



# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)

## O Hélio Líquido e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1962.

O físico russo Lev Davidovich Landau (1908-1968) recebeu o PNF de 1962 por seu trabalho pioneiro sobre a Física da Matéria Condensada, especialmente o **hélio líquido**. Vejamos como isso aconteceu e, para isso, usaremos alguns verbetes desta série. Em fevereiro de 1906, trabalhando na *Universidade de Leiden*, o físico holandês Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926; PNF, 1913) liquefez o hélio (He) na temperatura de aproximadamente 20,4 K (- 252,7<sup>0</sup> C). Mais tarde, em julho de 1908, ele voltou a liquefazer esse elemento químico, agora na temperatura de 4,2 K (- 268,9<sup>0</sup> C). No começo de 1911, Onnes descobriu que a densidade do He líquido atingia um valor máximo na temperatura de 2,186 K. No entanto, a descoberta que Onnes fez da **supercondutividade** apresentada pelo mercúrio (Hg) na temperatura de 4,2 K, ainda em 1911, levou Onnes a concentrar-se no estudo desse novo fenômeno físico. Somente em 1922, Onnes faria uma nova descoberta sobre o He líquido ao observar que, ao ser colocado em dois **vasos Dewar** (“garrafas térmicas”) concêntricos, os seus níveis atingiam a mesma altura. Mais tarde, em 1924, com o físico norte-americano Leo I. Dana, Onnes observou que o calor específico do He líquido crescia assustadoramente quando se aproximava de 2,186 K. A morte de Onnes, em 1926, e a volta de Dana aos Estados Unidos fizeram com que uma nova descoberta sobre aquele líquido fosse realizada por um aluno de Onnes, o físico holandês William Hendrik Keesom (1876-1956), ao observar (juntamente com o técnico alemão Klaus Clusius), em 1930 (*Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden* **129**), que o calor específico do He líquido apresentava uma anomalia (descontinuidade) em 2,186 K. No princípio, Keesom suspeitou que essa temperatura correspondesse a um ponto triplo (temperatura em que as fases líquida, sólida e gasosa coincidem) e, portanto, abaixo dela, o He estaria na fase sólida como se fosse um *crystal líquido*. No entanto, em 1932, K. W. Taconis, na *Universidade de Leiden*, observou que o He permanecia líquido, antes e depois daquela temperatura. Em vista disso, Keesom denominou essas fases do hélio líquido de He I e He II, respectivamente. Logo em 1933 (*Koninklijke Akademie von Wetenschappen te Amsterdam Proceedings* **36**, p. 147), o físico austríaco Paul Ehrenfest (1180-1933) estudou a descontinuidade do calor específico do He líquido e percebeu que ela representava a forma da letra grega lâmbda ( $\lambda$ ), razão pela qual denominou de **ponto  $\lambda$**  a temperatura em que ocorre essa descontinuidade. Percebeu, também, que a transição da fase He I para a fase He II, que ocorre nessa temperatura (2,186 K) não é do tipo estudada na Termodinâmica, pois elas não coexistiam e nem apresentavam interface entre elas. Ainda em 1933, John Cunningham McLennan (1867-1935), H. Grayson Smith e J. O. Wilhelm observaram um brusco aumento da condutividade térmica do He II, observação essa confirmada, em 1935 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A151**, p. 342), por Wilhelm, E. F. Burton, o físico canadense Austin Donald Misener (1911-1996) e A. R. Clark.

Foi também em 1935 (*Physica* **2**, p. 557) que um novo fenômeno do He II foi registrado: trata-se do **efeito pelicular**, notado por B. V. Rollin, em Oxford, ao notar a formação de películas nas paredes do recipiente que continha o He II. É a partir daí, que Landau começou a se interessar pelo He II e suas propriedades.

Com efeito, em 1936 (*Nature* **138**, p. 840), Landau escreveu um artigo no qual apresentou suas primeiras ideias sobre a transição de fase sofrida pelo He II e que foram formalizadas, em 1937 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **7**, p. 19; 627; *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* **11**, p. 26; 545). Assim, segundo Landau, a transição de fase do **ponto  $\lambda$**  era uma **transição de fase de segunda ordem**, na qual os estados das duas fases são os mesmos, porém em temperaturas diferentes, sem tal transição ser acompanhada de troca de calor, ao contrário do que acontece na **transição de fase termodinâmica**, denominada por Landau de **transição de fase de primeira ordem**. Ainda em 1937 (*Nature* **140**, 62), os físicos, o canadense John Frank Allen (1908-2001), o inglês Rudolph Ernst Peierls (1907-1995) e M. Zaki Uddin desenvolveram uma nova técnica para medir a condutividade térmica do He II. Em 1938 (*Doklady Akademii Nauk SSSR* **18**, p. 21; *Nature* **141**, p. 74), um novo fenômeno físico relacionado com o He II foi observado pelo físico russo Pyotr Leonidovich Kapitza (1894-1984; PNF, 1978) e, independentemente, por Allen e Misener (*Nature* **141**, p. 75) ao determinarem a viscosidade do He II. Em sua pesquisa, Kapitza notou que esse líquido não oferecia resistência à passagem por orifícios cada vez mais estreitos; ele então atribuiu esse fato à resistência nula ao deslocamento do He II, e para esse novo fenômeno físico deu o nome de **superfluidez**. Também em 1938, dois novos fenômenos, ainda relacionados ao He II, foram descobertos: Allen e Harry Jones (*Nature* **141**, p. 243) perceberam o **efeito termomecânico** desse líquido, isto é, um gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ) produzindo um gradiente de pressão ( $\Delta p$ ), e Kurt Mendelssohn descobriu o efeito inverso: **efeito mecanotérmico**. Todas essas propriedades estranhas do He II receberam explicações teóricas, segundo veremos a seguir.

