

SUPERFLUIDEZ DO HÉLIO

Introdução

Um dos problemas experimentais importantes em criogenia é a medida de temperaturas. No intervalo 300 a 4,2 K, vários termômetros são utilizados, como, por exemplo, resistores de vidro de carbono (carbon-glass), resistores de platina (usualmente para temperaturas acima de 30 K), termopares de cromel-alumel (tipo K, para temperaturas acima de 77 K), termopares (Fe-Au)-cromel (para todo o intervalo citado) e diodos de AsGa, entre outros. Em geral, a sensibilidade de todos esses termômetros diminui drasticamente à medida que nos aproximamos da temperatura do Hélio líquido (LHe). Se quisermos trabalhar abaixo de 4,2 K, como freqüentemente acontece, precisamos lançar mão de termômetros apropriados, que apresentem alta variação de suas propriedades termométricas com pequenas variações de temperatura, em temperaturas tão baixas. Um termômetro que satisfaz essa exigência é o de resistor de filme de carbono, que pode apresentar alta sensibilidade, dependendo de seu processo de fabricação.

Normalmente, obtemos temperaturas abaixo da ambiente e até 4,2 K utilizando LN₂ e LHe em um criostato ou dewar, e um variador de temperatura, normalmente um suporte de amostra com um aquecedor e um termômetro, acoplados a um controlador de temperatura. Por exemplo, em nosso laboratório usamos um criostato óptico chamado Varitemp, exatamente porque permite a variação controlada da temperatura da amostra. Quando queremos temperaturas abaixo de 4,2 K, a maneira mais fácil é usar a propriedade de que a temperatura de ebulição de um líquido depende da pressão a que ele está submetido. Em geral, abaixando-se a pressão abaxamos também a temperatura de ebulição. Isso pode ser usado no caso do LHe. A dependência da temperatura de ebulição do LHe com a pressão de vapor foi determinada experimentalmente e é dada na tabela I em anexo .

Como sabemos, quando abaxamos a temperatura do LHe, ele sofre uma transição de fase a 2,17 K e 37,80 mmHg para uma fase superfluida, em que a condutividade térmica do fluido é muito alta e sua viscosidade é zero. Nessas condições, o LHe, que normalmente mostra muitas bolhas, deixa de fazê-lo, pois todo o calor é conduzido imediatamente para as paredes do recipiente que contém o LHe, eliminando as bolhas. A evaporação do He superfluido se dá ao longo das paredes do recipiente que o contém, pois ele forma um filme que "escala" essas paredes até encontrar uma região de temperatura alta o suficiente para evaporar. O desaparecimento brusco das bolhas de evaporação permitem a observação visual da transição normal-superfluido.

Neste experimento temos como objetivo observar a transição de fase normal- superfluido para o He e, aproveitando o aparato para bombeamento do LHe, temos como segundo objetivo variar lentamente a pressão de vapor do LHe e calibrar um resistor de carbono como termômetro no intervalo de 4,2 a- 1,8 K. Também observaremos o efeito "Meissner" em supercondutores

Aparato Experimental

Nosso equipamento de medida (ver experimento anterior) é relativamente complexo e deve ser manipulado com muito cuidado, sempre com a assistência do professor ou do auxiliar. Em particular, nunca faça uma ação se você está inseguro a respeito dos efeitos dela. Siga sempre a regra: na dúvida, não faça, pergunte. O aparato que vamos usar consiste de um criostato

de pesquisa óptico tipo Varitemp, com a câmara de LHe ligada à câmara de amostra através de um capilar controlado por uma válvula agulha. Esse criostato está ligado a um sistema de alto vácuo, para o isolamento térmico das suas diversas câmaras; está ligado também a uma "árvore" de válvulas que o conecta à linha de recuperação de He. No nosso caso, essa árvore está também ligada a uma potente bomba mecânica, de alta vazão, que é usada para bombear o LHe, e a um manômetro em U de mercúrio, que permite medir a pressão de vapor do LHe em relação à pressão atmosférica, que em Campinas pode ser tomada como 715 mmHg. As válvulas estão dispostas de modo que se pode isolar a câmara de amostra do Varitemp da linha de recuperação de He e conectá-la à bomba mecânica, de modo a abaixar a pressão de vapor do LHe. Uma válvula agulha permite a regulagem fina do bombeamento.

