

Investigação Científica Fundamental: Para Quê? Supercondutores e Aplicações ¹

L. M. Martelo

Departamento de Física

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

P-4200-465 Porto, Portugal

23 de Outubro de 2004

Resumo: Neste texto, abordar-se-á a relação entre a denominada Investigação Científica Fundamental, em particular na Física, base das denominadas Ciências Naturais, e as suas implicações para a vida quotidiana. As descobertas científicas, muitas vezes vistas como “exóticas”, revelam uma aplicabilidade ao mundo do dia-a-dia surpreendente. Serão apresentados, como exemplos desta relação, a invenção do laser e o estudo dos semicondutores. De entre as descobertas científicas mais recentes, as quais praticamente somente existem em laboratório, seleccionou-se a Supercondutividade. Serão referidas, em geral, algumas das actuais e potenciais aplicações de materiais supercondutores, em particular, ao domínio dos transportes.

1 Introdução

1.1 O Laser

No ano de 1890, o físico francês Henri Becquerel observou o primeiro efeito holográfico: a formação de uma imagem tridimensional ou holograma. A Holografia baseia-se na natureza ondulatória da luz e foi pela primeira vez demonstrada em 1801 pelo médico e filósofo natural inglês Thomas Young, com base na teoria ondulatória do matemático e físico holandês Christiaan Huygens. Em 1948, o engenheiro electrotécnico húngaro Dennis Gabor através de equipamentos simples usados em Holografia, então denominada por Técnica de Reconstrução de Frente de Onda, desenvolveu um sistema de cinematografia estereoscópica [1, 2, 3]. Essencialmente, Gabor colocou a questão de como se poderia obter uma imagem tridimensional. A resposta que obteve foi que seria necessário uma *luz monocromática e coerente*. A luz usual não é apropriada uma vez que é policromática e incoerente.

Em 1953, o físico norte-americano Charles Townes e colaboradores na Universidade da Colúmbia (E.U.A.), trabalhando em Espectroscopia Molecular, implementaram um dispositivo, essencialmente composto por cristais de Rubi e amoníaco gasoso [4], o qual produziu os primeiros raios de radiação monocromática e coerente. Este dispositivo emitia radiação na região do espectro electromagnético das micro-ondas [5]. Este tipo de equipamento é conhecido por Maser, iniciais de *Microwave Amplifier by Stimulated Emission of Radiation*. O princípio de funcionamento baseia-se na Teoria da Radiação Estimulada baseada nos estudos teóricos em Física Quântica e descrita pela primeira vez por Albert Einstein em 1917 [6]. Em 1955, dispositivos análogos foram inventados, independentemente, por investigadores da Universidade de Maryland (E.U.A.) e dos Laboratórios Lebedev de Moscovo (Rússia). Em 1958, Charles Townes e o físico norte-americano Arthur Schawlow mostraram teoricamente que era possível que os Masers operassem na região do infra-vermelho e do *visível* [7]. Em 1960, o físico norte-americano R. J. Collins e colaboradores nos “Bell Labs” apresentam o primeiro Laser, iniciais de *Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation*, da história [8]. No mesmo ano, o engenheiro físico norte-americano Theodore Maiman e colaboradores conseguem com um laser emitir impulsos luminosos com intensidade de cerca de 10 milhões de vezes superior à da luz solar [9].

¹L. M. Martelo, “Investigação Fundamental: Para quê? Supercondutores e Aplicações” in “O Automóvel e o Futuro”, Museu dos Transportes e Comunicações do Porto, Eds. A. Costa e J. F. de Sousa, pp. 163-181, 2005, ISBN: 972-99632-0-7

Actualmente as aplicações dos lasers são imensas: na Medicina é possível efectuar incisões cirúrgicas ultra-precisas usando um laser em vez da tradicional lâmina de um bisturi, na leitura de CDs, DVDs, memórias ópticas, códigos de barras (supermercados, etc), em espectáculos de raios multicoloridos, no transporte de dados em fibras ópticas, no corte de materiais na indústria, no alinhamento de obras, etc. (Fig. 1). Decorreram portanto cerca de *quatro décadas* de estudos teóricos e laboratoriais em lasers até às suas aplicações no dia-a-dia.

