

SUPERCONDUTIVIDADE

— UM TEMA EM ABERTO

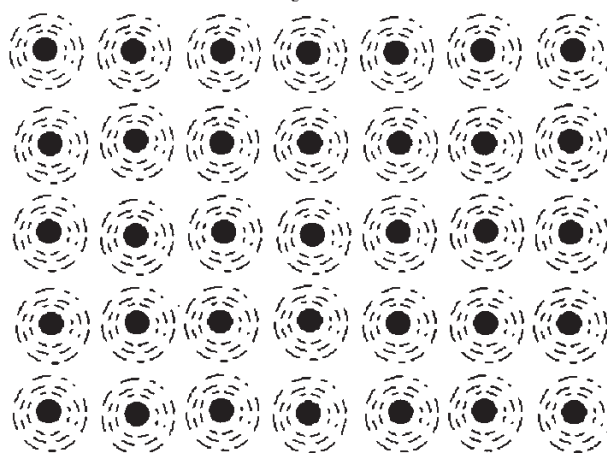
Frederico Carvalho Dias

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Departamento de Ciências Lógico-Dedutivas e Naturais

Introdução

Os átomos que constituem um sólido formam um cristal, ou seja, preenchem o espaço que ocupam de forma regular e periódica. Esta situação não é estática, porque na verdade os átomos não estão imóveis, antes vibram em torno de uma posição média (ver figura 1). A temperatura mede esta agitação dos átomos em termos globais para todo o sólido: quanto maior for a agitação média dos átomos, maior será a sua temperatura.

Figura 1



Um sólido bidimensional: Os átomos (círculos a cheio) ocupam posições periódicas, definindo uma rede cristalina. Devido à temperatura, os átomos vibram em torno da sua posição média. O tamanho dos átomos e a distância entre eles depende do material considerado (e também do valor da temperatura).

Consideremos agora, em concreto, o que se passa nos metais. Nestes, os electrões (de carga negativa) mais exteriores de cada átomo são muito fracamente atraídos pelos respectivos núcleos (de carga positiva), pelo que constituem uma espécie de “mar” de carga negativa que se pode movimentar com grande facilidade por entre a rede cristalina (com uma malha relativamente larga). Por esta razão, os metais são bons condutores eléctricos, i.e. transmitem electricidade (electrões) com grande facilidade. No entanto, essencialmente porque, devido à temperatura, a posição dos núcleos está a oscilar e os electrões de condução estão, embora fracamente, sob a sua influência, os metais oferecem alguma resistência à passagem de corrente eléctrica. Este efeito é tanto maior quanto maior for a agitação dos átomos do metal, razão pela qual a *resistência eléctrica* de um metal aumenta com a temperatura. Mesmo muito próximo do zero absoluto (-273.15°C), em que os núcleos estariam praticamente imóveis, haveria colisões entre estes e os electrões, pelo que, apesar de menor, nesta situação a resistência eléc-

trica não desapareceria. A resistência eléctrica de um metal depende das suas dimensões e forma, fazendo apenas sentido comparar a resistência de diferentes metais para amostras com o mesmo tamanho e forma. Por convenção, mede-se a resistência eléctrica entre duas faces opostas de um cubo de material com um centímetro de lado, definindo-se assim a chamada *resistividade eléctrica*, que é expressa em ohm-cm. Na tabela 1 estão indicados os valores da resistividade para alguns metais, bem como para um isolante (o vidro); de notar a diferença de cerca de 18 ordens de grandeza entre a resistividade do vidro e dos metais (i.e., o vidro oferece uma resistência à passagem de electricidade 10^{18} (= 1 seguido de 18 zeros) vezes maior que os metais.

