

## Capítulo 14

### Superfluidez e Supercondutividade

#### 14.1 Introdução

Supercondutividade e superfluidez fazem parte de uma galeria de fenômenos mais notáveis que são observados na matéria. Substâncias com essas propriedades são capazes de transportar eletricidade ou matéria com praticamente nenhuma resistência. Tais fenômenos estão tão distantes de observações cotidianas que, quando foram descobertas, causaram profundo espanto a ponto de se pensar que poderiam ser oriundos de falhas experimentais.

Em 1908, o físico holandês H. Kamerling Onnes, pela primeira vez, conseguiu liquefazer o Hélio, condensando assim o último elemento que persistia em ficar no estado gasoso. Kamerling utilizou hidrogênio líquido para resfriar uma amostra de Hélio e um termômetro de Hélio gasoso a volume constante para medir a temperatura. Passadas muitas horas de resfriamento, a temperatura da amostra de hélio, que estava sendo medida com o termômetro tinha parado de descer. Além disso, o hidrogênio líquido usado para resfriar o hélio havia acabado e Onnes estava a prestes a desistir quando um visitante no laboratório sugeriu a hipótese de que a temperatura se mantinha constante porque o termômetro estava imerso em um líquido em equilíbrio com o hélio gasoso. Como estava transparente, não poderia ser visto. Por sugestão do visitante, o recipiente de vidro onde estava sendo realizado o experimento foi iluminado por baixo e a interface gás-líquido se tornou perfeitamente visível!<sup>1</sup> A condensação da amostra ocorrera a uma temperatura de 4,2K. Nessa temperatura, o hélio líquido apresentava uma forte ebulição.

Dias mais tarde, Karmeling conseguiu resfriar o Hélio ainda mais, chegando a 2,17K, ponto em que a ebulição cessou abruptamente. É nessa temperatura que o Hélio apresenta característica de superfluido, mas Karmeling não relatou nada a respeito em nenhum de seus artigos. Na verdade, somente um quarto de século depois é que o fenômeno foi citado na literatura.

A uma temperatura de 2,17K, ocorre uma transição de fase na qual o Hélio se transforma em um superfluido, ou seja, torna-se uma substância de viscosidade nula, capaz de escoar sem nenhuma resistência. Os dois isótopos naturais do hélio,  ${}^4\text{He}$  e  ${}^3\text{He}$  apresentam esta propriedade. A transição de fase superfluida do  ${}^4\text{He}$  ocorre a 2,17K. No  ${}^3\text{He}$ , que constitui apenas  $1,3 \times 10^{-4}\%$  do hélio natural, esse efeito acontece a 2mK. Fases líquidas de outros bósons não se transformam em superfluidos porque todos esses outros sistemas se solidificam a temperaturas muito maiores que a temperatura crítica para a condensação de Bose-Einstein; já o hélio permanece líquido

---

<sup>1</sup> Referência [2]. Pag. 355.

em temperaturas próximas do zero absoluto, temperatura na qual os átomos teoricamente param de se mover. Quando a maioria dos líquidos é resfriada, a leve atração entre os átomos do fluido finalmente começa a superar as vibrações de calor e as partículas se acomodam em uma ordem regular, ou seja, um sólido. Mas os átomos de hélio são tão leves e fracamente atraídos uns pelos outros que, mesmo quando os movimentos atômicos comuns se acalmam, os átomos de hélio balançam com o movimento do ponto zero. Conseqüentemente, não se estabilizam no estado sólido.<sup>2</sup> Ou seja, a energia potencial da interação entre os átomos de hélio é muito pequena, e como átomos de hélio têm uma massa pequena, o movimento devido à energia de ponto zero é grande, tão grande, que a energia cinética é maior que a energia potencial da interação, o que impede que o material se solidifique.<sup>3</sup>

Três anos depois de conseguir liquefazer o Hélio, Karmeling descobriu que, para alguns materiais, existe uma temperatura crítica  $T_c$ , abaixo da qual a resistividade elétrica é nula, tornando-se um supercondutor. A experiência de Karmeling foi realizada com mercúrio, cuja temperatura crítica mostrava-se da ordem de 4,2K. Na ocasião, Onnes percebeu que a resistividade do mercúrio repentinamente tornava-se nula quando atingia essa temperatura. A temperatura crítica varia de material para material, mas abaixo dessa temperatura a resistência elétrica é tão pequena que não pode ser medida.