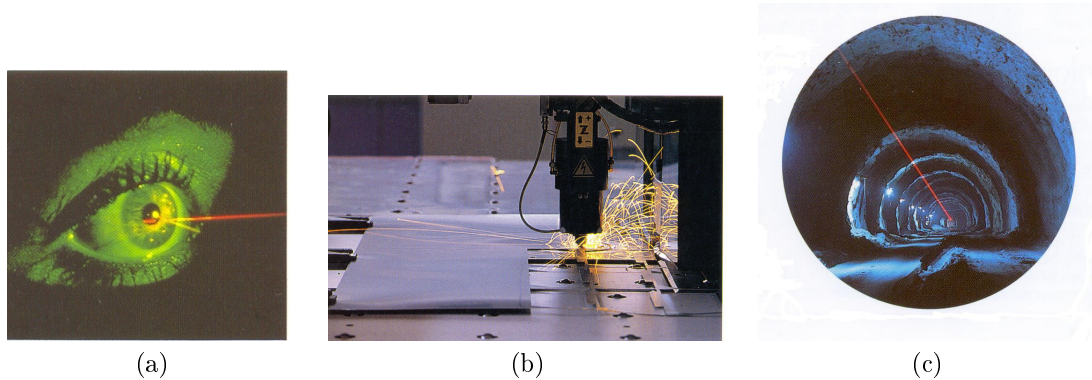


Figura 1: Algumas aplicações de lasers: (a) cirurgia de oftalmologia; (b) corte de materiais; (c) alinhamento de uma obra.

1.2 Os Semicondutores

Os semicondutores começaram a ser estudados em laboratório em 1830. Os primeiros materiais semicondutores consistiam em elementos e compostos que quando aquecidos se comportavam como condutores eléctricos, ainda que possuindo uma condutividade eléctrica relativamente baixa. Fazendo-se incidir luz sobre estes materiais, conseguia-se gerar nestes uma corrente eléctrica relativamente apreciável. Por volta de 1870, a electricidade, usada até então apenas para o transporte de energia eléctrica, começa a ser utilizada para o transporte de informação. Os primeiros dispositivos eléctricos a transportar informação foram o telégrafo, o telefone e mais tarde o rádio. Em 1899, o físico alemão Ferdinand Braun apresenta um rectificador de corrente usando as propriedades rectificadoras do Cristal de Galena, material semiconductor composto de sulfureto de chumbo. Os rectificadores de corrente são dispositivos fundamentais para os receptores de rádio detectarem sinais. Em 1947, o engenheiro electrotécnico norte-americano John Bardeen, os físicos norte-americanos Walter Brattain e William Schockley da “Bell Telephone Laboratories” apresentam o primeiro transistor (amplificador) da história usando semicondutores (Fig. 2). Este dispositivo foi concebido inicialmente como possível substituto para os interruptores electromecânicos das centrais telefónicas. O transistor substitui então o tríodo, o qual consiste numa válvula de três eléctrodos utilizando electrões, inventada em 1906 pelo físico norte-americano Lee de Forest e que é considerado como o primeiro amplificador autêntico.

Até finais da década de 1950, os componentes electrónicos (transistores, díodos, condensadores, resistências, indutâncias, etc.) eram discretos. Em 1958, Jack Kibly da “Texas Instruments” construiu o primeiro circuito integrado, no qual os vários componentes eram implementados directamente numa pastilha de Silício. Em 1959, Jean Hoerni and Robert Noyce da “Fairchild Semiconductor” desenvolvem um processo inovador, a tecnologia planar, que permitirá um enorme desenvolvimento da tecnologia dos circuitos integrados. Na década de 1960, cerca de 90 % dos componentes electrónicos fabricados são circuitos integrados. Surge a Micro-Electrónica baseada nos denominados circuitos integrados microscópicos: os *micro-chips*. Estes possuem cerca de uma dezena de milhões de componentes microscópicos (transistores, díodos, condensadores, resistências, etc., possuindo dimensões da ordem de 10^{-6} m) gravados em pastilhas usando os mais variados materiais semicondutores (Fig. 3).

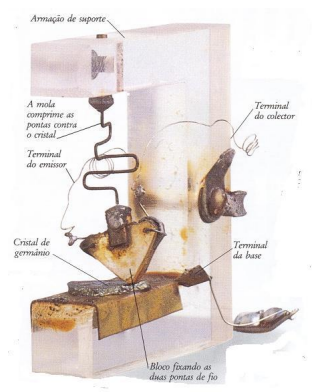


Figura 2: O primeiro transistor possuía cerca de 10 cm de altura.

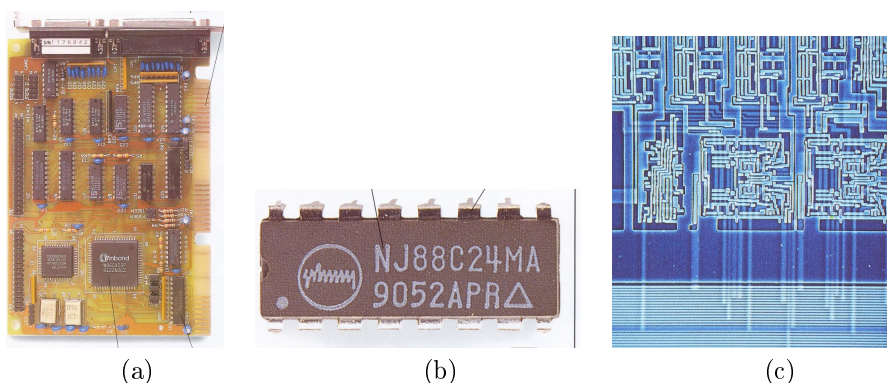


Figura 3: Micro-Eletrônica: (a) placa contendo circuitos integrados; (b) circuito integrado (*micro-chip*); (c) componentes de um *micro-chip* vistos através de um microscópio eletrônico.

