

DESMAGNETIZAÇÃO ADIABÁTICA

A temperatura mais baixa que normalmente se consegue pela redução de pressão sobre a superfície de He^4 é cerca de 0,7 K. Uma técnica muito empregada para se obter temperaturas muito mais baixas que essa é conhecida como *desmagnetização adiabática*. Esse método tem por base o *efeito magnetocalórico* que consiste na variação de entropia de certas substâncias paramagnéticas e magnéticas pela aplicação de um campo magnético.

A Fig. 1 ilustra a entropia de um sal paramagnético em função da temperatura. Como mostra a curva S_0 , na ausência de um campo magnético, a entropia permanece em valores relativamente altos tendendo para zero à medida que a temperatura decresce. Um campo magnético aplicado ao sal, entretanto, induz ordem, isto é, reduz a entropia, e a nova curva para um campo magnético constante é a curva S_H . Essa indução de ordem consiste num alinhamento parcial dos momentos magnéticos de certos átomos na estrutura cristalina do sal. Em realidade, o processo que estamos considerando – o de desmagnetização adiabática – é precisamente análogo ao da expansão adiabática de um gás, em que a coordenada termodinâmica correspondente à grandeza *magnetização do material* é o volume.

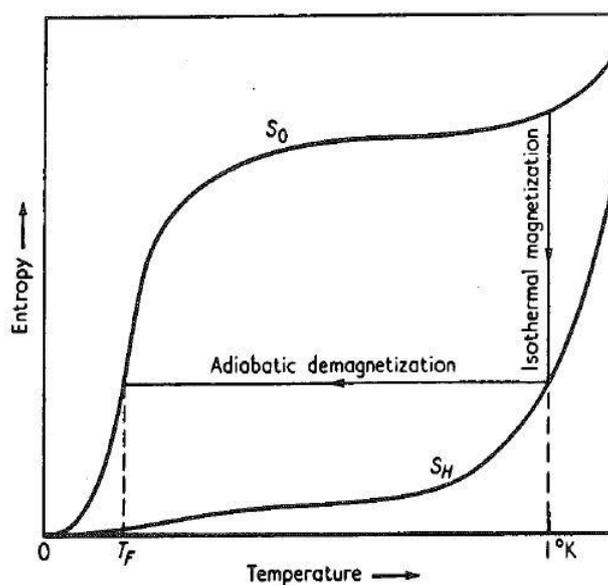


Figura 1. Entropia de um sal paramagnético sem campo magnético aplicado (curva S_0) e com campo aplicado (curva S_H).

As curvas da Fig. 1, portanto, sugerem um meio de baixar a temperatura de uma substância. A Fig. 2 ilustra um criostato em cujo interior existe uma câmara com uma certa quantidade de sal paramagnético em bom contato térmico com a amostra a ser refrigerada. O conjunto é preso a um suporte de baixa condutividade térmica. O espaço no entorno do sal pode ser preenchido com hélio gasoso em baixa temperatura ou então evacuado. A câmara que contém a amostra encontra-se num banho de hélio líquido mantido a cerca de 1 K pelo método da redução de pressão na sua superfície. O criostato é colocado entre os polos de um eletroímã e a sequência das seguintes operações produz a refrigeração.