As temperaturas críticas de outros elementos supercondutores variam de menos de 0,1K para o háfnio e o irídio até 9,2K para o nióbio.

Existem vários compostos metálicos supercondutores, com temperaturas críticas relativamente altas. Por exemplo, a liga supercondutora de  $Nb_3Ge$ , descoberta em 1973, tem uma temperatura crítica de 23,2K, a mais alta conhecida até 1986. Apesar do alto custo e dificuldade na refrigeração com hélio líquido, esses materiais tem sido usados em diversas aplicações, tais como construção de ímãs, capazes de produzir campos magnéticos intensos para uso na medicina (ressonância magnética) e na física (aceleradores de partículas).

Em 1986, os físicos alemão e suíço, Johannes Georg Bednorz e Karl Alex Muller, descobriram que os óxidos de lantânio, bário e cobre se tornavam supercondutores a 30K. Um ano depois, verificou-se que o composto de  $YBa_2Cu_3O_7$  apresentava uma temperatura crítica de 97K. Desde então vários outros óxidos de cobre com temperaturas críticas elevadas foram descobertos.

Por fim, a descoberta de supercondutores cerâmicos revolucionou o estudo da supercondutividade uma vez que vários desses permanecem supercondutores acima de 77K, que é a temperatura de ebulição do nitrogênio líquido. Isso permite usar esse líquido como refrigerante no lugar do hélio líquido, que é mais caro e difícil de

---

<sup>2</sup> Referência [3].

<sup>3</sup> Referência [2]. Pag. 356.

manipular. Entretanto, os supercondutores cerâmicos são extremamente quebradiços, o que dificulta seu uso em aplicações práticas.

Estudos recentes mostraram que alguns materiais podem se tornar supercondutores em temperaturas muito próximas da temperatura ambiente quando sujeitos a pressões muito altas.<sup>4</sup>

Uma pergunta que se pode fazer é qual a relação entre supercondutividade e temperatura. Como sabemos, metais em geral são bons condutores de eletricidade. Isso se deve à sua resistividade ser baixa. No entanto, se aquecidos, os metais passam a não ser mais tão bons condutores de corrente elétrica quanto antes, em virtude do aumento da vibração de seus átomos. A oscilação desses átomos faz com que ocorram mais colisões com os elétrons da corrente elétrica, dificultando sua passagem. Ao passo que, se refrigerados, os metais passam a conduzir ainda mais facilmente do que à temperatura ambiente. Resfriando cada vez mais os metais, chegaremos a um ponto em que não haverá resistência à passagem da eletricidade.<sup>5</sup>

A maioria das aplicações dos supercondutores fazem uso da resistividade nula, sinônimo de eficiência máxima em alguns aparelhos elétricos, como por exemplo geradores de eletricidade e cabos de transmissão, que não têm perda de energia elétrica por calor. Outras aplicações utilizam os altos campos magnéticos que podem ser obtidos eficientemente com ímãs supercondutores. Aparelhos de ressonância magnética, por exemplo, bem como os trens flutuantes (Maglev) e alguns aparelhos utilizam estes campos. Outras aplicações mais comuns se valem do efeito Meissner que será estudado mais tarde. Outra aplicação interessante dos supercondutores seria a transmissão de energia elétrica das estações geradoras para as cidades. Contudo, tal aplicação ainda está longe de ser economicamente viável devido ao alto custo e à dificuldade técnica de se refrigerar vários quilômetros de cabos supercondutores a temperaturas criogênicas.<sup>6</sup>

Como a resistividade dos supercondutores é nula, pode existir uma corrente elétrica no material mesmo na ausência de campos elétricos. Correntes como essa são denominadas de supercorrentes. Pesquisadores tem mantido supercorrentes por muitos anos em anéis supercondutores sem que nenhum sinal de dissipação tenha sido observado.