As aplicações da Micro-Eletrônica são inumeráveis: microprocessadores, computadores, CDs, DVDs, scanners, fotocopiadoras, telemóveis, LCDs, caixas multibanco, cartões, etc. Podemos afirmar que hoje em dia não existe praticamente nenhum dispositivo elétrico que não contenha um *micro-chip*. Sem os estudos em Física Quântica, em particular na área dos semicondutores, não teríamos hoje, por exemplo, as fotocopiadoras [11]. Decorreu portanto mais de *um século* de estudos teóricos e laboratoriais em semicondutores até às suas aplicações no dia-a-dia.

1.3 A Interdisciplinaridade

Descobertas e ideias no domínio teórico e experimental, aparentemente “exóticas” e inicialmente confinadas aos laboratórios de investigação, conduziram após *décadas e décadas de investigação* às mais variadas aplicações na vida quotidiana. A distinção entre investigação científica fundamental, aplicada, tecnológica, etc., não se parece enquadrar num esquema estanque. A *simbiose* entre os diversos ramos do conhecimento humano: Matemática, Física, Química, Engenharia, Biologia, Medicina, etc., tem-se traduzido em aplicações bastante profícuas e mostrando a interdisciplinaridade como um meio pleno de potencialidades para o desenvolvimento do conhecimento científico.

2 Os Condutores Eléctricos

Do ponto de vista macroscópico, um condutor elétrico trata-se, *grosso modo*, de um dispositivo metálico (um fio, um cabo, feitos de Cobre, Alumínio, Platina, Prata, etc.) que *transporta energia eléctrica* de um ponto para outro (por exemplo, os cabos de alta-tensão que transportam energia eléctrica desde uma central

hidroelétrica, termoeétrica, nuclear, eólica, até às nossas aldeias, vilas e cidades). Um condutor elétrico possui uma *resistência elétrica não-nula* à passagem da corrente elétrica, o que provoca *perdas de energia*. Injectando-se uma corrente elétrica num anel condutor, esta desaparece em cerca de 0.000 000 000 001 s [10, 12]. Temos de ligar o anel a uma fonte de energia elétrica exterior (bateria, gerador) para mantermos a corrente elétrica no anel. A Física Quântica mostra que se a rede cristalina de um metal fosse perfeita (sem imperfeições ou impurezas) e se as interações entre os electrões fossem nulas, então esse metal comportar-se-ia como um condutor elétrico ideal, possuindo resistência elétrica nula à passagem da corrente elétrica [13]. A sua realização prática revela-se portanto muito difícil, senão mesmo impossível.

3 Os Supercondutores

Existem materiais que para temperaturas inferiores a uma determinada temperatura crítica T_c apresentam uma *fase elétrica supercondutora*. Os supercondutores possuem, entre outras, as seguintes características essenciais: (i) *resistência elétrica nula*, transportando portanto energia elétrica *sem perdas* (injectando-se corrente elétrica num anel supercondutor, esta persiste quase indefinidamente [12]); (ii) *diamagnetismo perfeito*, o qual se traduz, *grosso modo*, numa resposta magnética oposta ao campo magnético aplicado exteriormente, ocorrendo a denominada *levitação magnética* (Fig. 4). De realçar que um supercondutor, apesar de apresentar uma resistência elétrica nula, *não* é de todo o condutor elétrico ideal descrito na Secção anterior.