Tabela 1
Resistividade de alguns materiais a 20° C

material	resistividade (em ohm-cm)
cobre	1.7×10^{-6}
ouro	2.2×10^{-6}
ferro	9.8×10^{-6}
vidro (isolante)	1×10^{12}

Uma das principais consequências da existência de resistência eléctrica nos metais é que uma parte da energia eléctrica é perdida, sendo libertada sob outras formas de energia. A potência (energia por unidade de tempo) dissipada é tanto maior quanto maior for a resistência eléctrica do condutor. Este efeito pode, à primeira vista, parecer indesejável, mas, por vezes, é até conveniente ter um condutor com resistência eléctrica relativamente elevada. A nossa vida seria muito diferente se as coisas se passassem de outro modo. Para citar apenas dois exemplos do quotidiano: numa torradeira a energia eléctrica perdida é libertada sob a forma de calor (energia térmica), que é então utilizado para torrar o pão; numa lâmpada a energia eléctrica perdida é libertada sob a forma de luz.

Supercondutividade nos metais

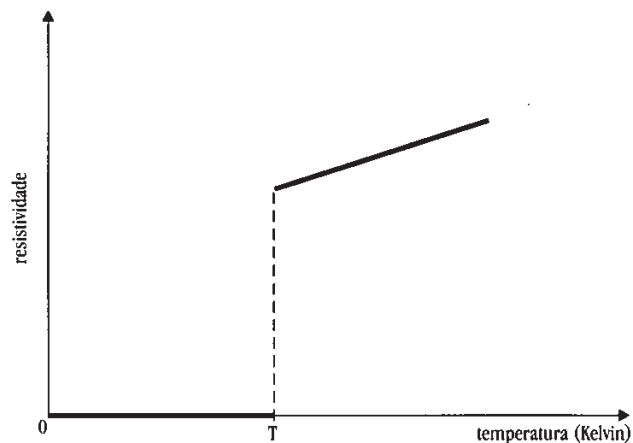
No ano de 1911, Kamerlingh Onnes, em Leiden, descobriu no mercúrio¹ o fenómeno da Supercondutividade. Onnes descobriu que a cerca 4.20 graus Kelvin² a resistividade eléctrica do mercúrio caía subitamente para zero. Rapidamente se verificou que muitos metais tinham esta propriedade, i.e., a uma dada temperatura (a chamada temperatura crítica), que depende do metal em questão, a resistividade assume descontinuamente o valor zero (ver figura 2). Os valores de T_c

¹ O mercúrio é um metal que à temperatura ambiente (cerca de 20° C) é líquido.

² A escala Kelvin de temperatura, ou escala de temperatura absoluta, tem como zero o chamado zero absoluto (menor temperatura que pode ser atingida). Para obter o valor correspondente em graus Celcius, basta subtrair 273.15. Uma diferença de temperatura de 1 grau Kelvin corresponde a uma diferença de 1 grau Celcius.

para alguns metais são apresentados na tabela 2. Note-se que o valor mais elevado se dá para uma liga de nióbio e titânio, com uma temperatura crítica de 11 K (i.e., -262.15° C)

Figura 2



A resistividade eléctrica de um metal em função da temperatura. Para uma dada temperatura crítica T_c , que depende do metal, este torna-se supercondutor. Em particular, o metal passa a ter resistividade nula.

Tabela 2
Temperatura crítica de alguns metais

metal	T_c (em Kelvin)
chumbo	7.19
zinco	0.88
mercúrio	4.15
liga de nióbio e titânio	11

Como os supercondutores não dissipam energia, uma corrente eléctrica pode permanecer a circular indefinidamente sem atenuação num anel supercondutor. No laboratório, estas correntes persistentes foram observadas ao longo de intervalos de tempo de cerca de um ano³ sem que se detectasse a mais pequena diminuição na sua intensidade. Algumas estimativas bastante precisas indicam que serão necessários pelo menos cem mil anos para que estas correntes sofram uma atenuação apreciável.

