

metalurgia de materiais refractários e de extrema pureza; uma grande planta piloto encontra-se em funcionamento em Mont-Louis (França).

Em face dos exemplos enunciados conclui-se que a energia solar poderá desempenhar um papel relevante no desenvolvimento das regiões tropicais onde se encontra maior grau de insolação e grande disseminação de populações de economia basicamente agro-pecuária. Assinale-se, ainda, que as energias solar e

hídrica se encontram, em termos gerais, geograficamente associadas o que, aliás, tem fundamento geofísico facilmente compreensível. Em regiões de clima temperado-mediterrânico podem esses dois fluxos energéticos naturais considerar-se de algum modo complementares: o verão é seco e insolado ao passo que o inverno é nublado e chuvoso; esta circunstância poderia ser vantajosamente explorada para a produção industrial de energia eléctrica.

A supercondutividade e o confinamento de plasmas

por J. F. M. AZEVEDO E SILVA

(Laboratório de Física da Faculdade de Ciências de Lisboa)

1. Introdução

O objectivo deste artigo é chamar a atenção para alguns aspectos das aplicações dos magnetes supercondutores quando se trate da produção de campos magnéticos intensos e, principalmente, quanto às possibilidades dessas aplicações no confinamento de plasmas. Para isso relembra-se previamente o que se considera necessário sobre supercondutividade e confinamento de plasmas.

Finalmente, aproveita-se para salientar (embora a esse respeito se não faça referência especial no texto) um aspecto curioso do assunto que é o facto de as técnicas das baixas temperaturas poderem, eventualmente, ser utilizadas para resolver problemas da física dos plasmas que envolvem, muitas vezes, temperaturas cinéticas da ordem dos milhões de graus Kelvin.

2. Supercondutividade

Denomina-se supercondutividade a propriedade que algumas substâncias podem apresentar quando a sua temperatura desce abaixo duma determinada temperatura crítica, T_c , (característica da substância e normalmente inferior a 18°K) e que consiste, aparte outros efeitos que não nos vão interessar, no facto de a sua resistência óhmica ser praticamente nula. Designaremos tais substâncias por supercondutores, quer estejam ou não abaixo da temperatura crítica.

A temperatura à qual se dá a transição para a fase supercondutora depende (para determinado material) da pressão e do campo magnético exterior sendo, na ausência de qualquer campo magnético exterior, igual a T_c . Se, pelo contrário, o supercondutor se encontra mergulhado num campo exterior, que pode ser criado

pela própria corrente que o percorre, a temperatura de transição diminui à medida que aumenta a intensidade do campo. Quando essa intensidade ultrapassa um certo valor crítico o supercondutor passa ao estado normal. O valor crítico do campo, H_c , é portanto função da temperatura sendo $H_c = 0$ para $T > T_c$; a forma da curva $H_c = H_c(T)$ depende do supercondutor e o valor de H_c para $T = 0^\circ\text{K}$, que se obtém por extrapolação, (e que se pode designar por H_c^0), é também uma sua característica.

É usual dividirem-se os supercondutores em dois tipos: tipo I e tipo II. No que respeita aos do tipo I, o seu baixo valor de H_c^0 torna-os de pouca utilidade na produção de campos magnéticos elevados, pelo que não os consideraremos aqui. Os supercondutores do tipo II apresentam um intervalo de transição (para uma dada temperatura $T < T_c$) entre dois valores críticos do campo exterior, H_{c1} e $H_{c2} > H_{c1}$, comportando-se nesse intervalo como se fossem constituídos por regiões supercondutoras impregnadas no material no estado normal. Para valores do campo exterior mais elevados que o limite superior, H_{c2} , desse intervalo, todo o material está no estado normal. Ora esse valor, H_{c2} , ao qual se acaba de dar a transição para o estado normal, é consideravelmente maior que o correspondente valor para os supercondutores do tipo I, e daí o maior interesse dos primeiros na produção de altos campos magnéticos.

Outra característica dos supercondutores do tipo II que se reveste de particular interesse para as presentes considerações é a sua capacidade de transporte de elevadas densidades de corrente, sem passar ao estado normal.

Por fim, salienta-se que estes supercondutores são geralmente ligas de elementos metálicos, ligas essas que no estado normal possuem resistências óhmi-

cas muito grandes, o que pode constituir um grave problema na construção de ímãs supercondutores, ou superímãs, como os designaremos daqui em diante.

A tabela I e a figura 1 permitem ilustrar algumas das principais diferenças entre os dois tipos de supercondutores.

