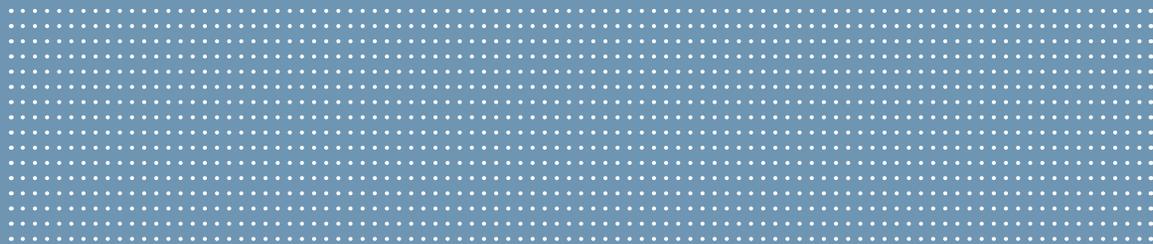


100

anos de

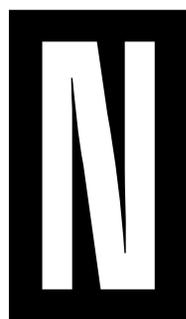
SUPERCONDUTIVIDADE



A descoberta da supercondutividade

Dirk van Delft e Peter Kes

Tradução de Saulo Adriano



o dia 10 de julho de 1908, em seu laboratório na Universidade de Leiden, o grande físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) viveu o momento mais glorioso de sua carreira. Naquele dia ele conseguiu liquefazer o hélio pela primeira vez, e assim deu início a um capítulo totalmente inédito na física de baixas temperaturas¹.

Em um relatório em tom triunfante à Academia Real de Artes e Ciências da Holanda (KNAW), Kamerlingh Onnes documentou seu feito com grandes detalhes. Portanto, é de estranhar que três anos mais tarde tenha se tornado difícil de obter um relato circunstanciado e confiável sobre sua descoberta casual da supercondutividade. A falta de informação levou a especulações sobre a descoberta e, em particular, perpetuou a história apócrifa sobre o papel desempenhado por um jovem aprendiz sonolento do laboratório de Kamerlingh Onnes. A história foi tratada como um fato insuspeito em um artigo de setembro de 1996 da *Physics Today*, de auto-

ria de Jacobus de Nobel². Houve até mesmo rumores sobre o possível sumiço dos cadernos de laboratório de Kamerlingh Onnes.

OS CADERNOS DO LABORATÓRIO

Há motivo suficiente, portanto, para se fazer uma investigação minuciosa no Arquivo Kamerlingh Onnes, instalado no Museu Boerhaave, em Leiden, para averiguar a possibilidade de se encontrar novas pistas sobre a descoberta da supercondutividade – a consequência mais importante da capacidade de se atingir temperaturas de hélio líquido.

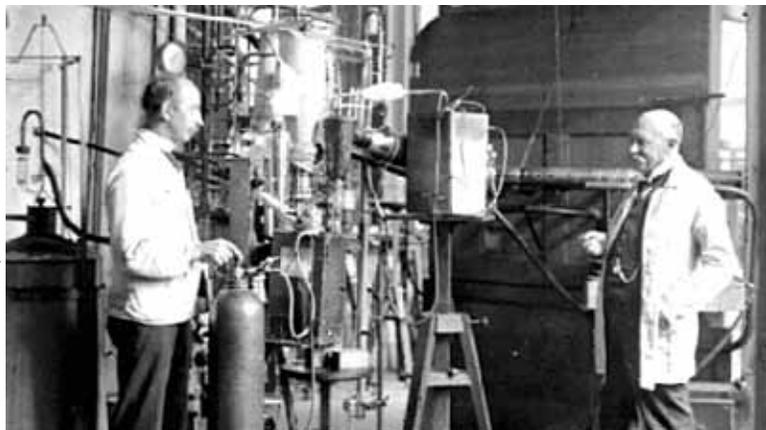
É claro que não se sabe ao certo quando foram realizadas as duas primeiras experiências com a supercondutividade. Os dois relatórios anteriores de Kamerlingh Onnes enviados à KNAW a respeito da resistência zero e da “supracondutividade”, como ele preferia chamá-la, levam a data de 28 de abril e 27 de maio de 1911. A Figura 1 mostra seu laboratório por volta daquela época.

Segundo o inventário do arquivo, dois cadernos (de números 56 e 57) deveriam cobrir o período de 1909-1912 (Onnes, s.d.). Porém,

Textoriginalmentepublicado em *Physics Today*, setembro de 2010, pp. 38-43.

DIRK VAN DELFT é professor de História da Ciência da Universidade de Leiden, na Holanda, e diretor do Museu Boerhaave, em Leiden.