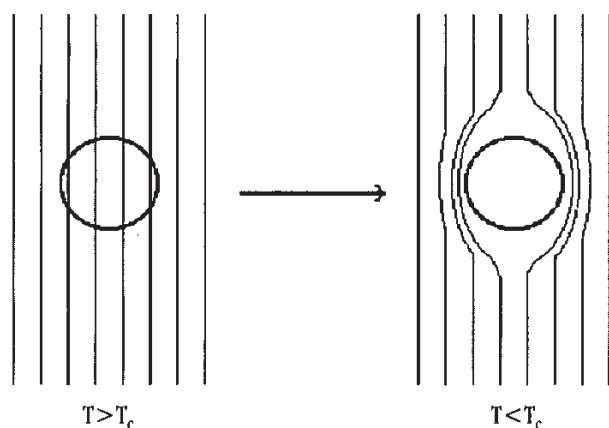
Um supercondutor não é um condutor perfeito, ou seja, um condutor normal de resistividade nula. A propriedade mais espectacular dos supercondutores que não é partilhada pelos condutores normais⁴

³ Ao fim deste intervalo de tempo (enorme em termos de fenómenos eléctricos) a experiência laboratorial é em geral interrompida, uma vez que nada de novo aconteceu...

⁴ Para temperaturas superiores a T_c , os metais são condutores normais, embora de resistividade não nula. Um condutor, normal, perfeito não dissipa energia (pois tem resistência eléctrica nula) mas não tem efeito de Meissner.

é o chamado efeito de Meissner: quando colocado num campo magnético e sendo arrefecido até uma temperatura inferior a T_c , um supercondutor expulsa o campo magnético do seu interior (ver figura 3). Por outro lado, se o supercondutor estiver sujeito a um campo magnético suficientemente forte este fará com que o material volte ao estado normal. Tal como uma determinada substância apenas existe no estado sólido, líquido ou gasoso para um determinado conjunto de valores da pressão e da temperatura, um metal apenas é supercondutor para um determinado conjunto de valores da temperatura e do campo magnético a que está sujeito, como indicado no diagrama de fases da figura 4.

Figura 3



O efeito Meissner: uma esfera de material supercondutor colocada, no estado normal, num campo magnético é arrefecida abaixo da temperatura crítica, expulsando o campo magnético do seu interior.

Figura 4

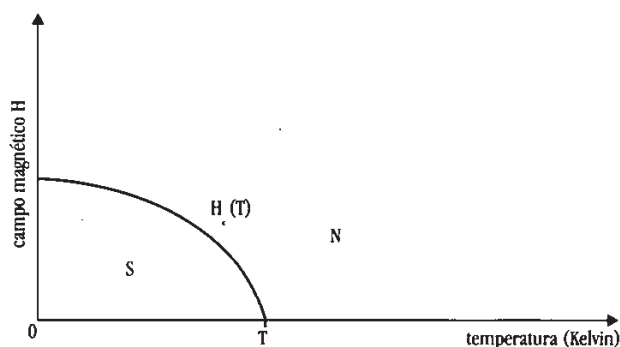
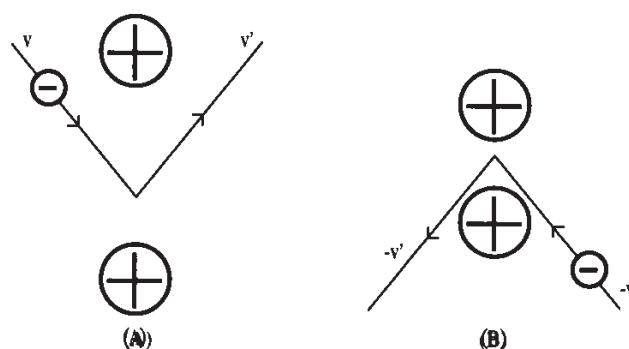


Diagrama de fases de um metal supercondutor. Para temperaturas inferiores a T_c e abaixo da linha de campo crítico, $H_c(T)$, o metal está na fase supercondutora (S); caso contrário, o metal está na fase normal (N).