TABELA I*

MATERIAL	H_c (kgauss) [†] (a $4,2^\circ\text{K}$)	T_c ($^\circ\text{K}$)	Densidades críticas de corrente (A.cm ⁻² a $4,2^\circ\text{K}$ e 50 kgauss)
Sn (Tipo I)	—	3,8	—
Nb (Tipo I)	1	9,2	—
Nb Zr (Tipo II)	80	11	2×10^5
Nb Ti (Tipo II)	120	9,5	2×10^5
Nb ₃ Sn (Tipo II)	220	18,5	10^6

(*) Todos os valores tabelados são aproximados.

(†) Para os supercondutores do tipo II o valor tabelado é o de H_{c2} .

3. Confinamento de plasmas

O termo plasma é habitualmente usado para designar um gás completa ou parcialmente ionizado. Um plasma é portanto composto, fundamentalmente, de iões e electrões. Cerca de 99% da matéria que constitui o Universo existe no estado de plasma, pelo que os três estados convencionais (sólido, líquido e gasoso não ionizado) não passam, na realidade, de estados muitíssimo raros quando considerados à escala universal.

Uma das principais razões do interesse pela investigação no domínio da física dos plasmas é a procura de uma forma

rentável de obter energia através da fusão termonuclear controlada.

Os problemas que se põem no estudo dos plasmas são muitos e variados, sendo o problema do confinamento um dos mais importantes, visto que para certas utilizações práticas a sua temperatura deverá ser da ordem dos milhões (ou bilhões) de graus Kelvin.

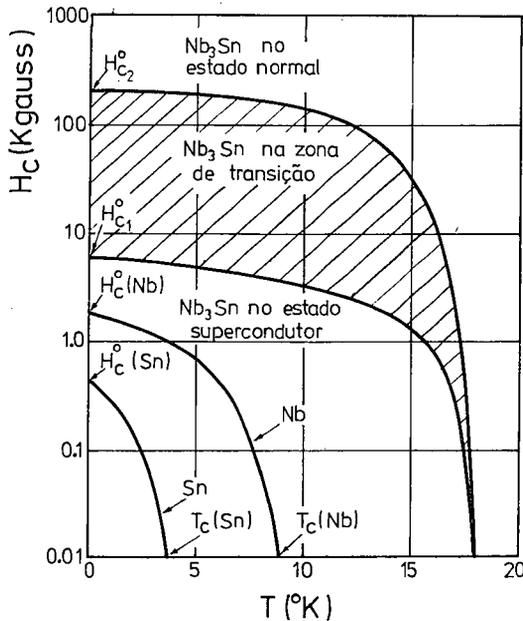


Fig. 1 — Campos críticos em função da temperatura para um supercondutor do tipo II (Nb_3Sn) e para os dois supercondutores do tipo I que entram na sua composição (Nb e Sn).

A realização de paredes materiais para confinar um plasma a tais temperaturas é evidentemente impensável, uma vez que o intervalo de tempo necessário para que *todas* as suas partículas constituintes entrem em colisão com as referidas paredes — aí perdendo a sua energia — é extraordinariamente curto. O plasma arrefeceria portanto instantaneamente sem ser possível a sua utilização ou, sequer, o seu estudo. O confinamento deverá ser então realizado à custa de paredes não materiais, que reflectam as partículas

sem lhes absorver a energia; o facto de o plasma ser constituído por partículas carregadas sugere o emprego de campos magnéticos para tal fim, que é na realidade a solução adoptada na maioria dos casos (1).

Os tipos de confinamento magnético são vários, mas em todos eles os campos envolvidos são bastante elevados. Embora muitos dos problemas do confinamento magnético (entre os quais os referentes à estabilidade do plasma confinado) não estejam ainda totalmente resolvidos (especialmente quando se trata de plasmas de fusão) tem sido possível construir e fazer funcionar várias máquinas para investigação, que utilizam esse tipo de confinamento. As geometrias que se têm estudado são muito diversas, embora aqui apenas sejam referidas duas: a geometria toroidal porque se prevê actualmente que será, pelo menos em princípio, a mais susceptível de poder ser utilizada nos futuros reactores de fusão, e a geometria dita de «espelho magnético» por ser aquela que ilustrará, na secção seguinte, o uso de supermagnetes na produção do campo.

O confinamento toroidal consiste, basicamente, em manter o plasma no interior dum toro em torno do qual estão os enrolamentos que criam o campo magnético.