Supercondutividade e superfluidade são fenômenos que apresentam várias similaridades. Ambas envolvem o surgimento de transições de fase para um estado especial de melhor ordenação espacial que permite o escoamento de partículas sem dispersão. Em nenhum dos casos a ordenação espacial ocorre como nos cristais, uma vez que as substâncias são fluidos. Ambas as transições são manifestações macroscópicas de leis da mecânica quântica e, em cada caso, a estatística de Fermi ou de Bose, determina as regras de comportamento.

---

<sup>4</sup> Referência [4].

<sup>5</sup> Referência [4].

<sup>6</sup> Referência [5].

## 14.2 Aspectos Experimentais de Superfluidos

O  ${}^4\text{He}$  se liquefaz a uma temperatura abaixo de 4,2K em condições normais de pressão. Numa temperatura entre 4,2K e 2,2K, o  ${}^4\text{He}$  se comporta como muitos outros líquidos embora tenha uma tensão superficial excepcionalmente baixa e seja extremamente transparente.

Em 1924 Kamerling Onnes e J. Boks descobriram que a curva da densidade do Hélio líquido em função da temperatura apresentava uma anomalia a uma temperatura  $T_c = 2,17\text{K}$  como mostra a Fig. 14.1 (a). Em 1932, Kelson e Clusius obtiveram o comportamento do calor específico do  ${}^4\text{He}$  como função da temperatura e a anomalia a uma temperatura  $T_c = 2,17\text{K}$  continuava sendo observada, como mostra a Fig. 14.1 (b)

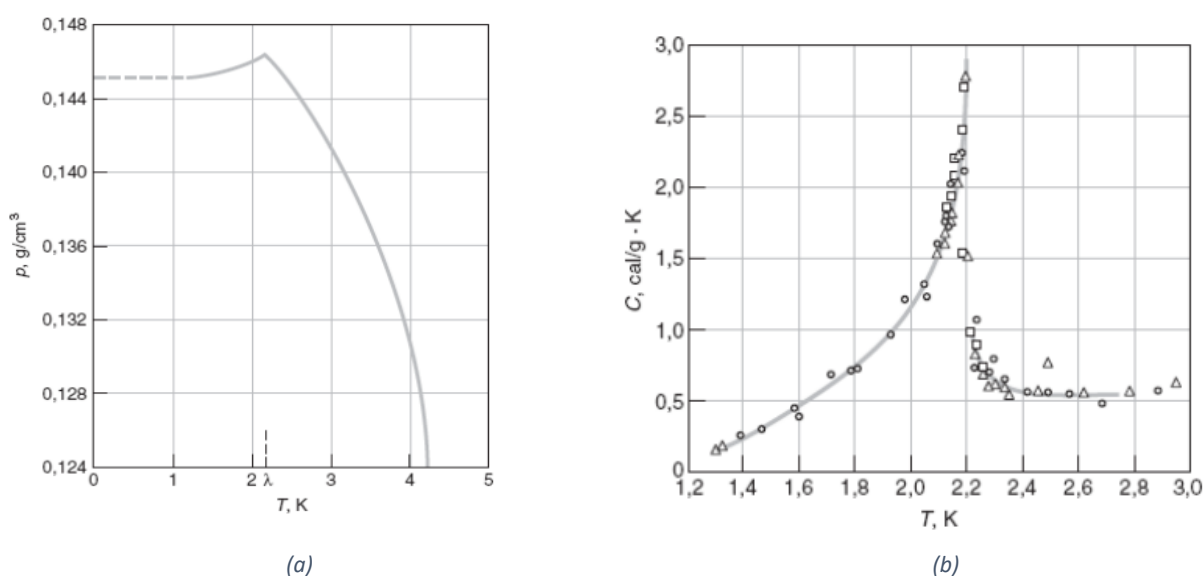


Figura 14.1 - Comportamento em função da temperatura da (a) densidade (b) calor específico do  ${}^4\text{He}$

Por causa da semelhança do gráfico com a letra grega  $\lambda$ , a temperatura crítica  $T_c$  foi denominada de ponto lambda.