PETER KES é professor de Física do Laboratório Kamerlingh Onnes da Universidade de Leiden.

**FIGURA 1**

Heike Kamerlingh Onnes (direita) e Gerrit Flim, seu técnico-chefe, junto ao liquefator de hélio no laboratório de Kamerlingh Onnes em Leiden, por volta

na capa do caderno 56 está escrito “1909-1910”, e o 57 começa com uma anotação com data de 26 de outubro de 1911. Por isso, de fato, parece que falta um caderno de suma importância, o que explicaria por que tantas especulações começaram a surgir.

Outro fator dificultador é a letra terrível de Kamerlingh Onnes. Ele escrevia suas anotações de laboratório a lápis, em pequenas agendas domésticas, e elas são muito difíceis de se ler. Alguém que tentar com muito afincado lê-las por algumas horas provavelmente desistirá. Isso é uma pena, pois, apesar do que está escrito em sua capa, o caderno 56 de fato apresenta a descoberta da supercondutividade em 1911 (ver Figura 2). Traduzida, a anotação diz: “A medição da temperatura foi feita com sucesso. [A resistividade do] Mercúrio praticamente zero”. Uma tradução mais literal do holandês prosaico da frase “*Kwik nagenoeg nul*” seria “Prata [viva] quase totalmente zero”.

Quando Kamerlingh Onnes fazia anotações de laboratório, sempre começava escrevendo a data. Para essa anotação ele escreveu “8 de abril”, mas não mencionou o ano! Ele descreveu a segunda experiência com a resistividade do mercúrio com a data de 23 de

maio, e novamente deixou de mencionar o ano. E isso só piora: entre aquelas datas, ele e Albert Perrier, um visitante de Lausanne, realizaram uma experiência inteiramente diferente sobre o paramagnetismo do oxigênio em estado líquido e sólido. A data informada dessa experiência – 19 de maio de 1910 –, de fato, especifica o ano, mas não o correto! Deveria ter sido informado o ano de 1911.

Por que será que Kamerlingh Onnes cometeu tal erro? Provavelmente foi por causa de uma série extensa de experimentos semelhantes realizados juntamente com Perrier no final de 1909 e nos primeiros meses de 1910. De qualquer forma, aquele pequeno deslize em sua escrita conduziu muitos ao erro. Esse é o motivo mais provável pelo qual os pesquisadores que estudaram o arquivo até hoje não investigaram mais profundamente as anotações de laboratório. Caso tivessem se esforçado, teriam descoberto a empolgação pela primeira transferência de hélio líquido para um criostato separado para medir a resistividade, as datas exatas das primeiras experiências com a supercondutividade, quais pessoas participaram e quais foram seus papéis. As anotações revelam também

1 Ver artigo na *Physics Today*, março de 2008, p. 36.

2 *Physics Today*, setembro de 1996, p. 40.

que algumas histórias sempre repetidas sobre aqueles acontecimentos serão sempre interessantes, mas nunca verdadeiras.

“Mercúrio praticamente zero.” Essa anotação a lápis anunciou o nascimento de um novo campo. Porém, provavelmente naquele momento Kamerlingh Onnes pensava simplesmente em como tinha acertado ao escolher o mercúrio. A resistência zero era o que ele esperava encontrar em metais extremamente puros a temperaturas de hélio líquido (Ouboter, 1987, p. 355). Após liquefazer o hidrogênio em fevereiro de 1906, ele deu início a um programa para investigar a resistência de metais a baixas temperaturas. Ele tinha uma razão prática – a termometria. Contudo, possuía também um interesse puramente científico.

Um dos objetos de discussão daqueles dias era a questão sobre o que acontecia com a resistividade de um metal à medida que sua temperatura se aproximava do zero absoluto (Dahl, 1992, p. 13). Era aceito que os elétrons eram responsáveis pela condutância elétrica, e que a resistência se devia ao espalhamento dos elétrons pelos íons do cristal metálico. Será que a amplitude do espalhamento diminuiria suficientemente rápido com a queda da temperatura e produziria a resistência zero à temperatura zero? Ou será que a mobilidade dos elétrons também diminuiria em baixas temperaturas, e resultaria em *condutividade* zero no zero absoluto? Se a natureza seguisse essa segunda receita – proposta por Lord Kelvin em 1902 –, a resistência de um metal puro primeiramente diminuiria com a queda da temperatura, depois atingiria um valor mínimo, e finalmente subiria até o infinito no zero absoluto.