No confinamento do tipo «espelho magnético» (Fig. 2), o plasma é mantido na região central dum tubo cilíndrico, em cujas extremidades existem duas bobinas percorridas por correntes com o mesmo sentido. O campo assim criado é, portanto, mais elevado nas extremidades do tubo do que na região intermédia, pelo que as partículas carregadas do plasma

(1) Outros tipos de confinamento não envolvendo campos magnéticos têm sido estudados. Um deles é o confinamento electrostático por inércia que apenas envolve campos electrostáticos.

são sucessivamente reflectidas nessas regiões de campo mais intenso (que são os espelhos magnéticos propriamente ditos) obtendo-se deste modo a retenção de todo o plasma na zona central do tubo.

Note-se mais uma vez que estas geometrias, como aliás todas as outras estudadas até agora, são fonte de instabilidades que limitam o tempo de vida útil

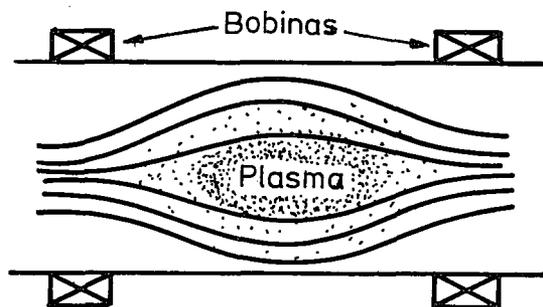


Fig. 2 — Confinamento de um plasma num «espelho magnético».

do plasma. No entanto é possível actualmente controlar parte dessas instabilidades de modo a poder estudar, com certo detalhe, alguns plasmas de interesse científico e prático.

4. A construção e o uso de supermagnetes. Um exemplo: o confinamento de um plasma numa máquina do tipo «espelho magnético»

A necessidade cada vez mais frequente do emprego de elevados campos magnéticos em determinados domínios de investigação levou a pensar-se na utilização dos supercondutores do tipo II para os produzir, dado que a sua produção pelos métodos clássicos levanta várias dificuldades de ordem prática e económica. Uma delas é a exigência de potências de alimentação proibitivas, em grande parte

devido às perdas por efeito Joule; essa energia dissipada exige, por sua vez, um complicado sistema de arrefecimento das bobinas. Os valores dos campos magnéticos atingíveis economicamente pelos métodos clássicos são, por consequência, relativamente modestos.

Um dos primeiros supermagnetes a ser experimentado no laboratório foi construído usando uma liga de nióbio e estanho (Nb_3Sn) e deitando mão a uma técnica de fabrico razoavelmente sofisticada. A partir daí, no entanto, os progressos na produção de pequenos supermagnetes capazes de criar campos intensos, embora de reduzido volume (alguns cm^3), foram rápidos, sendo já relativamente fácil encontrá-los no mercado especializado.

A construção e o uso de supermagnetes de maiores dimensões põe, em contrapartida, alguns problemas de desenho e de segurança, além, é claro, do problema económico proveniente do aumento substancial do material supercondutor necessário. No que respeita à segurança de operação, basta notar que enquanto numa pequena bobina a energia armazenada no campo magnético raramente excede algumas dezenas ou centenas de joule, nos grandes supermagnetes essa energia pode ser da ordem dos 10^7 - 10^9 joule, sendo por isso necessária a existência dum sistema capaz de controlar, ou evitar, a sua dissipação no caso de alguma região do material supercondutor passar subitamente ao estado normal⁽²⁾, e isto pela seguinte razão: conforme já foi referido anteriormente, os bons supercondutores têm, em geral, uma resistência óhmica elevada no estado normal; portanto a transição dum pequena porção do material para esse estado, dá origem (além

(2) A passagem súbita ao estado normal dum determinada região pode ter diversas causas, às quais não nos referiremos.

duma grande libertação de calor por efeito Joule) a uma brusca variação da corrente a qual induz uma tensão cujo valor pode ser suficientemente alto para causar um arco, levando à destruição do supermagnete.

Este problema pode ser evitado providenciando um caminho alternativo para a corrente no caso duma tal ocorrência. No que respeita apenas à construção e desenho dos supermagnetes, a solução actual é usar um grande número de filamentos de supercondutor (geralmente NbTi) de pequeno diâmetro (cerca de 5×10^{-2} mm) embebidos numa matriz de cobre que fornece o referido caminho⁽³⁾.