Abaixo da temperatura  $T_c = 2,17\text{K}$ , o  ${}^4\text{He}$  comporta-se de forma diferente, pois torna-se um superfluido. Acima do ponto lambda, o  ${}^4\text{He}$  tem forte ebulição e, abaixo deste, cessa esse processo, embora continue a evaporar. Isso se deve ao aumento da condutividade térmica do  ${}^4\text{He}$  quando ultrapassa o ponto lambda. Assim como em outros líquidos, no hélio líquido normal, o aquecimento desigual leva a uma evaporação localizada, com formação de bolhas. Abaixo do ponto lambda, no entanto, a condutividade térmica é tão grande que o aquecimento se torna uniforme e a evaporação ocorre apenas na superfície do líquido, sem formação de bolhas, haja vista que todas as partes do fluido se encontram exatamente à mesma temperatura.

As medidas de condutividade térmica mostram que a condutividade térmica do hélio II é mais de um milhão de vezes maior que a do hélio I. O hélio II conduz melhor o calor do que qualquer metal.<sup>7</sup> Para ter uma ideia, sua condutividade térmica é 2000 vezes maior que a do cobre à temperatura ambiente! A transição associada ao ponto lambda pode ser visto na Figura 14.2 abaixo.

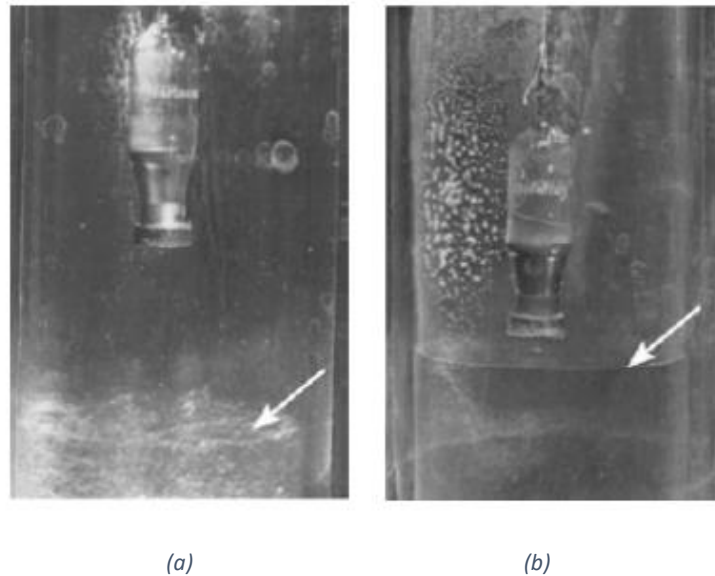


Figura 14.2 - Hélio líquido sendo resfriado por evaporação. (a) Acima do ponto lambda, o hélio ferve violentamente. (b) Abaixo do ponto lambda, a fervura cessa

Em 1928, W.H. Kelson e M. Wolfke propuseram que a descontinuidade das curvas mostradas na Figura 14.1, era causada por uma transição de fase. Eles usaram “Hélio I” para o líquido a uma temperatura  $T > T_c$  e “Hélio II” para o caso em que  $T < T_c$ . De acordo com essa ideia, quando a temperatura do Hélio atinge  $T = T_c$ , a partir de  $T=0$ , ele muda de uma fase superfluida Hélio II para uma fase normal Hélio I.