Nas primeiras investigações feitas em Leiden com temperaturas de hidrogênio líquido, Kamerlingh Onnes e seu assistente Jacob Clay estudaram a resistência R versus a temperatura T em fios muito finos de platina e ouro (Onnes & Clay, 1906)³. Até julho de 1908 a temperatura mais baixa obtível era 14 K, a qual o hidrogênio sólido sublima sob pressão reduzida. Essa temperatura era baixa o suficiente para se observar que o decaimento quase linear de R com T a temperaturas mais altas começa a se estabilizar até atingir

um valor quase constante. Em um de seus relatórios enviados à KNAW, Kamerlingh Onnes chegou até mesmo a mencionar um indício de um mínimo no gráfico de $R(T)$, o que indica que ele originalmente acreditava no modelo de Kelvin.

O comportamento quase linear de $R(T)$ da platina acima de 14 K tornou esse metal apropriado para servir de segundo termômetro por ser muito mais conveniente que o termômetro de gás hélio usado por Kamerlingh Onnes. Porém, havia a desvantagem de o termômetro de platina ser um tanto grande: media 10 cm de comprimento e cerca de 1 cm de largura.

A resistência dos fios de metal dependia da pureza química e física dos materiais. Por exemplo, Kamerlingh Onnes demonstrou que o aumento de resistência com a adição de pequenas misturas de prata ao ouro mais puro disponível era independente da temperatura e proporcional à concentração de prata adicionada. Portanto, melhorando-se a pureza seria possível produzir fios de metal de resistência muito baixa, que poderiam servir como termômetros secundários a temperaturas bem abaixo de 14 K.

Essas temperaturas muito baixas foram obtidas após a liquefação bem-sucedida do hélio em julho de 1908. A necessidade importante a seguir era a transferência do hélio do liquefator, que carecia de espaço suficiente para experiências, para um criostato separado. Naqueles dias, conseguir realizar tal transferência era um grande desafio. Graças aos cadernos de anotações, podemos acompanhar bem de perto a estratégia seguida por Kamerlingh Onnes, seu gerente técnico do laboratório criogênico, Gerrit Flim, e seu magistral modelador de vidro, Oskar Kesseling.

EXPERIÊNCIAS COM O HÉLIO LÍQUIDO

A primeira anotação a respeito das experiências com o hélio líquido do caderno 56 leva a data de 12 de março de 1910. Descreve a primeira tentativa de transferir o hélio para

³ Muitos artigos em *Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden* foram reimpressos na versão em inglês da *Proceedings of the KNAW*, e encontram-se disponibilizados pela KNAW no endereço eletrônico <http://www.digitallibrary.nl/proceedings>.

um criostato com um recipiente de paredes duplas e um recipiente menor ligados a uma bateria impressionante de bombas de vácuo. “O plano é transferir, e depois diminuir a pressão, e então condensar no vidro interno, e depois bombear com a [bomba] Burckhardt [até a pressão cair para] $\frac{1}{4}$ mm [Hg], e depois com a bomba Siemens [até] 0,1 mm”.

Como não havia nada além de vidro dentro do criostato, a experiência deu certo, e foi registrado um novo recorde de baixa temperatura: aproximadamente 1,1 K. O objeto da experiência seguinte, quatro meses mais tarde, era continuar a medir $R(T)$ para o resistor de platina calibrado previamente a 14 K. Porém, a experiência falhou porque a capacidade térmica extra do resistor causou uma ebulição violenta e a evaporação rápida do hélio líquido que acabara de ser transferido. Por esse motivo, decidiu-se pela mudança drástica do sistema de transferência, o que levaria mais outros nove meses.

Nesse ínterim, crescia rapidamente o interesse no comportamento de sólidos a baixas temperaturas. Experimentos com calor específico realizados em Berlim e Leiden demonstraram reduções inesperadas com temperaturas descendentes. Pela primeira vez

os fenômenos quânticos foram observados a baixas temperaturas. Kamerlingh Onnes, ele próprio fazendo uso de modelos teóricos, não queria esperar até que o novo sistema de transferência de líquidos ficasse pronto, e decidiu expandir o liquefator original para que pudesse abrigar um resistor de platina. Assim, em 2 de dezembro de 1910, ele fez a primeira medição de $R(T)$ para um metal a temperaturas de hélio líquido (Onnes, 1911a). Cornelis Dorsman auxiliou na medição das temperaturas, e o aluno Gilles Holst operou a ponte de Wheatstone com o galvanômetro. Esse aparato ultrasensível para a medição da corrente foi colocado em uma sala separada, longe das imensas bombas.