Nota-se finalmente que a necessidade de manter a temperatura dos supermagnetes abaixo do valor crítico para o material que os constitui, obriga ao emprego de hélio líquido na refrigeração com os problemas adicionais que daí advêm. No entanto, as vantagens da sua utilização em algumas aplicações começam hoje em dia a sobrepôr-se de maneira decisiva às suas desvantagens, como se pode ver através do exemplo que se segue.

J. Reece Roth e colaboradores [1], construíram, sob o patrocínio da NASA, uma máquina do tipo «espelho magnético» com as características principais seguintes:

O campo magnético é criado por meio de duas bobinas supercondutoras, cada uma das quais com 19 cm de diâmetro interno e 32 cm de diâmetro externo. Cada bobina é constituída por um enrolamento de Nb(25%)Zr, com cerca de 26 km de comprimento e 0,25 mm de diâmetro, revestido por uma camada de cobre de 0,025 mm de espessura, e ainda por uma camada de substância isoladora.

Note-se que estes enrolamentos (construídos em 1965), embora capazes de suportar densidades de corrente da ordem dos 5×10^4 A.cm⁻², não são do tipo

multifilar conforme a tendência actual⁽⁴⁾.

A densidade operacional de corrente nas bobinas foi fixada em 3×10^4 A.cm⁻² sendo o valor máximo da intensidade do campo, com as bobinas ligadas em série, de 20 kgauss aproximadamente (Fig. 3).

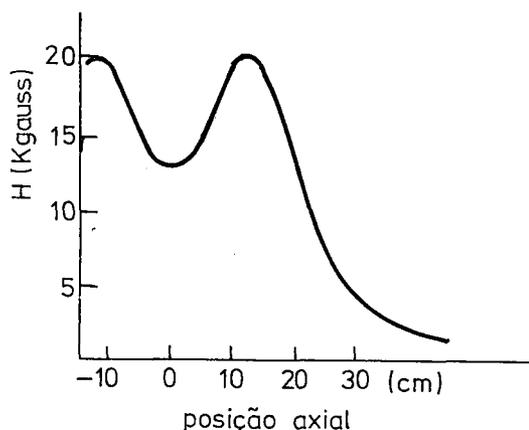


Fig. 3 — Distribuição dos valores do campo com as duas bobinas ligadas em série e à distância de 26,2 cm uma da outra. Em abcissas estão as distâncias ao centro do eixo comum das duas bobinas.

A energia máxima armazenada no campo magnético é da ordem dos 5×10^4 joule. O arrefecimento das bobinas é conseguido

⁽³⁾ Esta solução tem também a vantagem de eliminar uma das causas da transição ao estado normal. O limite superior das densidades de corrente em condutores deste género situa-se, actualmente, pelos 2×10^4 A.cm⁻². Pode estranhar-se o facto de este limite ser inferior por um factor de 10 aos valores das densidades críticas de corrente dados pela tabela I. Isto é devido às grandes quantidades de cobre que se tornariam necessárias na construção de grandes supermagnetes, se se pretendesse atingir densidades de corrente da ordem das tabeladas.

⁽⁴⁾ A razão do abandono dos condutores deste tipo em favor dos condutores multifilamentares é devida a várias desvantagens dos primeiros, entre as quais as duas seguintes: o seu desenho óptimo é diferente dumas bobinas para as outras; é difícil variar rapidamente o campo sem causar a libertação de grandes quantidades de calor.

utilizando «dewars» (contendo hélio líquido) especialmente concebidos para o efeito.

O conjunto (bobinas e «dewars») está dentro de um recipiente de forma cilíndrica com 0,92 m de diâmetro e 1,83 m de comprimento onde se faz o vácuo por meio de uma bomba de difusão com a velocidade efectiva operacional de 1000 l.s^{-1} . O «backing» é feito por uma rotativa de 20 l.s^{-1} . A pressão limite atingível com todo o sistema à temperatura ambiente é de 2×10^{-6} torr.

Passamos agora às vantagens deste sistema de confinamento em relação a outros do mesmo género que são, entre outras, as seguintes:

a) Grande volume experimental útil (cerca de 5000 cm^3) o que contribui para um melhor acesso visual e instrumental à região onde está confinado o plasma. (Nos sistemas convencionais, o recipiente de vácuo tem de ser colocado no interior das bobinas que criam o campo, perdendo-se deste modo uma grande quantidade de volume útil).

b) A potência de alimentação necessária para criar o campo é muitíssimo menor do que nos sistemas convencionais (onde pode atingir valores da ordem dos megawatts).