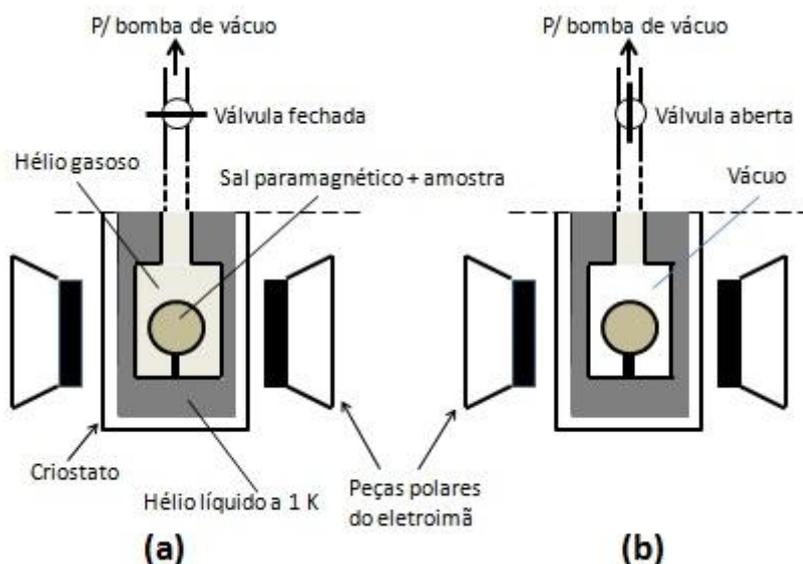


Figura 2. Dois estágios em sequência do processo de desmagnetização adiabática. (a) Campo é aplicado, o conjunto sal + amostra aquece mas volta à temperatura de 1 K pela troca térmica com o hélio líquido possibilitada pelo hélio gasoso. (b) A câmara central é evacuada, o campo é removido, e a temperatura do conjunto cai para valores bem menores que 1 K.

Com gás hélio na câmara central para produzir bom contato térmico entre o sal paramagnético e o banho de hélio líquido circundante, o campo magnético é acionado, magnetizando o sal. Como isso sua entropia é reduzida pelo alinhamento parcial dos íons na rede; calor é liberado no processo. Mas como o gás hélio na câmara central age como um meio de troca térmica, esse calor é absorvido pelo hélio líquido e a magnetização ocorre essencialmente em temperatura constante.

Vácuo é então feito na célula de modo a isolar termicamente o sal do banho de hélio líquido. Finalmente, o eletroímã é desligado, e o conseqüente retorno da desorientação dos momentos magnéticos se faz às expensas da energia da rede cristalina do sal que, juntamente com amostra, perde calor, baixando a temperatura do conjunto.

No gráfico entropia-temperatura da Fig. 1, o processo é representado como um decréscimo isotérmico da entropia pela magnetização a 1 K, seguido da desmagnetização adiabática, resultando na temperatura T_F .

O sucesso do método depende, obviamente, da magnitude do decaimento da entropia do sal paramagnético no intervalo de temperatura desejado e para os campos normalmente aplicados. Chromium potassium alum e iron ammonium alum são dois compostos paramagnéticos para os quais um campo magnético produz um significativo decréscimo de entropia perto de 1 K. Os íons cromo e potássio são os íons magnéticos responsáveis pelo efeito. A estrutura cristalina em cada um desses sais é tal que os íons magnéticos são afastados uns dos outros de forma tal que, acima de 0,1 K, aproximadamente, a interação magnética entre eles é suficientemente fraca para impedir alinhamento espontâneo. Um campo de poucos milhares de Gauss é em geral suficiente para produzir alinhamento e uma redução de entropia significativa. Com um arranjo experimental como o acima descrito, e campos de vários milhares de gauss, é possível alcançar temperaturas mais baixas que 0,01 K.

As equações abaixo^(*) (sistema SI) possibilitam determinar a queda de temperatura da substância no processo de desmagnetização adiabática.

$$T_F^2 = T_I^2 - 2T_I q/c$$

com q definido por

$$q = -\mu_0 C v H^2 / 2T_I$$

onde T_I e T_F são as temperaturas inicial e final da substância, H o campo magnético, C a constante de Curie da substância, v o volume por unidade de massa, c o calor específico e μ_0 a constante de permeabilidade.

O refrigerador magnético

O método de desmagnetização adiabática pode ser assistido por chaves térmicas supercondutoras para produzir um refrigerador de operação contínua para temperaturas abaixo de 1 K. Uma representação esquemática do refrigerador é mostrada na Fig. 3. A massa do sal magnético é colocada entre os pólos de um eletroímã. O sal está em contato térmico com a amostra a ser refrigerada (em baixo), e com um reservatório de hélio líquido (em cima) através de tiras finas de chumbo. A temperatura nas tiras é suficientemente baixa para que o chumbo se torne supercondutor. Próxima a cada uma dessas tiras existem bobinas que, pela passagem de corrente, geram um campo magnético suficientemente alto para que o chumbo faça a transição do estado supercondutor para o normal. Os dois conjuntos de bobinas e tira de chumbo são as chaves térmicas SW1 e SW2 (ver figura). Assim o termo “chave térmica ligada” significa: chumbo está no *estado normal*; “chave térmica desligada” significa: chumbo no *estado supercondutor*.