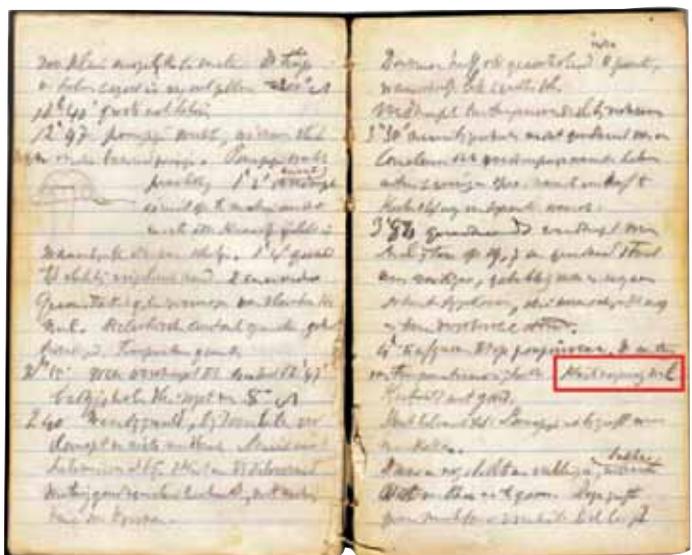
O resultado do experimento foi excepcional. A resistência de um fio de platina tornou-se constante abaixo de 4,5 K. Não havia mais dúvidas de que a teoria de Kelvin estava errada. A resistividade caíra para um valor residual que supostamente dependia da pureza da amostra. Kamerlingh Onnes concluiu que a resistência de amostras suficientemente puras de platina ou ouro se tornaria zero a temperaturas de hélio líquido.

Por que ele estava tão ansioso para continuar essas investigações com o mercúrio em

FIGURA 2

Uma anotação concisa de 8 de abril de 1911 do caderno 56 de Heike Kamerlingh Onnes registra a primeira observação da supercondutividade. A frase em holandês em destaque, “*Kwik nagenoeg nul*”, significa “A resistência do mercúrio praticamente zero [a 3 K]”. A frase logo a seguir, “*Herhaald met goud*”, significa “repetida com o ouro” (cortesia do Museu

Physics Today



particular? Deve ter sido a ampla inclinação da curva de $R(T)$ para o mercúrio a 14 K e o fato de que, a essa temperatura, a inclinação não mostrava nenhum sinal de estabilização. Além disso, o laboratório em Leiden tinha muita experiência em purificação do mercúrio por destilação, e o material não corria

o risco de ser contaminado pois não havia necessidade de se trefilar um fio fino (o mercúrio líquido em um capilar simplesmente congela a 234 K [-39°C]).

No começo de abril de 1911, o novo criostato estava pronto para seu primeiro resfriamento. Era uma obra-prima de desenho técnico, que deixava evidente a extraordinária técnica em modelagem de vidro a quente e esmerada construção mecânica (Onnes, 1911b, p. 204) (ver Figura 3). O tubo de transferência fora substituído por um sifão de vidro de paredes duplas com bombeamento a vácuo, resfriado externamente por um contrafluxo de ar líquido forçado a passar por uma bobina capilar de cobre que o envolvia. O liquefator e o criostato podiam ser desconectados um do outro com um simples fechar de uma válvula. Outra inovação importante, necessária para se estabelecer uma temperatura bem definida na área de medição, era um agitador mecânico ligado a um ímã no topo do criostato, que podia ser movido para cima e para baixo por um motor. A ação da válvula e do agitador poderia ser acompanhada diretamente pelas faixas não revestidas do tubo de vidro a vácuo com revestimento de prata.

O objetivo principal do experimento de 8 de abril de 1911 era testar a transferência de hélio líquido para o criostato experimental. Porém, segundo o caderno 56, o termômetro de gás hélio e os resistores de ouro e mercúrio necessários para realizar as medições da resistência do mercúrio já estavam instalados no criostato – para o caso de a transferência do hélio funcionar.

O resistor de mercúrio fora construído ligando em série sete capilares de vidro em forma de U, cada um contendo um pequeno reservatório de mercúrio para impedir que o fio se rompesse durante o resfriamento. As ligações elétricas eram feitas por quatro condutores de passagem de platina com fios finos de cobre ligados ao equipamento de medição exterior ao criostato. Kamerlingh Onnes seguiu a sugestão do jovem Holst de solidificar o mercúrio nos capilares resfriando-os com nitrogênio líquido.