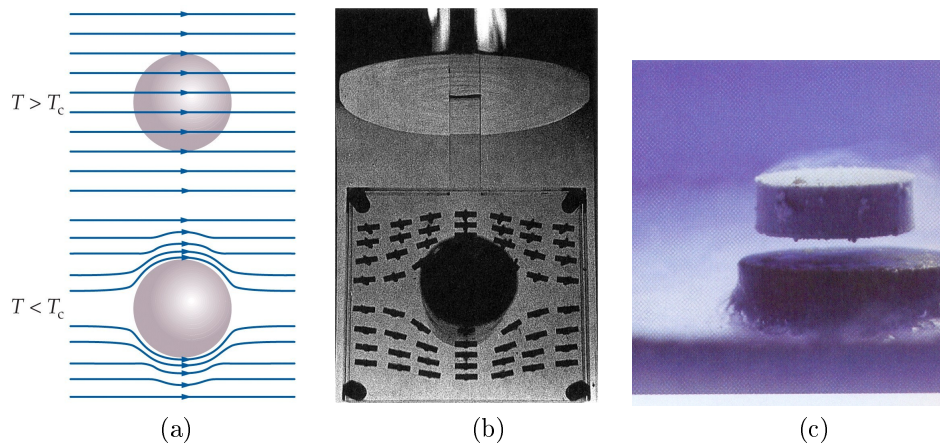


Figura 4: Supercondutores: (a) expulsão do campo magnético quando um material transita para o estado supercondutor (Efeito de Meissner); (b) visualização do Efeito de Meissner em laboratório; (c) disco supercondutor em levitação magnética.

Os supercondutores operam a *temperaturas muito baixas*, o que constitui um sério obstáculo tecnológico, mas também um grande desafio do ponto de vista quer teórico quer experimental. Existem diferentes tipos de materiais supercondutores: metálicos, cerâmicos e orgânicos. De entre os diversos tipos de supercondutores, os cerâmicos são os que actualmente operam a temperaturas mais elevadas (ver Tabs. 1 e 2).

3.1 Os Supercondutores Metálicos de Baixa-Temperatura

O fenómeno da supercondutividade foi observado pela primeira vez em 1911 pelo físico holandês Kamerlingh Onnes [14]. Usando técnicas de Criogenia, Onnes descobriu surpreendentemente que a resistência elétrica do Mercúrio é nula abaixo da temperatura crítica $T_c = 4.1$ K (-269.1°C), conforme a Fig. 5. A supercondutividade, inicialmente vista como uma curiosidade, começou a atair a atenção da comunidade científica com a sua descoberta em vários elementos metálicos e ligas metálicas (Tab. 1).

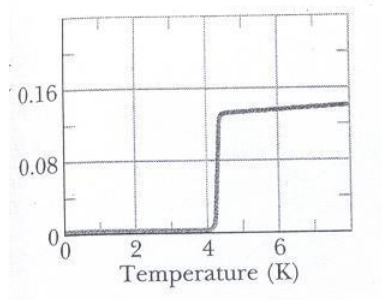


Figura 5: Resistência eléctrica do Mercúrio em função da temperatura.

Elementos	T_c (K)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)
Alumínio	1.8	-271.4
Estanho	3.8	-269.4
Mercúrio	4.1	-269.1
Vanádio	5.4	-267.8
Chumbo	7.2	-266.0
Nióbio	9.3	-263.9
Ligas Metálicas	T_c (K)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)
V_3Si	17.1	-256.1
Nb_3Sn	18.3	-254.9
MgB_2	39.0	-234.2

Tabela 1: Temperaturas críticas de vários elementos e ligas metálicos supercondutores.

A compreensão do mecanismo físico responsável pela supercondutividade de tipo metálico permaneceu um desafio teórico durante várias décadas. Em 1957, o engenheiro electrotécnico norte-americano John Bardeen (o mesmo que fazia parte da equipa que construiu o primeiro transistor) e os físicos norte-americanos Leon Cooper e Robert Schrieffer explicam o fenómeno da supercondutividade nos supercondutores metálicos [15]. A sua teoria, conhecida por Teoria BCS (iniciais dos seus autores), prevê essencialmente um estado superconductor devido ao emparelhamento de electrões nos denominados *pares de Cooper*. Este emparelhamento é devido à *interacção dos electrões com a rede de iões do metal*. Curiosamente, a rede de iões de um material comporta-se como um *obstáculo* à passagem da corrente eléctrica num material eléctrico condutor ou isolador, enquanto a mesma rede de iões é *essencial* para que ocorra supercondutividade.

Os supercondutores metálicos de baixa-temperatura não requerem técnicas de fabrico particularmente sofisticadas, mas requerem temperaturas de funcionamento muitíssimo baixas da ordem de 10 K (-263°C), o que acarreta custos de funcionamento bastante elevados.

3.2 Os Supercondutores Cerâmicos de Alta-Temperatura

Em Janeiro de 1986, os físicos experimentais suíços Alex Müller e Jorg Bednorz da “IBM Zürich Laboratories” (Suíça) observaram que o Cuprato de Lantânio La_2CuO_4 , um material cerâmico *isolador* do ponto de vista eléctrico, quando *dopado* com Bário, $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ (onde x denota a concentração de dopagem), tornava-se *superconductor* à temperatura crítica de $T_c = 39$ K (-234°C) para uma dopagem de $x = 0.2$, descobrindo o primeiro superconductor de alta-temperatura [18].