Procedimento

a) Superfluidez

Em primeiro lugar observaremos a transição normal-superfluido. Para isso, faremos a transferência de LHe. Em seguida, a câmara de He será pressurizada, fechando-se a válvula que a liga à linha de recuperação de He, e encheremos a câmara de amostra com LHe. Esse He poderá ser observado através da janela óptica. Quando essa câmara estiver cheia, a câmara de He será despressurizada, e a câmara de amostra será bombeada. Os alunos deverão observar a janela óptica, iluminando-a com uma lanterna, para poder enxergar o momento da transição de fase.

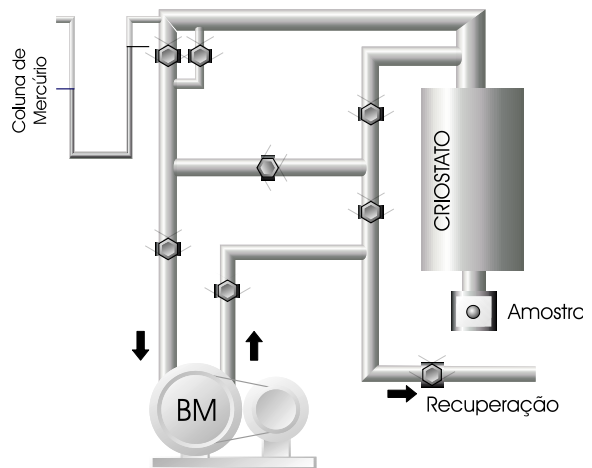


Figura 1: Montagem Experimental.

b) Taxa de evaporação de hélio líquido

Neste experimento o grupo deverá medir também a taxa de evaporação de hélio. Após o preenchimento da camisa de nitrogênio e da transferência de hélio, meça o nível do hélio usando o provador, que é um tubo fino de aço inox que termina em uma peça cônica fechada com uma membrana de borracha, e que vibra em consonância com vibrações termo-acústicas típicas de hélio líquido gasoso em temperaturas muito próximo à de ebulição (leia artigo em anexo). Como o gás tem frequência dessas oscilações termo-acústicas diferente da do hélio, esse dispositivo simples permite medir o nível de hélio dentro do criostato. Deve-se então construir uma tabela de altura do líquido em função do tempo. O criostato deve ser medido, de modo que se tenham as suas dimensões importantes. Em seguida, deve-se fazer uma estimativa dos diversos fluxos de calor pelos diferentes mecanismos, e com essa estimativa, deve-se estimar qual é a taxa de evaporação esperada, e comparar com a taxa medida experimentalmente.

RELATÓRIO

I – Introdução – Destaque os objetivos e a motivação para o estudo do experimento

II – Descrição do procedimento – descreva detalhadamente como o experimento foi realizado. Descreva o dispositivo e o procedimento usado para a medida do nível do Hélio usando o efeito thermo-acústico.

III - Resultados – descreva os resultados obtidos.

IV - Discussões dos resultados:

- a) Discuta os resultados obtidos e descreva as características básicas de Hélio superfluido.
- b) Descreva os procedimentos convencionais para se obter temperaturas baixas para várias faixas, desde pequenos valores como em geladeiras domésticas até temperaturas da ordem de mK, usando desmagnetização isentrópica (que utiliza variações na entropia).

V – Conclusões

Literatura: *Cryogenics, Michael McClintock*
 Advanced Cryogenics, C. A. Bailey
 Cryogenics Fundamentals, G. G. Haselden
 Cryogenics – Research and Applications, Marshall Sittig
 Artigo: J. Gaffney and J.R. Clement, "Liquid Helium Level-finder", Review of
 Scientific Instruments, 26 (6) 620 (1955)