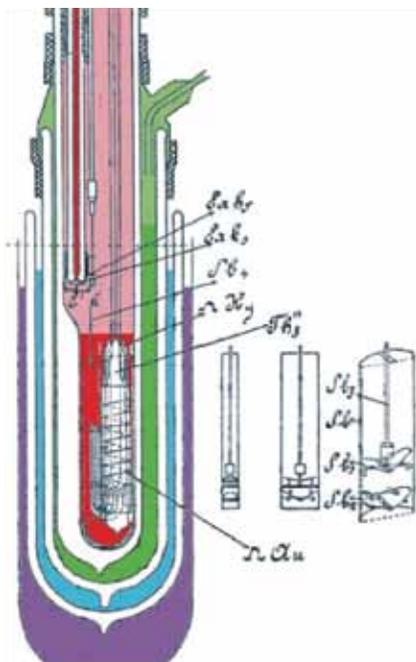


FIGURA 3

Parte inferior do criostato no qual Heike Kamerlingh Onnes e seus colegas realizaram em 8 de abril de 1911 a experiência que revelou a supercondutividade pela primeira vez. Onnes (1911b) é a fonte do desenho original, ao qual aqui foram acrescentadas cores para indicar os vários fluidos criogênicos no interior do elaborado frasco de Dewar: álcool (roxo), ar líquido (azul), hidrogênio líquido e gasoso (verde-claro e escuro) e hélio líquido e gasoso (vermelho-claro e escuro). Gerrit Flim escreveu à mão as legendas para os resistores de mercúrio e ouro (Ω Hg e Ω Au), o termômetro a gás (Th3), os componentes na extremidade (Ea) do tubo de transferência junto ao liquefator de hélio e partes do agitador de hélio líquido (Sb), também mostrado em tamanho aumentado à direita, em algumas seções

Physics Today

A PRIMEIRA EXPERIÊNCIA COM O MERCÚRIO

Para saber o que aconteceu em 8 de abril de 1911, só precisamos acompanhar as anotações do caderno 56. A experiência foi iniciada às 7h, e Kamerlingh Onnes chegou quando a circulação do hélio começou, às 11h20. A resistência do mercúrio caiu com a queda da temperatura. Após meia hora o resistor de ouro estava a 140 K, e logo depois do meio-dia o termômetro a gás indicava 5 K. A válvula trabalhava “indicando as menores diferenças e alterações”. Meia hora mais tarde, uma quantidade suficiente de hélio fora transferida para testar o funcionamento do agitador e medir o calor da evaporação muito pequeno do hélio.

A equipe provou que o hélio líquido não conduzia eletricidade, e mediu sua constante dielétrica. Holst realizou medições precisas das resistências do mercúrio e do ouro a 4,3 K. Então a equipe começou a reduzir a pressão de vapor do hélio, que começou a evaporar rapidamente. Eles mediram seu calor específico e pararam quando a pressão de vapor chegou a 197 mmHg (0,26 atmosfera), correspondente a cerca de 3 K.

Exatamente às 16h, segundo o caderno, as resistências do ouro e do mercúrio foram calculadas novamente. A resistência do segundo, na anotação histórica, era “praticamente zero”. Mais adiante o caderno registra que o nível do hélio permaneceu praticamente inalterado.

A experiência continuou até o final da tarde. Ao final do dia, Kamerlingh Onnes encerrou com uma intrigante anotação em seu caderno: “Dorsman [que tinha controlado e medido as temperaturas] precisou realmente agir rápido para fazer as observações”. Surpreendentemente, foi difícil controlar a temperatura. “Pouco antes de atingirmos a temperatura mais baixa [cerca de 1,8 K], a ebulição parou de repente e foi substituída pela evaporação, na qual o líquido diminuiu visivelmente. Aconteceu então uma evaporação excepcionalmente forte na superfície”.

Sem se dar conta, a equipe em Leiden também observara a transição superfluida do hélio líquido a 2,2 K. Duas transições quânticas distintas foram observadas pela primeira vez em um só laboratório no mesmo dia!

Três semanas mais tarde, Kamerlingh Onnes relatou seus resultados na reunião de abril da KNAW (Onnes, 1911d). Ele disse à plateia que seu modelo produzira três previsões em relação à resistência do mercúrio ultrapuro: 1) a 4,3 K a resistência devia ser bem menor do que a 14 K, mas ainda mensurável com seus equipamentos; 2) não devia ser até esse ponto independente da temperatura; e 3) a temperaturas muito baixas, devia chegar a zero dentro dos limites da precisão experimental. Essas previsões, concluiu Kamerlingh Onnes, foram plenamente confirmadas pelo experimento.

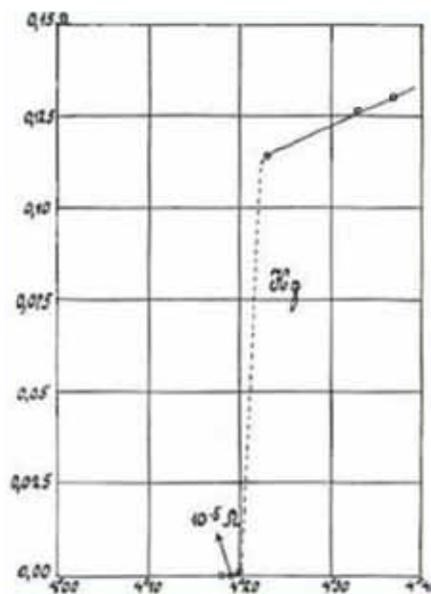


FIGURA 4

O gráfico histórico da resistência (ohms) versus temperatura (kelvin) para o mercúrio do experimento de 26 de outubro de 1911 demonstra a transição supercondutora a 4,2 K, e 0,01 K acima dessa temperatura a resistência passa rapidamente de valores pequenos não mensuráveis (menos de $10^{-6} \Omega$) para 0,1 Ω (Onnes, 1911).