O pico nos gráficos da Figura 14.1 tem sido estudado extensamente e nota-se que este fica infinitamente maior se o número de átomos no sistema é infinito. À temperatura  $T < T_c$ , o calor específico tem uma dependência com  $T^3$ , que é uma característica de sistemas de fônons. Sabe-se do capítulo 12 que o calor específico dos sólidos tem essa dependência com a temperatura. À temperatura  $T > T_c$ , observa-se um comportamento exponencial do tipo

$$e^{-\frac{\varepsilon_q}{k_B T}}$$

Que caracteriza um espectro com um “gap” de energia  $\varepsilon_q$ .

A Fig. 14.3 mostra um recipiente que foi mergulhado, e depois retirado, de um banho com Hélio líquido a uma temperatura abaixo do ponto lambda. Com o recipiente acima do reservatório, um filme de superfluido sobe pelas paredes internas do recipiente, desce pelas paredes externas e pinga no reservatório abaixo até o recipiente

<sup>7</sup> Referência [2]. Pag. 356.

se esvaziar. Se abaixarmos o recipiente até que ele fique parcialmente submerso no reservatório, o superfluido migrará para fora do recipiente até que os níveis do líquido dentro e fora do recipiente se igualem. Se o nível inicial no interior do recipiente estiver abaixo do nível no reservatório, o líquido migrará para dentro do recipiente. Esse fenômeno é uma característica de superfluidos e é denominado de efeito do filme migrante.<sup>8</sup>