Tabela adicional

Pressão de Vapor – Temperatura do Hélio

P (mmHg)	³He (K)	⁴He (K)			
			100	1,7881	2,6354
800	3,2395	4,2700	90	1,7387	2,5781
780	3,2152	4,2427	80	1,6856	2,5163
760	3,1905	4,2150	70	1,6279	2,4489
740	3,1653	4,1868	60	1,5646	2,3745
720	3,1396	4,1580	50	1,4939	2,2911
700	3,1134	4,1287	45	1,4550	2,2450
680	3,0866	4,0989	40	1,4131	2,1952*
660	3,0594	4,0684	35	1,3676	2,1413
640	3,0315	4,0373	30	1,3176	2,0827
620	3,0030	4,0056	25	1,2617	2,0174
600	2,9739	3,9731	20	1,1978	1,9427
580	2,9441	3,9399	18	1,1692	1,9092
560	2,9136	3,9059	16	1,1384	1,8729
540	2,8824	3,8711	14	1,1049	1,8333
520	2,8504	3,8354	12	1,0679	1,7893
500	2,8175	3,7987	10	1,0266	1,7396
480	2,7838	3,7611	9	1,0038	1,7120
460	2,7491	3,7224	8	0,9791	1,6820
440	2,7133	3,6825	7	0,9523	1,6490
420	2,6765	3,6414	6	0,9227	1,6123
400	2,6385	3,5990	5	0,8894	1,5707
380	2,5992	3,5551	4	0,8512	1,5221
360	2,5586	3,5097	3,5	0,8295	1,4943
340	2,5164	3,4625	3	0,8055	1,4632
320	2,4726	3,4134	2,5	0,7785	1,4277
300	2,4269	3,3622	2	0,7474	1,3863
290	2,4033	3,3357	1,5	0,7101	1,3359
280	2,3792	3,3086	1	0,6624	1,2699
270	2,3545	3,2808	0,9	0,6508	1,2536
260	2,3292	3,2524	0,8	0,6383	1,2359
250	2,0333	3,2231	0,7	0,6246	1,2162
240	2,2767	3,1931	0,6	0,6093	1,1942
230	2,2493	3,1622	0,5	0,5920	1,1691
220	2,2212	3,1304	0,4	0,5720	1,1395
210	2,1922	3,0976	0,3	0,5477	1,1032
200	2,1623	3,0637	0,2	0,5163	1,0554
190	2,1314	3,0287	0,1	0,4693	0,9814
180	2,0994	2,9924	0,08	0,4556	0,9595
170	2,0663	2,9546	0,06	0,4391	0,9325
160	2,0319	2,9153	0,04	0,4174	0,8967
150	1,9959	2,8744	0,02	0,3844	0,8407
140	1,9585	2,8315	0,01	0,3557	0,7907
130	1,9192	2,7865	0,005	0,3305	
120	1,8779	2,7390	0,001	0,2829	
110	1,8343	2,6888			

* - Transição do He^I para He^{II} em
T = 2,1720K
P = 37,80mm Hg

SUPERCONDUTIVIDADE

Só após 46 anos da descoberta da supercondutividade por Onnes é que surgiu uma explicação bem sucedida do fenômeno. Em 1957, os físicos John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer apresentaram um modelo teórico que concordava muito bem com as observações experimentais nos supercondutores. Esse modelo ficou conhecido por Teoria BCS, das iniciais dos autores, e lhes rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1972. Bardeen já recebera outro Nobel pela invenção do transistor e, até hoje, foi o único a receber dois prêmios de Física.

Nos anos seguintes à descoberta da supercondutividade por Onnes, muitos materiais supercondutores foram encontrados, quase todos metálicos. No entanto, todos tinham temperaturas críticas baixíssimas. Até o início da década de 80, o recorde era o Nb_3Ge , com T_C perto de 23 K (-250°C). Para piorar o quadro, a teoria BCS indicava que dificilmente supercondutores com temperaturas críticas acima de 25 K seriam encontrados. Mas, em 1986, dois físicos que trabalhavam no laboratório da IBM em Zurich, Alemanha, mudaram tudo ao descobrir que um material cerâmico, um óxido de cobre com bário e lantânio, ficava supercondutor a 30K. A notícia se espalhou rapidamente e vários outros compostos foram descobertos por laboratórios de todo o mundo, com temperaturas críticas cada vez mais elevadas. Até que, em Janeiro de 1987, Paul Chu, da Universidade de Houston, mostrou que o $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ era supercondutor com uma incrível temperatura crítica acima de 90 K. A figura 2 ilustra a dependência da resistência com a temperatura deste tipo de supercondutor.

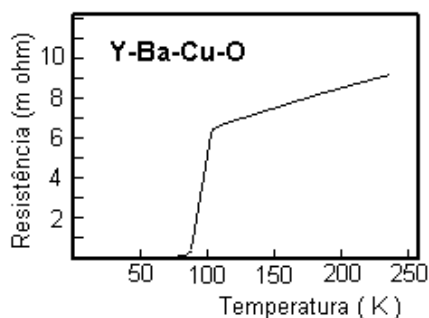


Figura 1 – ilustração da dependência da resistência de um supercondutor cerâmico.