A compreensão teórica da supercondutividade constituiu um dos maiores desafios da Física do século xx. O fenómeno foi percebido em 1956/57 por Bardeen, Cooper e Schrieffer⁵, sendo a respectiva explicação conhecida como Teoria BCS, que se tornou numa das mais importantes confirmações da Mecânica Quântica⁶. A fase supercondutora consiste num estado ordenado dos electrões de condução do metal. Mais concretamente, os electrões agrupam-se aos pares (pares de Cooper) de tal forma que (por razões explicadas pela Mecânica Quântica mas que estão para além do âmbito deste artigo) aos deslocarem-se ao longo do metal não sofrem qualquer tipo de resistência ao seu movimento. O mecanismo microscópico que leva ao emparelhamento dos electrões está esquematicamente ilustrado na figura 5: (A) um electrão de condução com velocidade v atrai os núcleos (de carga positiva) da rede cristalina, alterando no processo a sua velocidade para v' ; (B) de seguida, um outro electrão movendo-se à mesma velocidade na direcção contrária interage com os núcleos (mais próximos uns dos outros) alterando a sua velocidade para $-v'$, voltando os núcleos à sua configuração inicial. Deste modo os dois electrões deslocam-se sempre à mesma velocidade em sentidos contrários, formando um par de Cooper. Tudo se passa como se os dois electrões se atraíssem mutuamente. Quando uma corrente eléctrica atravessa o supercondutor, os centros de massa dos pares de Cooper deslocam-se no sentido da corrente, sem qualquer tipo de resistência e curto-circuitando a corrente que seria eventualmente produzida pelos electrões não emparelhados.

Figura 5



A formação de pares de Cooper.

- 5 Bardeen, Cooper e Schrieffer receberam em 1972 o Prémio Nobel da Física, pelo seu desenvolvimento da teoria da supercondutividade. Em 1913, o prémio foi atribuído a Kamerlingh Onnes, pelas suas investigações das propriedades da matéria a baixas temperaturas.
- 6 A supercondutividade é essencialmente um fenómeno de coerência quântica que se manifesta à escala macroscópica (i.e., à nossa escala).

Supercondutividade...

Acima da temperatura crítica, as vibrações dos núcleos da rede cristalina são demasiado rápidas, de tal forma que os núcleos praticamente não sentem a acção dos electrões, deixando de ocorrer a formação de pares de Cooper. Na fase normal do metal, os electrões deixam de estar num estado ordenado. Este mecanismo de formação de pares de Cooper permite compreender porque é que diferentes metais têm temperaturas críticas diferentes: os núcleos de metais diferentes têm massas diferentes, e por sua vez a frequência de vibração dos núcleos depende da sua massa. Esta explicação é confirmada pelo chamado efeito isotópico: quando se substitui uma porção dos átomos do metal por isótopos⁷ mais pesados, a temperatura crítica do metal diminui.

Algumas aplicações tecnológicas dos supercondutores

Como os supercondutores não dissipam energia eléctrica, uma das suas aplicações tecnológicas é óbvia: transporte de electricidade sem perdas. Por outro lado, como os electrões supercondutores não sofrem qualquer tipo de resistência ao seu movimento, quando utilizados na indústria informática os supercondutores permitirão obter computadores muito mais rápidos que os mais potentes computadores actualmente em funcionamento.

Uma outra utilização desde cedo concebida envolve o aproveitamento das correntes eléctricas persistentes, que permitiriam obter e manter campos magnéticos suficientemente fortes para levantar e acelerar um comboio de passageiros ou de carga, que assim se deslocaria “pelo ar” praticamente sem atrito, atingindo velocidades da ordem dos 500 km/h.

A grande sensibilidade dos supercondutores aos campos magnéticos faz com que, já hoje em dia, sejam utilizados em aparelhos de medida de grande precisão e qualidade, por exemplo em aparelhos hospitalares de ressonância magnética (MRI)

Supercondutores a Alta Temperatura Crítica

O sucesso da Teoria BCS trouxe consigo um factor de desapontamento no que concerne à exequibilidade das aplicações tecnológicas. Com efeito, a teoria prevê um limite máximo de 30 K (i.e., cerca de -243° C) para o valor da temperatura crítica de qualquer metal. Ora, para obter temperaturas desta ordem de grandeza é necessário utilizar hélio líquido, que, para além de ser muito dispendioso, é de difícil

manuseamento, estando extremamente sujeito a fugas e, portanto, a grandes percentagens de perda, tornando muitas das aplicações tecnológicas dos supercondutores economicamente inviáveis.