Physics Today

Para a experiência seguinte, em 23 de maio, a resolução de voltagem do sistema de medição fora melhorada para cerca de 30 nV. A razão $R(T)/R_0$ a 3 K passou para menos de 10^{-7} (o parâmetro normalizador R_0 era a resistência calculada do mercúrio cristalino extrapolado a 0°C). Esse limite superior de sensibilidade excepcionalmente pequeno se manteve quando T foi baixada para 1,5 K. A equipe, após explorar temperaturas entre 4,3 K e 3,0 K, voltou-se para temperaturas mais altas. A anotação do caderno feita no meio da tarde diz: “A 4,00 [K] ainda não se observa nenhuma resistência ascendente. A 4,05 [K] nada ainda. A 4,12 [K] a resistência começa a aparecer”.

Essa anotação contradiz a história sempre recontada sobre o papel fundamental desempenhado por um “garoto de azul”, um aprendiz da escola de fabricação de instrumentos fundada por Kamerlingh Onnes (o apelido se refere aos uniformes azuis usados pelos garotos). Segundo a história, a falta de atenção do sonolento garoto de azul naquela tarde causou a ebulição do hélio, o que elevou o mercúrio acima de sua temperatura de transição de 4,2 K e indicou o novo estado – pela sua reversão à condutividade normal –, com uma oscilação brusca do galvanômetro.

A experiência foi feita com temperaturas ascendentes, e não descendentes, porque dessa maneira a temperatura mudava lentamente e as medições podiam ser realizadas sob condições mais controladas. Kamerlingh Onnes relatou à KNAW que pouco acima de 4,2 K a resistência ainda encontrada era de apenas $10^{-5} R_0$, mas a 0,1 K acima dessa temperatura ela aumentava por um fator de quase 400.

ALGO NOVO, INTRIGANTE E ÚTIL

Um aumento tão abrupto era muito mais rápido do que podia dar conta o modelo de Kamerlingh Onnes (1911e). Ele usou o restante de seu relatório para explicar quão útil poderia ser esse desaparecimento súbito da resistência elétrica. Fato interessante é que

no dia antes de Kamerlingh Onnes apresentar esse relatório ele escrevera em seu caderno que a equipe verificara se, “ao evacuar o aparelho, isso influenciara as ligações dos fios por deformar o topo [do criostato]. Não era o caso”. Desse modo eles desconsideraram os curtos-circuitos acidentais como a causa do desaparecimento da resistência.

A anotação revela quão confuso ele ficou com os resultados da experiência. O caderno 57 começa em 26 de outubro de 1911. “No aparelho do hélio, o resistor de mercúrio [...] com condutores de mercúrio”. Ou seja, a equipe passara todo o verão substituindo os condutores de passagem de platina e condutores de cobre por fios de mercúrio em capilares de vidro ligados à tampa do criostato. Eles estudaram como o novo aparato poderia ser resfriado de maneira controlada sem romper os fios de mercúrio ou o vidro.

Isso foi um grande desafio. Em retrospecto, o esforço se revelou uma perda de tempo, mas fora motivado pela questão importante sobre quão pequena a resistência de fato era. A fim de melhorar a resolução de voltagem, eles procuraram minimizar o efeito termoelétrico nos condutores. A ideia era fazer isso com o uso do mesmo material tanto para as amostras quanto para os condutores. Não funcionou, porque a transição do mercúrio sólido para o líquido na verdade transformou-se numa fonte de grande voltagem termoelétrica.

Mesmo assim, a experiência de outubro produziu um gráfico histórico, mostrado na Figura 4, do surgimento abrupto da resistência do mercúrio a 4,2 K. A parte do gráfico acima da temperatura de transição é de particular interesse porque demonstra um aumento gradual com a temperatura após o aumento brusco. Para obter esses dados, a equipe de Leiden tinha de ir acima do ponto normal de ebulição do hélio. Eles o fizeram fechando a válvula de admissão do hélio para a pressão do vapor subir, e com isso elevar a temperatura de ebulição.

A partir do aumento brusco, ficou claro que um fenômeno novo e totalmente inesperado fora descoberto. Apenas uma sema-

na mais tarde Kamerlingh Onnes relatou sua descoberta em Bruxelas para a elite do mundo da física no primeiro dos históricos Congressos de Solvay (Onnes, 1911c).