Após esta descoberta, inúmeros supercondutores cerâmicos de alta-temperatura foram sendo descobertos [19]. A sigla HTS (*High-Temperature Superconductors*) denonima este classe de supercondutores. De referir, que do ponto de vista da rede cristalina estes materiais, *grosso modo*, são constituídos por *planos de Óxido de Cobre*, intercalados com os restantes elementos. Alguns dos marcos mais significativos na história dos

HTS são indicados na Tab. 2.

Data	Supercondutor de Alta-Temperatura	T_c (K)	T_c ($^{\circ}$ C)	Notas
1986	$La_{2-x}Ba_xCuO_4$	39	-234	Primeiro HTS
1987	$YBa_2Cu_3O_7$	93	-180	Primeiro HTS a superar a temperatura de liquefacção do Azoto (77 K)
1988	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$	110	-163	
1993	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$	133	-140	
1995	$Hg_{0.2}Tl_{0.8}Ca_2Ba_2Cu_3O$	139	-134	Actual HTS com T_c mais elevada Atinge $T_c = 158$ K @ 300 000 atm

Tabela 2: Datas da descoberta e respectivas temperaturas críticas de vários supercondutores cerâmicos de alta-temperatura.

Os supercondutores cerâmicos de alta-temperatura requerem temperaturas de funcionamento muito baixas, da ordem de 130 K ($\approx -140^{\circ}$ C), mas relativamente elevadas quando comparadas com os supercondutores metálicos de baixa-temperatura, podendo portanto ser arrefecidos mais eficaz e economicamente. Contudo, apresentam outras dificuldades do ponto de vista tecnológico, tais como, a exigência de técnicas de fabrico de alta-precisão e custos de produção relativamente elevados (ver Fig. 7).

Enquanto que a condução eléctrica nos supercondutores metálicos de baixa-temperatura é tridimensional, movendo-se os electrões por toda a rede, nos supercondutores de alta-temperatura, a condução eléctrica é *bidimensional*, movendo-se os electrões nos planos de Óxido de Cobre, o que faz com que a *interacção coulombiana electrão-electrão* desempenhe um papel preponderante, originando fortes *correlações electrónicas*.

Quase duas décadas após a descoberta dos HTS e de inúmeros trabalhos experimentais e teóricos, presentemente ainda não existe uma teoria bem estabelecida que explique o mecanismo físico responsável pela supercondutividade nos HTS. De facto, este é uns dos grandes desafios que actualmente se coloca à Física da Matéria Condensada, em particular no domínio dos denominados Líquidos Quânticos de Baixa Dimensão.

Relata-se a seguir um facto curioso acerca da descoberta do primeiro HTS. O Professor Solymar Laszlo colocou a seguinte questão ao Professor Alex Müller: “Como é que teve a ideia de que um supercondutor cerâmico tivesse temperaturas críticas tão elevadas?”. Pergunta à qual o Professor Alex Müller respondeu: “Simples...”, mostrando de seguida o diagrama da Fig.6 e prosseguiu dizendo: “...a linha a ponteadado das temperaturas críticas máximas em função do tempo para supercondutores metálicos intersecta a linha extrapolada para os supercondutores cerâmicos em 1986. Estavámos ‘obrigados’ a ser bem sucedidos.” [11].

4 Aplicações dos Supercondutores

De entre as aplicações actualmente em funcionamento dos supercondutores podemos destacar as aplicações médicas em MRI (*Magnetic Resonance Imaging*), permitindo o diagnóstico médico de imagens de órgãos internos sem necessidade de cirurgias invasivas (actualmente fabricados com supercondutores de baixa-temperatura, serão mais pequenos e menos caros, quando fabricados com supercondutores de alta-temperatura), as aplicações em magnetómetros de grande precisão e magnetes industriais. De seguida, serão referidas algumas das aplicações-protótipo actuais usando supercondutores de alta-temperatura: o fabrico de filmes finos, fios e cabos eléctricos para transmissão de energia eléctrica, bobines para produção de campos magnéticos, geradores eléctricos, transformadores de corrente eléctrica, controladores de corrente e armazenamento de energia em Sistemas Volante (*Flywheel Systems*). Estas aplicações, se forem bem sucedidas, terão grande impacto no processo de produção, transmissão, armazenamento e utilização da energia eléctrica, bem como no campo da Micro-Electrónica, permitindo, por exemplo, o fabrico de computadores mais pequenos e mais rápidos [20].