No caso dos supermagnetes, a existência de um dispositivo que curto-circuite as bobinas uma vez atingido o valor desejado do campo, permite que a fonte de alimentação possa ser retirada (deixando, portanto, de haver consumo de energia) mantendo-se constante esse valor enquanto, evidentemente, a temperatura se mantiver dentro dos limites de funcionamento da máquina.

c) A criobombagem que se obtém através das superfícies dos «dewars» expostas ao vácuo dá origem a um decréscimo da pressão final por um factor de 10^{-2} .

d) Finalmente, mas não menos importante, o custo total deste sistema de supermagnetes é menos de metade do de um sistema convencional com as mesmas características aproximadas. Deve notar-se que o elevado custo dos sistemas convencionais é, na sua maior parte, devido às grandes potências de alimentação necessárias.

Quanto à segurança de operação dos supermagnetes neste confinamento pode dizer-se que uma transição brusca ao estado normal, com a consequente dissipação de energia, causa, na pior das hipóteses, a vaporização de todo o hélio líquido contido nos «dewars» e o aquecimento dos enrolamentos até uma temperatura que não excede os 25°K , não exigindo, por conseguinte, precauções especiais.

5. Nota final

Não deixa de ser interessante considerar a hipótese do possível emprego de supermagnetes no confinamento do plasma nos futuros reactores de fusão termonuclear. Até agora, no entanto, pouco se estudou nesse sentido dado que existem ainda muitos outros delicados problemas a resolver antes que um protótipo dum reactor possa ser construído, sendo um dos principais o alcance dos tempos de confinamento do plasma necessários para o seu efectivo funcionamento.

A título de curiosidade dão-se alguns números acerca deste assunto.

A temperatura dos plasmas de fusão situa-se por volta dos $10^8 - 10^9^\circ\text{K}$; o plasma tem de ser mantido a esta temperatura durante um intervalo de tempo que é dado pelo critério de Lawson:

$$n\tau > 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$$

em que n é a densidade do plasma (número de partículas por unidade de volume).

Ora os valores de n não excedem os 10^{14} (densidade inferior por um factor de 10^6 à densidade do ar a P. T. N.), o que dá para τ o seguinte limite inferior aproximado:

$$\tau > 1 \text{ s.}$$

Até agora os melhores valores que se conseguiram experimentalmente são da

ordem dos 10^{-2} s estando-se, portanto, ainda abaixo do limite de Lawson por um factor de, pelo menos, 10^2 .

A geometria do confinamento será provavelmente toroidal, havendo já algum trabalho teórico (bastante recente) em que é encarado o uso de supermagnetes na produção do campo magnético, numa tal geometria.

[1] J. REECE ROTH, Rev. Sci. Inst. 36 n.º 10 (1965) p. 1481-1485.

Problema estatístico associado à detecção de radiações Referência à radiação X e gama

por DIRCE MILHEIRO CALDAS GUIMARÃES

(Equiparada a bolsreira no País. Bolsreira do I. A. C.)

A detecção de radiação X, bem como de radiações de origem nuclear, tem como fundamento a interacção da radiação com a matéria.

Actualmente, a espectrometria de raios X e a de raios gama assenta quase inteiramente em duas espécies de sistemas detectores — os detectores de cintilação e os detectores de semiconductor.

Faz-se a seguir uma breve referência a cada um destes tipos de detectores para se verificar que dão origem a perturbações aleatórias — a somar a uma grandeza a medir que por si apresenta já uma distribuição estatística e não um valor bem determinado.

Por último indica-se o modo de corrigir a perturbação introduzida pelo detector nos resultados experimentais.

1. Detectores de cintilação

Os raios X, ou os raios gama, na passagem através do meio material que constitui essencialmente o detector, trans-

ferem parte ou toda a sua energia para electrões (por efeito fotoeléctrico ou por efeito Compton). Por sua vez, estes electrões dissipam a sua energia por excitação de átomos ou moléculas do meio. Designa-se por cintilador o meio material em que se dá esta interacção; pelo facto de ser luminescente, ele é também muitas vezes denominado «phosphor», visto se dar emissão de radiação electromagnética no processo de retorno de moléculas ou átomos às condições iniciais, após terem sofrido excitação.

Os fotões assim produzidos vão incidir num cátodo fotossensível que faz parte de um fotomultiplicador.

Este dispositivo é constituído por dois sistemas electrónicos montados na mesma unidade: (a) o referido cátodo fotossensível que converte os fotões em fotoelectrões; (b) um tubo multiplicador onde o número de electrões é repetidamente multiplicado por emissão secundária a partir de eléctrodos que se denominam dínodos. Dez a catorze dínodos sucessivos