Mais adiante, no caderno 57, observamos os preparativos em março de 1912 para as experiências com calor específico próximo da transição supercondutora do mercúrio. Holst foi encarregado disso. Contudo, aconteceram dificuldades experimentais que não puderam ser resolvidas de maneira satisfatória. Por fim, Holst e Kamerlingh Onnes publicaram em conjunto um trabalho sobre o calor específico e a condução térmica do mercúrio, mas a precisão na tomada de medidas a temperaturas de hélio não foi suficiente para revelar quaisquer características à temperatura de transição.

Uma anotação no caderno, de 20 de junho de 1912, é muito interessante: “Discuti com Holst [...] fazer uma liga de ouro e Cd. Decidi [usar] concentrações bem pequenas”. Poucos dias depois, a experiência já tinha sido realizada, mas os resultados só foram publicados em março do ano seguinte. No início de 1913, Kamerlingh Onnes escreveu no caderno:

“Para minha surpresa, a resistência [da liga de mercúrio] desapareceu da mesma maneira que tinha acontecido com o mercúrio puro. Muito do tempo gasto na preparação do mercúrio puro [...] poderia ter sido economiza-

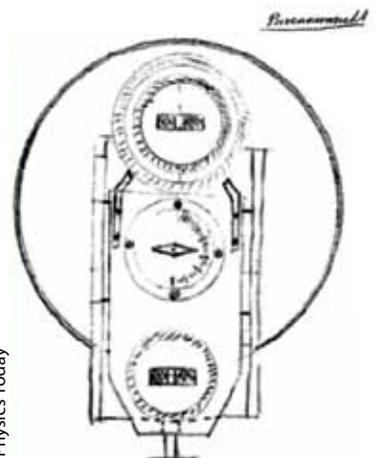
do. [...] Mesmo com a amálgama usada para o revestimento da parte de trás de espelhos, a resistência encontrada foi de 0 a temperaturas de hélio. Mais tarde, em dezembro de 1912, foi descoberto que ela desaparecia subitamente, como aconteceu com o mercúrio puro, mas a uma temperatura mais alta”.

Poucos meses antes, a equipe de Leiden descobrira que o estanho e o chumbo também eram supercondutores, com temperaturas de transição próximas de 6 K e 4 K, respectivamente (Onnes, 1913). Essas descobertas serviram como uma espécie de alívio. A equipe podia então realizar experiências com a supercondutividade sem se preocupar com problemas de laboratório peculiares ao mercúrio: destilação dupla, fios rompidos e procedimentos de resfriamento muito incômodos.

Uma experiência em 17 de janeiro de 1914 revelou o efeito destrutivo dos campos magnéticos sobre a supercondutividade. Para o chumbo, o valor crítico do campo magnético a 4,25 K era de apenas 600 gauss, o que deve ter sido um grande desapontamento para Kamerlingh Onnes (1914). Antes dessa descoberta desalentadora, em diversas ocasiões ele sonhara em voz alta com a produção de bobinas feitas de material supercondutor capazes de produzir campos magnéticos tão fortes que chegassem a 100 mil gauss (10

FIGURA 5

Desenho de Gerrit Flim do aparato para a experiência com a corrente persistente em maio de 1914. Nessa visão do alto (*bovenaanzicht*) é possível ver a agulha de uma bússola apontando para o norte, entre uma bobina de chumbo supercondutora (oeste), imersa em hélio líquido em um frasco de Dewar de paredes duplas, e uma bobina de cobre de condutividade normal (leste) de tamanho igual, imersa em ar líquido em um recipiente de parede simples. A bobina de cobre, cuja ligação à fonte da corrente e ao galvanômetro não é mostrada, calibra e monitora a corrente persistente na bobina supercondutora. Quando as duas correntes são iguais, a bússola aponta diretamente para o norte (cortesia do Museu Boerhaave).



Physics Today

teslas). Hoje em dia os dipolos magnéticos de 8 teslas do Grande Colisor de Hádrons do CERN se aproximam desse sonho, mas só o conseguem com um liga de nióbio e titânio cujo campo magnético crítico está muito acima daqueles dos supercondutores conhecidos do tempo de Kamerlingh Onnes.

CORRENTES PERSISTENTES

Kamerlingh Onnes passou então a se concentrar na questão sobre quão pequena seria de fato a resistência “microrresidual” no estado supercondutor. Ele elaborou um experimento para medir a fase de decaimento de uma corrente induzida magneticamente em um laço fechado supercondutor – uma pequena bobina de espirais múltiplas de fio de chumbo resfriada a 1,8 K. Para investigar o decaimento da corrente que circulava no laço fechado após o ímã de indução ser removido, ele usou a agulha de uma bússola, colocada perto do criostato e precisamente a leste. Para calibrar a supercorrente, ele colocou uma bobina de cobre quase idêntica no outro lado da bússola (ver Figura 5).