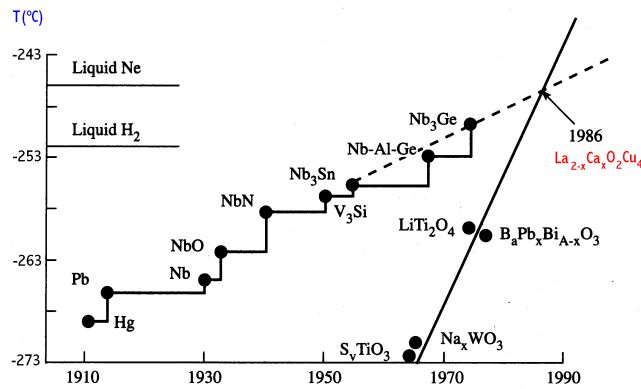


Figura 6: “Diagrama de Alex Müller”.

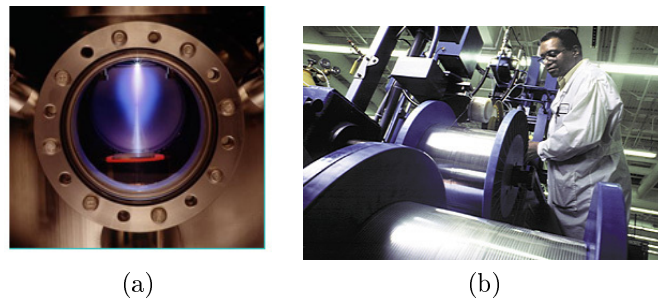


Figura 7: (a) Crescimento de um filme supercondutor numa câmara de deposição de laser pulsado; (b) Equipamento para o fabrico de fios supercondutores de alta-temperatura, com comprimentos da ordem de quilómetros.

São também de salientar as possibilidades de aplicação a sistemas de suspensão e a motores. Suspensões sem atrito são feitas usando a interacção entre um fluxo magnético produzido externamente e a corrente que flui num supercondutor. Quando o supercondutor é pressionado para baixo, tenta expelir o campo magnético, o fluxo magnético fica então comprimido e a força de repulsão é amplificada. Quanto aos motores, é possível comunicar uma rotação de alta velocidade a um supercondutor suspenso e fazer com que todos os condutores num motor não sintam qualquer atrito, aproximando-nos de um motor de eficiência máxima [11].

Das aplicações-protótipo actuais que dizem respeito, em particular, ao domínio dos transportes, apresenta-se o comboio Maglev, provavelmente a aplicação mais apelativa para o grande público. Os comboios Maglev usam magnetes supercondutores e flutuam no ar devido ao efeito de levitação magnética. O caminho-guia do comboio possui instaladas nas suas paredes laterais bobinas supercondutoras (magnetes supercondutores) gerando um campo magnético que fazem o comboio levitar, uma vez que este está equipado com supercondutores a bordo (ver Fig. 8). Este projecto está em desenvolvimento no Japão há cerca de três décadas. A linha de testes do “Center of the Yamanashi Maglev” (Japão) possui 42.8 km de comprimento. Em Dezembro de 2003, a distância acumulada percorrida pelo diferentes protótipos MagLev atingiu os 300 000 km, o número de passageiros em viagens experimentais atingiu as 50 000 pessoas, a maior distância percorrida num dia atingiu os 2.876 km e o protótipo MLX01 atingiu a velocidade de 584 km/h [21].

Estas são apenas algumas das múltiplas aplicações actuais e potenciais para os supercondutores. A investigação e desenvolvimento em supercondutores trar-nos-á certamente mais aplicações para estes materiais que *transportam electricidade sem perdas*.

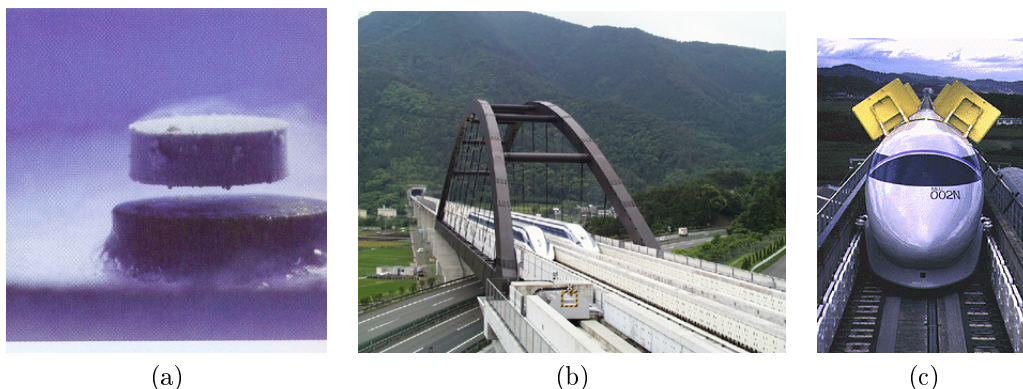


Figura 8: (a) Supercondutor em levitação devido ao Efeito de Meissner; (b) Comboios Maglev na linha de testes do “Center of the Yamanashi Maglev” (Japão); (c) Travões aerodinâmicos do protótipo Maglev MLU002N.