Hoje já são conhecidos supercondutores com temperatura crítica acima de 130 K. A grande vantagem de um supercondutor ter temperatura de transição acima de 77 K vem do fato de ser esta a temperatura de liquefação do nitrogênio. O nitrogênio é o elemento mais abundante de nossa atmosfera (~80%) e é relativamente barato e fácil de liquefazer. Portanto, quando se fala de supercondutores de alto T_C , estamos falando em temperaturas críticas ainda muito baixas, da ordem de -150°C . Outra grande beleza desses materiais é que eles são relativamente fáceis de serem sintetizados. Hoje, isso já é até projeto de Feira de Ciência de estudantes de segundo grau. Uma receita (em inglês) pode ser encontrada na Internet em <http://imr.chem.binghamton.edu>. Ao que parece, até agora ainda não surgiu

nenhuma teoria satisfatória para explicar o mecanismo da supercondutividade nessas cerâmicas. Desde o início ficou mais ou menos claro que a teoria BCS não funciona a contento para esses supercondutores.

EXPERIMENTO

Neste experimento utilizaremos o criostato utilizado no experimento 6. Nele se encontra uma cerâmica supercondutora, com temperatura crítica em torno de 90K. Serão realizadas medidas de condutividade em função da temperatura.

Como a pastilha está dentro do criostato, e lembrando que estamos trabalhando com o método de quatro pontas (ver apêndice), é necessário que saibamos com qual conexão estamos lidando, deste modo, o criostato possui indicações em suas conexões, que devem fazer referência às conexões da amostra supercondutora. Assim fizemos então as seguintes discriminações para com as indicações das conexões.



Figura 2 – Indicação dos contatos na amostra supercondutora relacionada com os contatos na saída do criostato.

Antes de se realizarmos qualquer tomada de medida, é necessário que se faça vácuo no sistema. Para isto, liga-se inicialmente a bomba mecânica junto à bomba de apoio, para que seja feito o pré-vácuo da ordem de 10^{-1} a 10^{-2} Torr. Isto feito, já tem vácuo suficiente na “boca” da bomba difusora para colocá-la em uso, e obtermos assim um alto-vácuo.

O passo seguinte é inserir nitrogênio líquido na armadilha (“trap”). Isto deve ser feito, para auxiliar o processo de evacuação e também para proteger o sistema contra um possível fluxo de óleo da bomba difusora, o que causaria uma diminuição na qualidade do vácuo que o sistema é capaz de atingir. Posto o nitrogênio, é possível abrir a válvula de alto vácuo para o restante do sistema (criostato). O vácuo máximo que o sistema consegue atingir está na ordem de 10^{-5} Torr.

A pastilha supercondutora já está fixa dentro do criostato, que neste ponto deve estar a temperatura ambiente. Isto pode ser verificado com o auxílio de um termopar.

Além do termopar, o criostato possui mais oito cabos conectores discriminados através de letras, as quais mantêm a mesma discriminação da pastilha, como ilustrado na figura 3. Os cabos A e D estão associados aos contatos na pastilha em que se deve entrar com a corrente. Os cabos C e B estão associados às conexões reservadas para a leitura da tensão na amostra. Sabendo a corrente e a tensão na pastilha, obtemos sua resistência e em posse de suas dimensões calculamos sua resistividade.

A pastilha constitui-se de um supercondutor do tipo II, cuja temperatura de transição é relativamente alta e assim não é necessário à utilização de hélio líquido para atingir a temperatura de transição. Esta temperatura pode ser alcançada com nitrogênio líquido que com ajuda de um funil é colocado dentro do criostato, no recipiente que seria destinado ao hélio. Como pode ser visto no esquema do criostato no experimento 6 (ver roteiro), existe uma válvula que põe em contato o nitrogênio no mesmo ambiente da pastilha. Assim se começa baixar a temperatura. Também é possível se controlar a pressão que está submetida à amostra através de uma bomba mecânica associada ao sistema. Esta pode ser medida com o auxílio de um tubo em “U” com mercúrio que se encontra instalado junto ao sistema. Com este sistema é possível baixar ainda mais a temperatura do ambiente da pastilha, pois estamos também submetendo o nitrogênio a pressões menores.