Kamerlingh Onnes relatou seus primeiros resultados à KNAW em 24 de abril de 1914:

“Por uma hora não se observou um decaimento sensível da corrente [de 0,6 A]. [...] Em Leiden, uma bobina resfriada em hélio líquido à qual seja fornecida uma corrente e mantida imersa em hélio líquido pode ser transportada a uma distância considerável e ser usada para demonstrar a ação magnética permanente de um supercondutor conduzindo uma corrente. Eu teria ficado contente em demonstrar esse fenômeno nesta reunião assim como eu trouxe aqui o hidrogênio líquido em 1906, mas os equipamentos à minha disposição ainda não permitem o transporte do hélio líquido” (Onnes, 1914).

Duas décadas mais tarde, esse espetáculo itinerante já se tornara possível. Em 1932, seis anos após a morte de Kamerlingh Onnes, Flim viajou de avião a Londres com um

frasco de Dewar portátil contendo um anel de chumbo imerso em hélio líquido e conduzindo uma corrente persistente de 200 A. Ele fez a viagem para demonstrar o efeito mais sensacional da supercondutividade, em uma tradicional palestra noturna de sexta-feira na Royal Institution, no mesmo local solene onde James Dewar demonstrara a liquefação do hidrogênio em 1899.

A observação de uma corrente persistente em 1914 era a prova definitiva de que a supercondutividade era de fato um fenômeno inteiramente novo. A empolgação se espalhou rapidamente. Paul Ehrenfest, que tinha testemunhado a experiência, disse a Hendrik Lorentz que ficara pasmo.

“Presenciei uma experiência fascinante no laboratório. [...] Foi inquietante observar o efeito dessa corrente ‘permanente’ em uma agulha magnética. É quase palpável o modo como o anel de elétrons dá voltas no fio, lenta e praticamente sem fricção” (Ehrenfest, 1914).

Ehrenfest sugeriu a Kamerlingh Onnes que a experiência poderia ser realizada da mesma forma com um anel de chumbo em vez de uma bobina com múltiplas espirais, o que funcionou perfeitamente. A equipe de Leiden mediu uma corrente persistente de 320 A em um anel de chumbo com uma seção cruzada retangular de 3 x 3,5 mm².

Kamerlingh Onnes concluiu corretamente que a densidade da corrente era uma grandeza limitadora importante. Porém, a densidade de corrente calculada por ele, de 30 A/mm², era muito baixa. Como sabemos hoje, as supercorrentes são confinadas em uma camada superficial fina de umas poucas centenas de nanômetros de espessura – a profundidade de penetração supercondutora introduzida pelos teóricos Fritz e Heinz London vinte anos mais tarde (London & London, 1935).

Mais duas décadas se passariam até que John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer produzissem a primeira teoria microscópica satisfatória da supercondutividade (Bardeen, Cooper & Schrieffer, 1957).

BIBLIOGRAFIA

- BARDEEN, J.; COOPER, L. N.; SCHRIEFFER, J. R. *Phys. Rev.* 106, 1957, p. 162.
- DAHL, P. F. *Superconductivity, Its Historical Roots and Development from Mercury to the Ceramic Oxides*. Nova York, American Institute of Physics, 1992.
- EHRENFEST, P. Inventário nº 20, Arquivo Hendrik Lorentz, Arquivo da Holanda do Norte, Haarlem, Holanda, 11 de abril de 1914.
- LONDON, F.; LONDON, H. *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 149, 71, 1935.
- ONNES, H. Kamerlingh. Cadernos de Pesquisa 56 e 57. Arquivo Kamerlingh Onnes. Leiden, Museu Boerhaave, s.d.
- _____. *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden* 119b, 1911a (reimpresso em *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 13, 1.107, 1911).
- _____. *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden* 123a, 1911b (reimpresso em *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 14, 204, 1911).
- _____. *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden Suppl.* 29, 1911c.
- _____. *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden* 120b, 1911d (reimpresso em *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 13, 1.274, 1911).
- _____. *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden* 122b, 1911e (reimpresso em *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 14, 113, 1911).
- _____. *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden* 133d, maio de 1913 (reimpresso em *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 16, 1913).
- _____. *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden* 139f, fevereiro de 1914 (reimpresso em *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 16, 987, 1914).
- _____. *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden* 140c, maio de 1914 (reimpresso em *Proc. K. Ned. Akad. Wet.* 17, 278, 1914).
- ONNES, H. Kamerlingh; CLAY, J. *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden* 95d, junho de 1906.
- OUBOTER, R. de Bruyn. *IEEE Trans. Magn.* 23, 1987