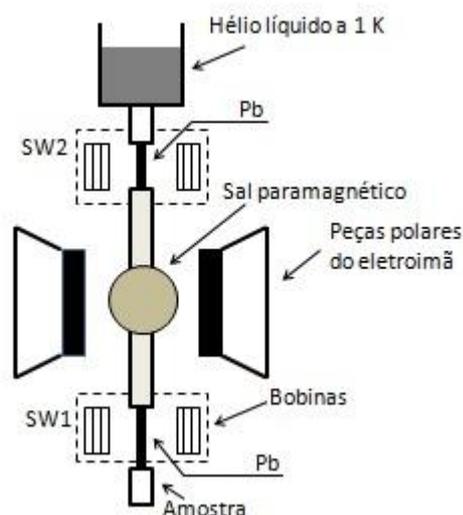


Figura 3. Refrigerador magnético com processo de resfriamento do sal assistido pelas chaves térmicas supercondutoras SW1 e SW2.

Com o aparato resfriado inicialmente a 1 K, a sequência de operação do refrigerador é descrita a seguir. Primeiro a chave SW1 é desligada e SW2 ligada. Nessa condição (normal) SW2 conduz calor centenas de vezes melhor que SW1. O eletroímã entra em funcionamento e a maior parte do calor de magnetização é

(*) – As equações são deduzidas nas páginas 174 – 177 e 181 do livro de F. W. Sears, “An Introduction to Thermodynamics, the Kinetic Theory of Gases, and Statistical Mechanics”, second edition, fifth printing, (Addison-Wesley, 1969).

absorvido pelo hélio do reservatório de cima. As condições das chaves são a seguir invertidas; significa isso que agora SW2 conduz mal o calor e a chave de baixo se torna um bom condutor de calor. O eletroímã é então desligado e, enquanto a temperatura do sal decai, calor é removido da amostra pela tira de chumbo SW1. Para completar o ciclo, as condições das chaves são mais uma vez invertidas; o eletroímã entra em operação e calor é rejeitado em direção ao reservatório superior. O funcionamento de um refrigerador como esse pode ser programado de forma tal que realize a sequência de operações automaticamente, mantendo a amostra numa temperatura de cerca de 0,2 K.

Desmagnetização nuclear

Núcleos atômicos de muitos elementos são suficientemente assimétricos para apresentar momentos magnéticos não desprezíveis, e dessa forma poderem ser manipulados da mesma maneira que os momentos devidos a elétrons. Esse fato sugere que procedimentos envolvendo desmagnetização nuclear possam ser úteis em refrigeração magnética adotando-se a mesma sequência de procedimentos usados na refrigeração magnética de substâncias paramagnéticas.

A importância de se considerar desmagnetização nuclear como uma técnica de refrigeração reside no fato de que, na maioria dos materiais cristalinos, os momentos nucleares não se alinham uns com os outros antes que temperaturas da ordem de micrograus Kelvin sejam alcançadas. Isso seria o grande diferencial em relação ao uso de paramagnetos cujo impedimento no alcance de temperaturas dessa ordem é imposto pelo significativo auto alinhamento dos momentos magnéticos que, já na faixa de centésimos de graus Kelvin, impede variações significativas de entropia.

Entretanto, uma dificuldade em desmagnetização nuclear é o baixo momento do spin nuclear, que é da ordem de um milésimo daqueles dos spins dos sais paramagnéticos. Para alinhar núcleos a 1 K, campos de cerca de 10 milhões de Gauss seriam necessários – longe do que até hoje se consegue. Campos de valores mais razoáveis, entretanto, podem ser empregados se a magnetização for realizada a 0,01 K.

A despeito disso, é com o auxílio da desmagnetização nuclear que se consegue grande aproximação do zero absoluto. Trata-se de uma operação de dois estágios. O primeiro consiste no resfriamento de uma substância adequada por um sal paramagnético conforme anteriormente descrito. Nesse estágio, o conjunto das duas substâncias é levado a cerca de 0,01 K. Enquanto ainda em contato com o sal, a substância é sujeita a um alto campo magnético para alinhar seus núcleos e o calor de magnetização é então absorvido pelo sal que atua como um absorvedor de calor a 0,01 K. Por último o campo é retirado e a desmagnetização adiabática causa uma queda adicional na temperatura devido ao retorno da desorientação dos spins nucleares.

Usando um feixe de fios de cobre finos como o material de desmagnetização nuclear, e campos magnéticos próximos de 6×10^4 gauss, um grupo do Claredon Laboratory, em Oxford, alcançou a temperatura de aproximadamente um milionésimo de grau Kelvin.