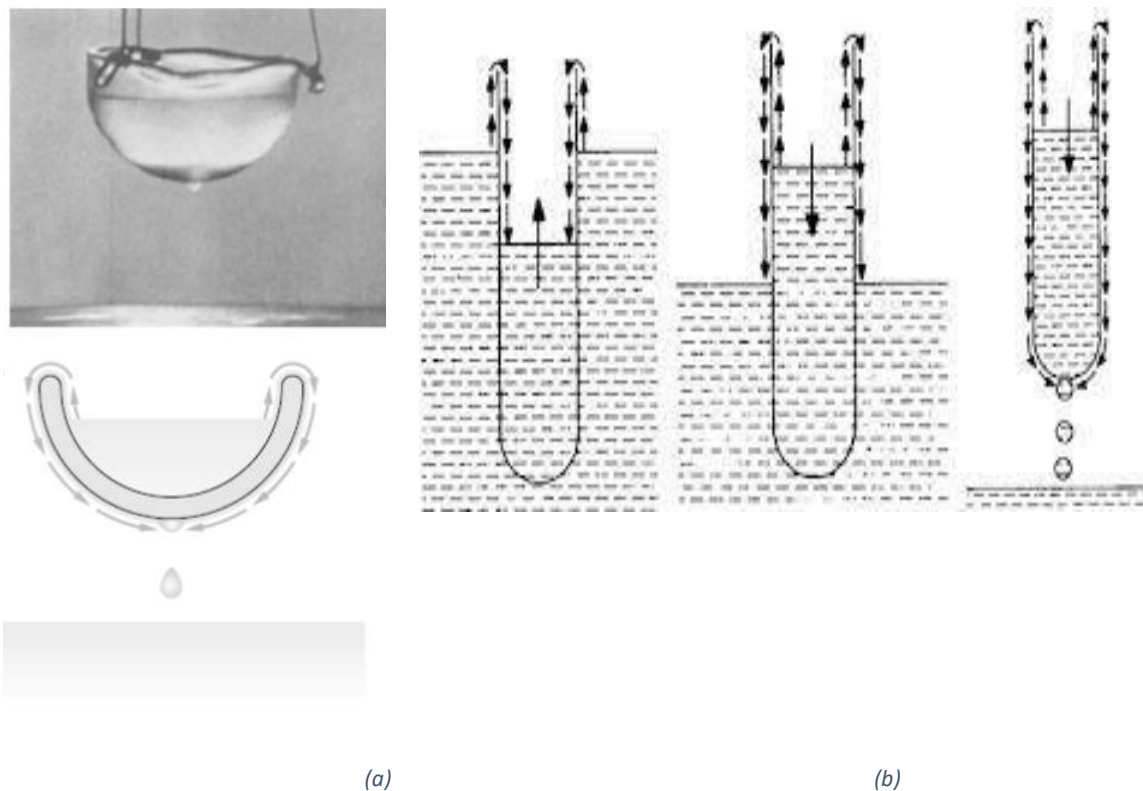


Figura 14. 3 - O efeito do filme migrante. O hélio líquido no recipiente está a uma temperatura de aproximadamente 1,6 K.

"Se você pousar um copo com um líquido circulando e voltar 10 minutos depois, é claro que ele terá parado de se mover", frase de John Beamish, físico experimental da Universidade de Alberta em Edmonton. Os átomos no interior do líquido irão colidir entre si e ficarão mais lentos. "Mas se você fizesse isso com o hélio em baixa temperatura e voltasse um milhão de anos depois ainda estaria se movendo." Afinal, superfluido trata-se de um fluido que flui sem atrito.<sup>9</sup>

Outros efeitos importantes característicos de superfluidos são o efeito termomecânico e o efeito fonte, mostrados nas Figs. 14.4 (a) e 14.4 (b), respectivamente.

<sup>8</sup> Referência [2]. Pag. 358.

<sup>9</sup> Referência [3].

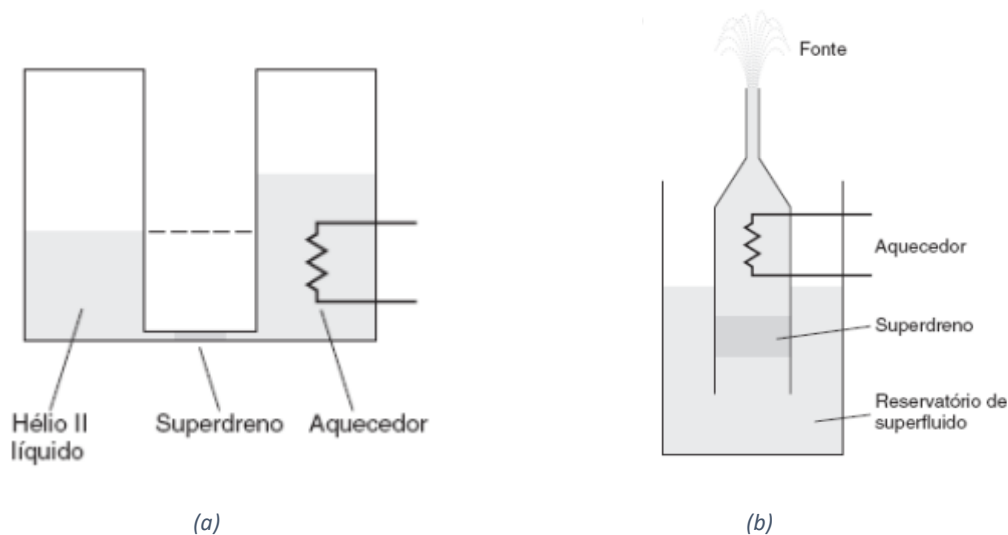


Figura 4 - Diagramas Esquemáticos do (a) Efeito Termomecânico e (b) Efeito Fonte

O efeito termomecânico pode ser observado utilizando-se dois recipientes com superfluido conectados por um superdreno. Quando um dos recipientes é aquecido, o superfluido migra do lado mais frio para o lado mais quente, o que faz com que os níveis de superfluido sejam diferentes nos dois recipientes. Esse mesmo comportamento faz com que o superfluido seja ejetado através de um capilar no efeito fonte.