Controlando então a entrada de nitrogênio e a pressão no ambiente da pastilha, deve-se tomar a tensão na amostra relacionada à temperatura que a mesma está submetida, que é medida com um termopar. Faz-se isto até que a tensão na amostra seja zerada. No caso de nosso equipamento a tensão em que a amostra é supercondutora irá oscilar em torno do zero, devido à imprecisão do aparelho.

Agradecimentos: agradecemos a colaboração do Gustavo Alexandre Viana, aluno de física do IFGW por sua colaboração na montagem deste experimento.

Referências

- 1) Manual on the use of thermocouples in temperature measurement, American Society for testing and Materials, 1979 (referência na biblioteca do IFGW: R536.52-A512m)
- 2) Sparks, L.L. and Powell, R.L., “Low Temperature Thermocouples: KP, “Normal” Silver, and Copper Versus Au-0.02 at% Fe and Au-0.07 at%Fe,” Journal of Research, National Bureau of Standards, Vol 76A, No. 3, May-June 1972.

RELATÓRIO

I – Introdução – Destaque os objetivos e a motivação para o estudo do experimento

II – Descrição do procedimento – descreva detalhadamente como o experimento foi realizado.

III - Resultados – apresente as curvas de condutividade em função da temperatura dos supercondutores medidos.

IV - Discussões dos resultados:

- a) Descreva o efeito Seebeck e o efeito Peltier.
- b) Faça uma descrição sucinta sobre a supercondutividade e o modelo BCS (Bardeen, Cooper e Schrieffer).
- c) descreva o efeito Meissner

V – Conclusões

APÊNDICE

O MÉTODO DE QUATRO PONTAS

Quando estamos fazendo algumas medidas, principalmente no caso de resistência de materiais, precisamos saber qual a contribuição resistiva dos fios e contatos, para se descontar da medida em que realmente se está interessado em tomar. No caso de medidas em supercondutores, estes cuidados tornam-se ainda mais necessários quando nos atentamos ao fato de que o que queremos é medir a ausência de resistência. É dentro deste quadro que o método de quatro pontas se torna necessário para realizarmos as medidas.

Se usássemos um sistema simples de duas pontas para a medida da tensão na amostra, teríamos o seguinte caso. Ao entrar com a corrente na amostra, esta deveria obrigatoriamente passar pelos contatos, e pelo que já sabemos pela lei de Ohm, iríamos sempre medir uma tensão entre os contatos. No entanto, com o auxílio de um sistema de quatro pontas, conseguimos contornar este problema, e o que realmente medimos é a tensão na amostra e não mais nos contatos. As figuras abaixo ajudam a elucidar.

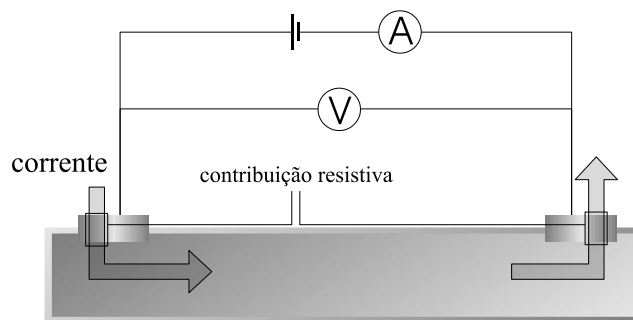


Figura 1 – Medida de resistência com dois contatos.

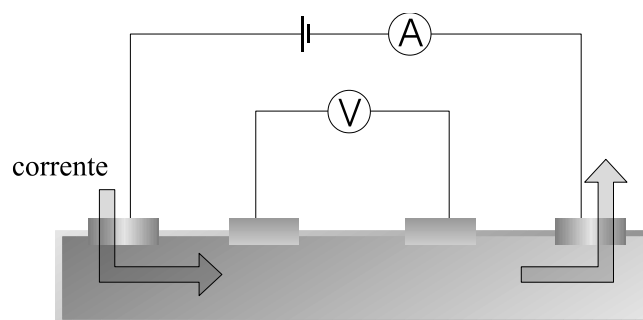


Figura 2 – Medida de resistência com quatro contatos.