Ainda em 1938 (*Nature* **141**, p. 643; *Physical Review* **54**, p. 1947), o físico alemão Fritz Wolfgang London (1900-1954) sugeriu que a transição de fase do He I para o He II fosse uma **condensação quântica** regida pela **estatística de Bose-Einstein**, de 1926; por sua vez, e também em 1938 (*Nature* **141**, p. 913), o físico húngaro László Tisza (1907-2009) considerou que o He II, ao arrefecer abaixo do **ponto  $\lambda$** , se dividia em duas partes: **normal** e **superfluida**. A **normal** era idêntica ao He I, mas a **superfluida** era formada por átomos **condensados**, sendo que o He II teria nula não só a sua viscosidade, mas também a sua entropia. Portanto, para Tisza, o He II era uma mistura de dois fluidos, enquanto o He I era um fluido normal puro. Assim, com essa teoria, que ficou conhecida como a Teoria dos Dois Fluidos, Tisza explicou qualitativamente os fenômenos do He II conhecidos até então, principalmente o **efeito termomecânico** e o **efeito mecanotérmico**. Em 1941 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **11**, p. 592; *Journal of Physics URSS* **5**, p. 71; *Physical Review* **60**, p. 356), Landau formulou sua Teoria Quântica Hidrodinâmica do He II. Assim, para Landau, os estados quânticos do He II, próximo ao estado fundamental, poderiam ser descritos como um gás de excitações elementares (**quase-partículas**) não interagentes. Desse modo, os níveis de energia desses estados seriam dados por:

$$E_n = E_0 + \sum_{\mathbf{k}} \hbar \omega_{\mathbf{k}} n_{\mathbf{k}} ,$$

onde  $\hbar\omega_k$  é a energia da excitação elementar de número de onda  $k$  (lembrar que  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ ),  $n_k$  é o número de excitações,  $\hbar = h/2\pi$ , sendo  $h$  a **constante de Planck**. Ainda nesse artigo, Landau admitiu que se pudesse aplicar a essas excitações a **estatística de Bose-Einstein**, isto é, que elas poderiam ser consideradas como **bósons** (spin inteiro). Para poder ajustar essa proposta com a curva experimental do calor específico do He II, Landau postulou que o espectro de energia ( $\hbar\omega_k$ ) das excitações elementares era constituído de uma parte retilínea, próximo da origem (correspondente aos **fônons**), e por uma parte curva tipo parábola (**rótons**), com a concavidade voltada para baixo, tendo seu mínimo em torno de  $k_0$ , isto é:

$$\hbar\omega_k = \hbar ck; \quad (k \ll k_0) \quad \hbar\omega_k = \Delta + \frac{\hbar^2(k-k_0)^2}{2\sigma}, \quad (k \approx k_0)$$

onde  $\vec{k} = |\vec{k}|$  e  $\Delta$ ,  $c$ ,  $k_0$ ,  $\sigma$  são constantes que foram ajustadas por Landau para explicar o **ponto  $\lambda$** . Essas duas representações, contudo, não eram contínuas, pois, para Landau, tanto os **fônons** quanto os **rótons** eram **quase-partículas** distintas. Portanto, segundo Landau, o He II era constituído de dois tipos de excitações elementares: **fônons**, na região  $T \rightarrow 0$ , e **rótons** quando  $T > 1$  K. É oportuno destacar que os **fônons** são excitações elementares acústicas de um cristal sólido, e o termo **róton** foi cunhado pelo físico russo Igor Yevgenyevich Tamm (1895-1971; PNF, 1958), por ocasião do seminário em que Landau apresentou essa sua teoria do He II aos seus pares.