Os pesquisadores gostam de pensar no hélio superfluido como composto de uma mistura de dois fluidos, um normal e um superfluido. Diferentes experimentos revelam as características diferentes entre ambas as frações. O "experimento" mais simples é observar como um recipiente cheio de hélio líquido repentinamente apresenta um vazamento ao ser resfriado abaixo do ponto lambda e a fração de superfluido sem atrito começa a vazar através de rachaduras microscópicas onde a fração normal de líquido não pode entrar. À medida que a temperatura cai, a fração do superfluido ocupa uma parte maior da mistura. Em outro experimento, pesquisadores medem a proporção das duas frações colocando uma amostra em um recipiente cilíndrico de metal suspenso por um fio. Quando eles dão uma torção ao fio, o cilindro gira para um lado e depois para o outro. Mas apenas a fração normal irá girar com o cilindro, por causa do atrito entre ela e as paredes do cilindro; a porção superfluida permanece imóvel. Conforme a fração de superfluido aumenta, o cilindro gira mais rápido, como se o cilindro estivesse perdendo peso (inércia).<sup>10</sup>

Durante muito tempo acreditava-se que o  ${}^3\text{He}$  não poderia tornar-se um superfluido, uma vez que se trata de um férmion (substância de spin semi-inteiro). O princípio de Pauli não permitiria que essas partículas ocupem o mesmo estado. No entanto, no início da década de 1970, Lee, Osheroff e Richardson demonstraram que, a uma temperatura de 2,7mK, os spins de pares de átomos de  ${}^3\text{He}$  alinham-se paralelamente, criando bósons de spin 1, permitindo que o líquido passe para o estado de superfluido.

<sup>10</sup> Referência [3].

Posteriormente, foram descobertos mais dois estados superfluidos do  $^3\text{He}$ : um com spin 0 (pares de átomos com spins antiparalelos), e outro com spin 1 (obtido quando um campo magnético alinha os spins dos pares de átomos), ambos a uma temperatura de 1,8mK.

Em 1996, Lee, Oscheroff e Richardson, receberam o prêmio Nobel por suas descobertas.

## Exercícios

- 1) O que são supercondutores? Quais suas aplicações?
- 2) O que são superfluidos?
- 3) Por que o hélio se transforma em superfluido enquanto fases líquidas de outros bósons não?
- 4) Quais vantagens encontramos em utilizar materiais supercondutores com temperaturas críticas mais elevadas em aplicações tecnológicas?
- 5) Resumidamente, explique os efeitos:
  - a) Efeito Filme Migrante;
  - b) Efeito Termomecânico;
  - c) Efeito Fonte;
- 6) Por que átomos do isótopo de Hélio 3 podem formar condensados de Bose-Einstein, apesar de terem spins semi-inteiros?
- 7) Identifique as principais diferenças entre as características do hélio I e do hélio II.

## Referências

- [1] LIMA, Carlos R. A. “Notas de Aula de Estrutura da Matéria”. Superfluidez e Supercondutividade. Edição de Janeiro de 2013
- [2] TIPLER. Paul A. LLEWELLYN. Ralph A. “Física Moderna”. 6 Ed. RJ. LTC, 2017. Acesso: <https://drive.google.com/file/d/1czY2luWGEH0XyybelrzpAVgiXXDKji8C/view>
- [3] MINKEL. JR. “Strange but True: Superfluid Helium Can Climb Walls”. Scientific American, 2009. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/superfluid-can-climb-walls/>. Acesso em 29 de outubro de 2021.
- [4] HELERBROCK, Rafael. "Supercondutores"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/os-supercondutores.htm>. Acesso em 29 de outubro de 2021.
- [5] BRANÍCIO. Paulo S. “Introdução à supercondutividade, suas aplicações e a mini-revolução provocada pela redescoberta do MgB<sub>2</sub>: uma abordagem didática”. SciELO Brasil, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/8CSJ5zLMH4ZJdndBGBKJdwg/?lang=pt> . Acesso em 29 de outubro de 2021.