Review of Scientific Instruments 26(6) 620 (1955)

Liquid Helium Level-Finder

JOHN GAFFNEY AND J. R. CLEMENT
United States Naval Research Laboratory, Washington 25, D. C.
 (Received March 22, 1955)

It has been known for some time¹ that spontaneous oscillations may occur in a gas-filled tube inserted in a liquid helium cryostat, especially when the end of the tube remaining at room

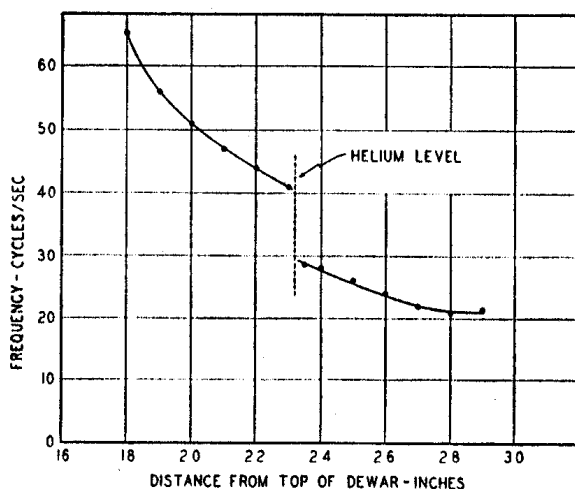


FIG. 1. Frequency of oscillation vs position of cold end for a $\frac{1}{4}$ in. o.d. tube oscillating in a 25-liter storage Dewar.

temperature is closed. Some experiments were carried out in this Laboratory in an effort to obtain more quantitative data concerning this phenomenon.² During the course of these experiments abrupt changes in at least two properties of the oscillations were observed to occur when the cold end of the tube crossed the liquid-vapor boundary. Specifically, when the cold end of a tube containing an oscillating gas column passes from the vapor into the liquid, the frequency of the oscillation decreases about 30 percent, and the intensity of the oscillation decreases about 60 percent. An accurate and extremely simple level finder³ has been developed which depends on one or both of these abrupt changes for its operation.

For convenience, experiments were performed in a commercially available metal storage Dewar. The body of this Dewar is a sphere about $11\frac{1}{2}$ in. in diameter, and it has a filling neck approximately $18\frac{1}{2}$ in. long and $\frac{3}{8}$ in. o.d. When an Inconel tube was inserted in this Dewar, the enclosed gas column began to oscillate when the lower end was approaching the bottom of the filling tube. Figure 1 shows, from that point downward, the course of frequency vs length of tube inserted in the Dewar.

The problem of constructing a level finder which would utilize these effects, yet remain portable and simple to operate, was solved by placing a thin rubber membrane over a machined brass reducer and attaching the reducer to one end of the tube containing the oscillating gas column. A typical construction is illustrated in Fig. 2. The liquid helium level may be easily found by holding the thumb or forefinger over the rubber membrane and noting the point at which the abrupt frequency-intensity change occurs. The reducer at the top of the tube increases the area of contact between the finger and the oscillating gas. With care, helium levels can be measured to within ± 1 mm.

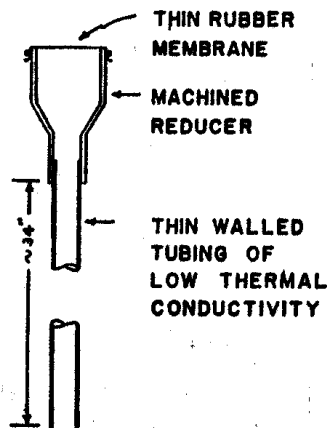


FIG. 2. Sketch of the level finder.

For the tubing containing the oscillating gas column, we have found that $\frac{3}{8}$ in. o.d. thin-walled (0.008-in.) Inconel works very well. If a much smaller diameter tube is used, air may freeze inside the tube, stopping the oscillations. If much larger diameter tubes are used, the oscillations may become so intense that the liquid surface is disturbed, causing the level to become uncertain. Small sections cut from surgical gloves make rugged and sufficiently sensitive membranes. Thinner membranes give greater sensitivity, but may occasionally be broken by intense oscillations.

Since these spontaneous oscillations also occur in tubes inserted in liquid hydrogen Dewars, this level finder may be used for measuring liquid hydrogen levels.

¹ W. H. Keesom, *Helium* (Elsevier Publishing Company, Houston, Texas, 1942), p. 174.

² J. R. Clement and J. Gaffney, Proceedings of the 1954 Cryogenics Engineering Conference, NBS report 3517, February 1955, pp. 227-231.

³ For a bibliography of level finders, see W. T. Kitts and F. L. Harler, *Rev. Sci. Instr.* 25, 926 (1954).