Ainda no trabalho de 1941, Landau formulou o conceito de segundo som. Vejamos como. O valor considerado por Landau para a constante  $c$  da expressão acima era acima de 226 m/s, e que representava a velocidade do fônon. Portanto, para Landau, essa velocidade correspondia à velocidade do som no He II. Desse modo, além dessa velocidade, ele previu uma nova forma de movimento ondulatório no He II. Ora, como seu formalismo indicava que esse tipo de movimento era semelhante aos fenômenos acústicos, Landau denominou-o de segundo som, e que correspondia à propagação da variação entre as densidades normal ( $\rho_n$ ) e superfluida ( $\rho_s$ ) do He II, sem alterar a densidade total  $\rho$  ( $\rho = \rho_n + \rho_s$ ). É interessante registrar que, em 1944, o físico russo Evgenil Mikhaillovich Lifshitz (1915-1985) observou que o segundo som era uma onda térmica e não uma onda acústica como pensara Landau. Também em 1944, o físico russo V. S. Peshkov calculou, na temperatura de 1,6 K, a velocidade do **segundo som** como sendo de 19 m/s, enquanto valor teórico previsto por Landau era de 25 m/s.

Apesar do sucesso dessa teoria de Landau sobre a **superfluidez** do He II, ela apresentava algumas dificuldades, como, por exemplo, não considerava a turbulência do superfluido, conforme fora registrado por Kapitza, em 1941. Esse efeito foi levado em consideração pelo químico norueguês Lars Onsager (1903-1976; PNQ, 1968), em 1949, ao sugerir que as **linhas de vórtex** do He II poderiam ser quantizadas em unidades de  $\hbar/m$ . Registre-se que, ainda em 1949 (*Physica* **15**, p. 733), Taconis, J. J. M. Beenakker, A. O. C. Nier e L. T. Audrey mediram o equilíbrio vapor-líquido de soluções de He-3 (sobre esse isótopo do He ver verbete nesta série) e He-4 em temperaturas abaixo de 2,19 K.

Os trabalhos de Landau e de Onsager foram retomados, em 1954 (*Physical Review* **94**, p. 262), pelo físico norte-americano Richard Phillips Feynman (1918-1988; PNF,

1965) ao considerar o He II como um fluido quântico e, como Onsager, admitiu que o mesmo pudesse formar turbilhões quantizados de corrente. Nesse trabalho, Feynman admitiu que o He II poderia formar **turbilhões** de corrente, e que os mesmos poderiam ser quantizados. Demonstrou, também, quem as excitações elementares do He II (**fônons** e **rotóns**) previstas por Landau, em 1941 (como vimos acima), decorriam da condensação de um **gás de Bose-Einstein**, e eram representadas por uma função schrödingeriana do tipo:  $\psi_{\vec{k}} = A \sum_j \exp(i\vec{k} \cdot \vec{r}_j) \psi_0$ , onde  $\psi_0$  é a função de onda do estado fundamental e  $\vec{k}$  e o momento linear da excitação elementar.

Novos trabalhos sobre a **superfluididez** do He II foram realizados por Landau ainda na década de 1940. Com efeito, em 1944 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **14**, p. 112; *Journal of Physics URSS* **8**, p. 1), ele tratou da hidrodinâmica desse **superfluido** considerando-o como um **líquido quântico**; em 1947 (*Journal of Physics URSS* **11**, p. 91) e 1948 [*Doklady Akademii Nauk SSSR* **61**, p. 253; *Physical Review* **75**, p. 884 (1949)], Landau desenvolveu a **Teoria da Superfluididez**. Novos aspectos da **superfluididez** do He II foram pesquisados por Landau e seus colaboradores. Assim, ainda em 1948, ele e o físico russo Isaak Yakovlevich Pomeranchuk (1913-1966) examinaram o movimento de partículas estranhas naquele **superfluido** (*Doklady Akademii Nauk SSSR* **59**, p. 669); ele e o físico russo Isaak Markovich Khalatnikov (n.1919), em 1948 (*Izvestiya Akademii Nauk SSSR Seriya Fizicheskaya* **12**, p. 216) e, em 1949 (*Zhurnal Eksperimental'noi i Teoretiskoi Fiziki* **19**, p. 637; 709), apresentaram a **Teoria da Viscosidade** do He II, na qual investigaram a colisão de excitações elementares (**quase-partículas**) nesse **superfluido** e realizaram o cálculo do **coeficiente de viscosidade**. Em 1955 (*Doklady Akademii Nauk SSSR* **100**, p. 669), Landau e Lifshitz usaram um modelo de estrutura laminar para estudar a rotação do He II.

É oportuno destacar que, no dia 07 de janeiro de 1962, Landau sofreu um grave acidente automobilístico quando seu carro colidiu com um caminhão que vinha em sentido contrário, quebrando vários ossos e, durante a hospitalização, ficou seis semanas em coma. Depois desse acidente, Landau nunca mais recuperou sua total capacidade criativa em Física. Foi por essa razão que ele não esteve presente em Estocolmo para receber o PNF1962 e sua *Nobel Lecture* não foi escrita. No dia da cerimônia, 11 de dezembro de 1962, o físico sueco Ivar Waller (1898-1991), Membro do *Comitê Nobel de Física*, apresentou uma Biografia Científica de Landau.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)