5 O Futuro dos Supercondutores

Se existe algo que os cientistas não apreciam fazer é precisamente especular acerca do futuro. Será que um dia os supercondutores terão aplicações na nossa vida quotidiana? Consideremos de novo os exemplos apresentadas na Secção de Introdução. Será que em 1830 os pioneiros da investigação em semicondutores poderiam imaginar todos os dispositivos digitais (computadores, CDs, DVDs, telemóveis, scanners, fotocopiadoras, etc.) que nos são actualmente tão familiares? Será que Bardeen, Brattain e Schockley em 1947, ao olharem para o seu transistor com 10 cm de altura e dissipando uma potência apreciável, poderiam imaginar que um dia um simples *chip* conteria cerca de uma dezena de milhões de transistores? Será que Townes, Schawlow, Collins ou Maiman imaginariam as aplicações actuais dos lasers? As histórias anteriores mostram-nos que os cientistas de certo modo já “vivem no futuro”. Será pois muito abusivo imaginar que os supercondutores terão um dia aplicações na vida quotidiana?

Ocorrem-nos algumas aplicações no domínio dos transportes. Primeira, os actuais automóveis de motor de combustão interna, para além de recorrerem cada vez mais à Electrónica, evoluem actualmente para os dispositivos electromecânicos em substituição dos hidromecânicos. O conceito inerente aos sistemas de controlo de alimentação *Fly-by-Wire* ou ao sistema de travagem *Brake-by-Wire*, está e será certamente aplicado aos outros sistemas do automóvel, tais como, a direcção, a transmissão, a embraiagem, a suspensão, etc., conduzindo-nos ao que se poderia denominar por *Car-by-Wire*. O uso de supercondutores nestes sistemas teria enormes vantagens de eficiência e de economia. Segunda, actualmente os motores eléctricos, em particular os baseados em células de combustível, são objecto de estudo e desenvolvimento por parte da indústria automóvel tendo em vista o seu uso nos automóveis eléctricos, a fim de que estes sejam uma alternativa realista ao automóvel tradicional de motor de combustão interna. Um motor eléctrico usando supercondutores traria com certeza uma revolução na indústria automóvel. Por último, uma outra aplicação, digamos, mais imaginativa, seria a do conceito usado nos comboios Maglev ser aplicado aos nossos automóveis e teríamos então automóveis levitando nas nossas estradas.

Dos vários obstáculos à implementação tecnológica dos supercondutores, um dos maiores é seguramente a temperatura extremamente baixa a que estes materiais operam.

Como elevar a temperatura crítica dos supercondutores à temperatura ambiente? A descoberta no campo da Física Teórica do mecanismo físico responsável pela supercondutividade dos compostos cerâmicos (e também dos supercondutores orgânicos) seria muito provavelmente o fulcro para descobrirmos qual o caminho (ou não) a seguir de modo a sintetizar materiais supercondutores à temperatura ambiente. O desafio também pode ser posto ao contrário, i.e., desenvolver técnicas de Criogenia que permitam o uso generalizado dos actuais materiais supercondutores, se bem que aqui os obstáculos nos pareçam muito

maiores. A descoberta de supercondutividade à temperatura ambiente revolucionaria o nosso modo de produção, transporte e utilização da electricidade, as nossas tecnologias médicas e de transporte, etc.. E como seria o nosso Mundo se existissem supercondutores à temperatura ambiente? Deixamos ao leitor este exercício de imaginação.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Álvaro Costa o facto de me ter encorajado a pensar no tema desenvolvido neste texto e pelo convite que me dirigiu para apresentá-lo, bem como ao “Museu dos Transportes e Comunicações” do Porto. Gostaria também de agradecer a Paulo Andrade pelo apoio constante e pelos seus comentários e sugestões.

Alguns Dados Biográficos

[Nome]: [nascimento-falecimento], [país de nascimento], [formação], [prémio Nobel]

