando no salão (dessa forma, todo o sistema estaria constituindo uma fase indistinguível, isto é, homogênea)?

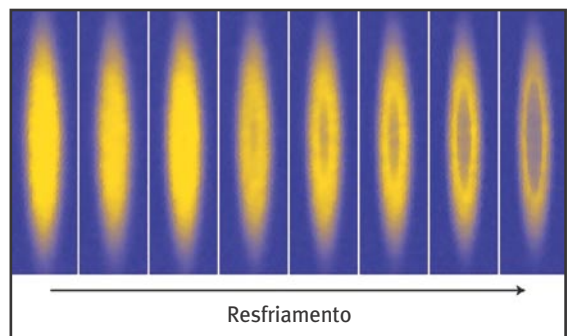


Figura 4. Em um sistema assimétrico, com a diminuição da temperatura (representada na figura pela seta da esquerda para a direita) pode-se observar o aparecimento de uma área escura no centro de cada imagem, onde se encontra uma fase superfluida uniforme, rodeada pelo excesso de átomos desemparelhados, que formam a fase normal

G. PARRIBONE, R. HULET/UNIVERSIDADE RICE. BASEADA EM DADOS DE G. PARRIBONE, W. LI, R. KAMAR, Y. LIU E R. HULET/SCIENCE, V. 311, N. 5766, PP. 903-905 (2006).

Y. SHIN, M. KETTERE/MIT. BASEADA EM DADOS DE Y. SHIN, M. ZWIERLEIN, C. SCHUNCK, A. SCHROEDER E W. KETTERE/PHYS. REV. LETT. 97, 030401 (2006).

A resposta veio do laboratório. Dois grupos experimentais independentes, nos Estados Unidos, um do MIT e outro da Universidade Rice, no Texas, observaram a separação de fases. Os dois grupos usaram uma mistura com diferentes números de átomos de lítio-6 com *spin* para cima e *spin* para baixo, para verificar experimentalmente que a resposta para a questão é a alternativa 'a'. (Os átomos de lítio-6 são férmions, pois têm um número ímpar de nêutrons, prótons e elétrons; o algarismo 6 representa o total de prótons e nêutrons no núcleo desse elemento.) A separação entre as fases superfluida e normal, que representa o estado de mais baixa energia da matéria fermiônica assimétrica, pode ser ilustrada como na foto de abertura deste artigo. Nela, os casais dançando no centro do salão representam os pares de Cooper que formam o superfluido. O excesso de candidatos à formação de pares está fora da região central ocupada pelos pares.

Nos experimentos, os átomos de lítio-6 são resfriados por *lasers*, aprisionados em 'armadilhas' magnéticas e, em seguida, resfriados mais ainda, por evaporação (como acontece com o café quente em uma xícara), utilizando-se técnicas sofisticadas e engenhosas, que não vamos aqui mencionar. A figura 3 mostra, de forma bem nítida, a separação de fases 'fotografada' no laboratório dirigido por Randall Hulet, da Universidade Rice (Estados Unidos).

Moças sozinhas

Na superfluidez com fases separadas, quando a assimetria entre as espécies de átomos com *spin* para cima e *spin* para baixo não é extraordinariamente grande, existe também uma temperatura crítica, como na supercondutividade. Acima dela, todos os átomos fermiônicos estão no estado normal; abaixo, há separação de fases. O sistema aprisionado separa-se nas fases superfluida (todos emparelhados) e normal (átomos não emparelhados), como pode ser visto na figura 4. Essa separação, no entanto, é sutil: se o desequilíbrio entre as espécies atingir certo valor crítico, o sistema não suporta mais essa separação, e todo ele 'pula' para a fase normal, mesmo se a temperatura atingisse o zero absoluto (o zero absoluto, na prática, é inatingível, pois nessa temperatura, o movimento dos átomos simplesmente pararia). Essa segunda transição de fases que acabamos de descrever, que é induzida não pela temperatura, mas sim pelo desequilíbrio entre o número de espécies com *spin* para cima e *spin* para baixo, não existe na supercondutividade convencional, na qual se tem sempre o mesmo número de férmions com os dois tipos de *spins*.

CONTRIBUIÇÃO BRASILEIRA AO TEMA

No trabalho de pós-doutorado do autor deste artigo, no Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (LBL), na Califórnia (Estados Unidos), foram estudados sistemas superfluidos assimétricos. Esses trabalhos mostraram que, na teoria proposta inicialmente por Liu e Wilczek, a superfluidez com pares quebrados não era estável. Eles foram feitos em colaboração com o físico brasileiro Paulo Bedaque – na época, no LBL, e, atualmente, na Universidade de Maryland (Estados Unidos) – e com o físico indiano Gautam Rupak – na época, também no LBL, e, hoje, na Universidade Estadual do Mississippi (Estados Unidos).

Bedaque, Caldas e Rupak propuseram a seguinte explicação: na matéria fermiônica em desequilíbrio haveria uma mistura (ou coexistência) de fases, uma superfluida e outra normal, ou seja, os átomos emparelhados estariam separados dos não emparelhados. A proposta foi publicada na *Physical Review Letters* (v. 91, 247002, 2003).

Meses depois, Wilczek e seu grupo sugeriram, no mesmo periódico, uma nova versão da teoria (v. 94, 017001, 2005), com modificações que, segundo eles, garantiriam a estabilidade do estado com pares quebrados.

A história chegou à mídia e pode ser lida em <http://focus.aps.org/story/v15/st1>. A separação de fases proposta por Bedaque, Caldas e Rupak foi aquela observada experimentalmente pelos grupos do MIT e da Universidade de Rice, como descrito no artigo.

Voltando à nossa analogia, seria como se os casais conseguissem ficar unidos em pares, dançando em um círculo no centro do salão, enquanto o número de mulheres excedentes em torno deles não fosse muito grande. Caso a quantidade de 'moças sozinhas' aumentasse muito, uma transição de fase quântica (abrupta e não suave como ocorre com a água, quando esta passa da fase líquida para a gasosa) aconteceria, resultando na separação dos pares dançantes. Nessa situação, o sistema passa a se comportar como um fluido no estado normal.

Bela e bem-sucedida

Por fim, devemos mencionar que, além da superfluidez com pares quebrados, outras propostas de fases exóticas para sistemas formados por férmions em desequilíbrio foram apresentadas na literatura. Mas nenhuma delas foi observada experimentalmente até o presente.

Os avanços teóricos, bem como as recentes observações experimentais da superfluidez em matéria fermiônica em desequilíbrio, são mais um exemplo de aplicação do ainda atual mecanismo de formação de pares da teoria BCS, uma das mais belas, completas e bem-sucedidas teorias da física. E que acabou de completar 50 anos!

SUGESTÕES PARA LEITURA

- ANNETT, J. F. *Superconductivity, Superfluids, and Condensates* (Oxford: Oxford University Press, 2004).
- TROPER, A. 'A supercondutividade'. In: *CBPF – na vanguarda da pesquisa*. Disponível em formato PDF em www.cbpf.br, no item 'Revista do CBPF em 'Divulgação''.
BAGNATO, V. S. 'A condensação de Bose-Einstein'. In: *Ciência Hoje* nº 111 (1995).
- Na internet (em inglês):
<http://atomcool.rice.edu/>
<http://www.rle.mit.edu/cua/new/cua2.asp>
<http://jilawww.colorado.edu/bec>