Em 1986, uma nova família de materiais supercondutores foi descoberta por Bednorz e Müller⁸, trabalhando nos laboratórios de investigação da IBM na Suíça. O valor de 36 K para T_c obtido era suficientemente elevado para que se suspeitasse imediatamente que as suas propriedades não seriam explicadas pela Teoria BCS. Estes novos materiais são, essencialmente, cerâmicas dopadas, o que significa que alguns átomos do composto original são substituídos por átomos de outro elemento (o dopante). Para baixas concentrações de dopagem, as cerâmicas são isolantes, enquanto que para dopagens elevadas se comportam como um metal com propriedades muito estranhas; para uma gama curta de valores intermédios da dopagem a cerâmica torna-se supercondutora (ver o diagrama de fases na figura 6). No ano seguinte, um outro grupo de investigação obteve um composto do mesmo tipo com uma temperatura crítica de 93 K. Desde então têm-se obtido novas cerâmicas com valores de T_c cada vez mais elevados, como indicado na tabela 3. Como as temperaturas envolvidas são grandes quando comparadas com o valor máximo previsto pela teoria BCS, a esta família de novos materiais deu-se o nome de Supercondutores a Alta Temperatura Crítica. Para obter temperaturas desta ordem de grandeza basta utilizar azoto líquido⁹, que, para além de ser extremamente barato e fácil de produzir, não tem os problemas de fugas do hélio líquido. Este facto torna as aplicações tecnológicas anteriormente referidas extremamente atractivas do ponto de vista económico. Não é pois de estranhar que a Supercondutividade a Alta Temperatura Crítica seja uma das áreas de investigação da Física em que hoje em dia se investem mais fundos.

Figura 6

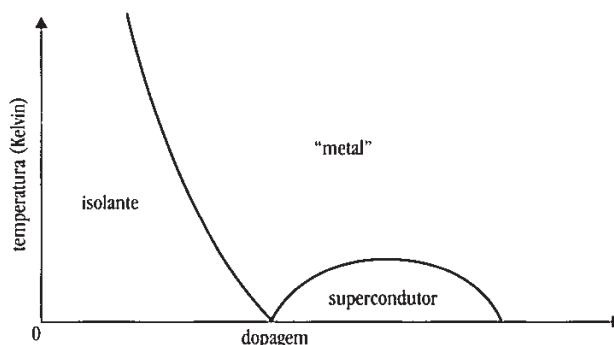


Diagrama de fases típico de um Supercondutor a Alta Temperatura Crítica.

⁷ Um isótopo consiste num átomo com o mesmo número de electrões e com a mesma carga positiva no núcleo (e, portanto, as propriedades químicas são as mesmas), mas este último tem uma massa diferente (porque contém um número diferente de neutrões – partículas nucleares sem carga eléctrica mas tendo massa idêntica à dos prótons, que são as partículas do núcleo carregadas positivamente).

⁸ Por esta descoberta, Bednorz e Müller receberam em 1987 o Prémio Nobel da Física.

⁹ O azoto liquefaz a 77 K, i.e., a -196° C.

Tabela 3
Supercondutores a Alta Temperatura Crítica

material	T _c (em Kelvin)
(La/Sr)CuO ₄	36
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	93
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{10+δ}	125
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ}	133

O trabalho experimental realizado sobre estes novos materiais esclareceram inequivocamente dois factos: estas cerâmicas tornam-se supercondutoras através da formação de pares de Cooper, mas o processo de emparelhamento não é o mesmo que para os metais (anteriormente descrito), uma vez que não se dá o efeito isotópico. Na verdade, estes novos materiais têm escapado a todas as tentativas efectuadas para entender as suas propriedades. Hoje em dia, suspeita-se que o mecanismo responsável pela formação dos pares de Cooper seja de natureza magnética, embora ainda não existam certezas. Mesmo as fases isolante e “metálica” têm iludido todas as tentativas de descrição e modelação teórica. Por conseguinte, não existem pistas teóricas para orientar a investigação experimental, e os valores cada vez mais elevados da temperatura crítica têm sido obtidos um pouco às cegas, apenas por tentativa e erro. Claro que um dos objectivos é obter compostos supercondutores à temperatura ambiente. Este feito teria talvez tanto impacto quanto teve a revolução industrial, alterando radicalmente a nossa tecnologia. Apesar de nada se saber, existe a convicção optimista de que será possível obter materiais com temperaturas críticas acima dos 20° C, tão rápido tem sido o progresso neste campo. No entanto, a ausência de uma imagem teórica, ainda que apenas aproximada, limita grandemente o tipo de avanços que se podem realizar.