Christiaan Huygens: 1629-1695, Holanda, Matemático e Físico, -.
Thomas Young: 1773-1829, Inglaterra, Médico e Filósofo Natural, -.
Henri Becquerel: 1852-1908, França, Físico, Nobel 1903.
Albert Einstein: 1879-1955, Alemanha, Físico, Nobel 1921.
Dennis Gabor: 1900-1979, Hungria, Engenheiro Electrotécnico, Nobel 1971.
Charles Townes: 1915-, E.U.A., Físico, Nobel 1964.
Arthur Schawlow: 1921-1999, E.U.A., Físico, Nobel 1981.
Theodore Maiman: 1927-, E.U.A., Engenheiro Físico, -.
Ferdinand Braun: 1850-1918, Alemanha, Físico, Nobel 1909.
John Bardeen: 1908-1991, E.U.A., Engenheiro Electrotécnico, Nobel 1956 e 1972.
Walter Brattain: 1902-1987, China, Físico, Nobel 1956.
William Shockley: 1910-1989, E.U.A., Físico, Nobel 1956.
Lee de Forest: 1873-1961, E.U.A., Físico, -.
Kamerlingh Onnes: 1853-1926, Holanda, Físico, Nobel 1913.
Leon Cooper: 1930-, E.U.A., Físico, Nobel 1972.
Robert Schrieffer: 1931-, E.U.A., Físico, Nobel 1972.
Alex Müller: 1927-, Suíça, Físico, Nobel 1987.
Jorg Bednorz: 1950-, Suíça, Físico, Nobel 1987.

Referências

- [1] D. Gabor, “A New Microscopic Principles”, *Nature*, **161**, No. 4098, 777-778 (1948).
- [2] D. Gabor, “Microscopy by Reconstructed Wavefronts”, *Proc. Roy. Soc. (London)*, **A197**, 454-487 (1949).
D. Gabor, “Microscopy by Reconstructed Wavefronts: II” , *Proc. Phys. Soc. (London)*, **64** (Pt. 6), No. 378 B, 449-469 (1951).
- [3] Ver *Nobel Lecture* de D. Gabor (<http://nobelprize.org/physics/laureates/1971/gabor-lecture.html>).
- [4] Ver *Nobel Lecture* de C.H. Townes (<http://nobelprize.org/physics/laureates/1964/townes-lecture.html>).
- [5] C.H. Townes, *J. Inst. Elec. Commun. Eng. (Japan)*, **36**, 650 (1953).
- [6] A. Einstein, “Zur Quantentheorie der Strahlung”, *Physika Zeitschrift*, **18**, 121-128 (1917).

- [7] C.H. Townes and A.L. Schawlow, *Physical Review*, **112**, No. 6, 1940-1949 (1958).
- [8] R.J. Collins, D.F. Nelson, A.L. Schawlow, W. Bond, C.G.B. Garrett and W. Kaiser, *Phys. Rev. Lett.*, **5**, 303 (1960).
- [9] T.H. Maiman, R.H. Hoskins, I.J. D’Haenens, C.K. Asawa and V. Evtuhov, *Phys. Rev.*, **123**, 1151 (1961).
- [10] N.W. Ashcroft and N. D. Mermin, *Solid State Physics* (International Edition, Saunders College Publishing, 1976).
- [11] L. Solymar and D. Walsh, *Electrical Properties of Materials* (6th. Edition, Oxford University Press, 1998).
- [12] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (6th. Edition, John Wiley & Sons, 1986)
- [13] R. Turton, *The Physics of Solids* (Oxford University Press, 2000).
- [14] H. Kamerlingh Onnes, *Akad. van Wetenschappen (Amsterdam)* **14**, 113 (1911).
- [15] J. Bardeen, L.N. Cooper, and J.R. Schrieffer, *Phys. Rev.* **106**, 162 (1957); *ibidem* **108**, 1175 (1957).
- [16] P.G. de Gennes, *Superconductivity of Metals and Alloys* (W.A. Benjamin Inc., New York, 1966).
- [17] J.-P. Burger, *La Supraconductivité des Métaux, des Alliages et des Films Minces* (Masson et Cie. Editeurs, Paris, 1974).
- [18] J.G. Bednorz and K. A. Müller, *Z. Phys. B* **64**, 189 (1986).
- [19] R.J. Cava, “Superconductors Beyond 1-2-3”, *Scientific American* (October 1990).
- [20] Ver, e.g., os seguintes sites:
<http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Physics/SolidStatePhysics/Superconductivity/Applications/Applications.htm>;
<http://www.eere.energy.gov/power/success-stories/supercon.html>;
<http://www.nrel.gov/basic-sciences/supercon.html>;
<http://www.chuden.co.jp/english/corporation/press/pre2000/pre0711.html>.
- [21] http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev_frame_E.html.

Créditos Fotográficos:

Figuras: 1(a) Alexander Tsiaras; 1(b) STE, Roma; 1(c) Bramaz; 2 Bell Labs; 3(a)(b) Peter Ramiz e MESH; 3(c) Manfred Cage; 4(a) A. Leitner; 4(b) Renselaer Polytechnic Institute; 4(c) Palmer/Kane,Inc./CORBIS; 6 L. Solymar; 7(a) NREL’s Center for Basic Sciences. 7(b) U.S. Department of Energy (SPI); 8(a) Palmer/Kane,Inc./CORBIS; 8(b)(c) Railway Technical Research Institute (Japan).