Há quem diga que, ao fim de mais de dez anos após a sua descoberta, estes materiais já deveriam estar compreendidos e explicados. Mas se notarmos que foram necessários quase cinquenta anos desde a sua descoberta para perceber a física da supercondutividade dos metais, com nomes da craveira de um Feynman¹⁰ envolvidos no processo, talvez seja ainda cedo para assumir uma atitude derrotista. De qualquer modo, a supercondutividade a alta temperatura crítica constitui actualmente um dos tópicos de investigação, teórica e experimental, mais estimulantes, activos e competitivos da Física.

Para saber mais...

A supercondutividade constitui um campo actual e ainda em desenvolvimento de investigação em Física, quer teórica, quer experimental. Por outro lado, é um dos temas englobados na Física da Matéria

Condensada, a parte da Física que estuda as propriedades dos sólidos e líquidos. Por estas razões, os livros exclusivamente sobre supercondutividade são extremamente técnicos, estando, no mínimo, ao nível de um último ano de uma licenciatura em Física.

Assim, as referências bibliográficas a seguir indicadas são de carácter mais abrangente, o que até constituirá uma mais valia para o leitor interessado, uma vez que abordam também outros temas, muitos deles relacionados com a supercondutividade, que ultrapassam largamente o âmbito deste artigo.

- B. S. Chandrasekhar, *Why are things the way they are*, Cambridge University Press, 1998 – Um excelente livro de divulgação (que pode ser lido e entendido por qualquer pessoa) sobre a Física da Matéria Condensada, utilizando objectos e fenómenos do dia-a-dia para exemplos e explicações.
- Malcom E. Lines, *On the shoulders of giants*, Institute of Physics Publishing, 1994 – Aborda a forma como a Matemática auxiliou no desenvolvimento da Física e indicou direcções de investigação. O capítulo sobre ondas e análise de Fourier é um excelente ponto de partida para compreender o comportamento dos electrões nos sólidos.
- Fishbane, Gasiorowicz, Thornton – *Physics for Scientists and Engineers (2nd edition)*, Prentice Hall, 1996 – Ao fim dos três primeiros semestres das licenciaturas em Ciências Naturais e Engenharias, os alunos estudaram já os temas abordados na primeira metade deste livro, possuindo os conhecimentos e as ferramentas básicas para entender os capítulos mais específicos sobre as propriedades da matéria em geral, e dos metais e supercondutores em particular.
- Charles Kittel, *Introduction to Solid State Physics (7th edition)*, John Wiley & Sons, 1996 – Idealmente, deverá ser lido por quem possuir conhecimentos elementares de Electromagnetismo, Termodinâmica e Mecânica Quântica, mas, com algum esforço e concentração, é acessível aos alunos do segundo ano das licenciaturas em Ciências Naturais e Engenharias. Contém muitos valores experimentais sobre as mais variadas propriedades físicas da matéria.
- V. L. Fitch, D. R. Marlow, M. A. E. Dementi (eds.), *Critical Problems in Physics*, Princeton University Press, 1997 – Recolha das palestras apresentadas numa conferência de celebração do 250º aniversário da Universidade de Princeton. Como o próprio nome indica, são apresentados os problemas em aberto no campo da Física, contendo um capítulo sobre os supercondutores a alta temperatura crítica. Constitui o livro mais avançado incluído neste conjunto de referências bibliográficas.

¹⁰ Feynman trabalhou arduamente durante anos no problema da supercondutividade, sem o conseguir resolver.