

**Une découverte**  
**dans la tourmente:**  
**la superfluidité**

***Sébastien Balibar***

***Laboratoire Pierre Aigrain***

***Ecole Normale Supérieure & CNRS (Paris)***

# **1937- 41: la physique quantique devient visible à l'oeil nu**

**Qui a découvert la superfluidité?**

**Qui a initié la théorie de la superfluidité?**

**Dans quelles conditions les 5 acteurs principaux, dont 2 prix Nobel, ont-ils travaillé, malgré la montée du nazisme et du stalinisme, et la deuxième guerre mondiale?**

**et après? supraconductivité, gaz froids quantiques ...**

# Janvier 1938: deux articles côte à côte

74

NATURE

JAN. 8, 1938, VOL. 141

## Letters to the Editor

The Editor does not hold himself responsible for opinions expressed by his correspondents. He cannot undertake to return, or to correspond with the writers of, rejected manuscripts intended for this or any other part of NATURE. No notice is taken of anonymous communications.

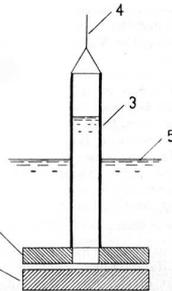
NOTES ON POINTS IN SOME OF THIS WEEK'S LETTERS APPEAR ON P. 83.

CORRESPONDENTS ARE INVITED TO ATTACH SIMILAR SUMMARIES TO THEIR COMMUNICATIONS.

### Viscosity of Liquid Helium below the $\lambda$ -Point

THE abnormally high heat conductivity of helium II below the  $\lambda$ -point, as first observed by Keesom, suggested to me the possibility of an explanation in terms of convection currents. This explanation would require helium II to have an abnormally low viscosity; at present, the only viscosity measurements on liquid helium have been made in Toronto<sup>1</sup>, and showed that there is a drop in viscosity below the  $\lambda$ -point by a factor of 3 compared with liquid helium at normal pressure, and by a factor of 8 compared with the value just above the  $\lambda$ -point. In these experiments, however, no check was made to ensure that the motion was laminar, and not turbulent.

The important fact that liquid helium has a specific density  $\rho$  of about 0.15, not very different from that of an ordinary fluid, while its viscosity  $\mu$  is very small comparable to that of a gas, makes its kinematic viscosity  $\nu = \mu/\rho$  extraordinary small. Consequently when the liquid is in motion in an ordinary viscosimeter, the Reynolds number may become very high, while in order to keep the motion laminar, especially in the method used in Toronto, namely, the damping of an oscillating cylinder, the Reynolds number must be kept very low. This requirement was not fulfilled in the Toronto experiments, and the deduced value of viscosity thus refers to turbulent motion, and consequently may be higher by any amount than the real value.



flat, the gap between them being adjustable by mica distance pieces. The upper disk, 1, was 3 cm. in diameter with a central hole of 1.5 cm. diameter, over which a glass tube (3) was fixed. Lowering and raising this plunger in the liquid helium by means of the thread (4), the level of the liquid column in the

tube (3) could be set above or below the level (5) of the liquid in the surrounding Dewar flask. The amount of flow and the pressure were deduced from the difference of the two levels, which was measured by cathetometer.

The results of the measurements were rather striking. When there were no distance pieces between the disks, and the plates 1 and 2 were brought into contact (by observation of optical fringes, their separation was estimated to be about half a micron), the flow of liquid above the  $\lambda$ -point could be only just detected over several minutes, while below the  $\lambda$ -point the liquid helium flowed quite easily, and the level in the tube (3) settled down in a few seconds. From the measurements we can conclude that the viscosity of helium II is at least 1,600 times smaller than that of helium I at normal pressure.

The experiments also showed that in the case of helium II, the pressure drop across the gap was proportional to the square of the velocity of flow, which means that the flow must have been turbulent. If, however, we calculate the viscosity, assuming the flow to have been laminar, we obtain a value of the order  $10^{-9}$  c.g.s., which is evidently still only an upper limit to the true value. Using this estimate, the Reynolds number, even with such a small gap, comes out higher than 50,000, a value for which turbulence might indeed be expected.

We are making experiments in the hope of still further reducing the upper limit to the viscosity of liquid helium II, but the present upper limit (namely,  $10^4$  c.g.s.) is already very striking, since it is more than  $10^4$  times smaller than that of hydrogen gas (previously thought to be the fluid of least viscosity). The present limit is perhaps sufficient to suggest, by analogy with supraconductors, that the helium below the  $\lambda$ -point enters a special state which might be called a 'superfluid'.

As we have already mentioned, an abnormally low viscosity such as indicated by our experiments might indeed provide an explanation for the high thermal conductivity, and for the other anomalous properties observed by Allen, Peierls, and Uddin<sup>2</sup>. It is evidently possible that the turbulent motion, inevitably set up in the technical manipulation required in working with the liquid helium II, might on account of the great fluidity, not die out, even in the small capillary tubes in which the thermal conductivity was measured; such turbulence would transport heat extremely efficiently by convection.

P. KAPITZA.

Institute for Physical Problems,  
Academy of Sciences,  
Moscow.  
Dec. 3.

<sup>1</sup> Burton, NATURE, 135, 265 (1935); Wilhelm, Misener and Clark, Proc. Roy. Soc., A, 151, 342 (1935).  
<sup>2</sup> NATURE, 140, 62 (1937).

No. 3558, JAN. 8, 1938

NATURE

75

### Flow of Liquid Helium II

A SURVEY of the various properties of liquid helium II has prompted us to investigate its viscosity more carefully. One of us<sup>1</sup> had previously deduced an upper limit of  $10^{-8}$  c.g.s. units for the viscosity of helium II by measuring the damping of an oscillating cylinder. We had reached the same conclusion as Kapitza in the letter above; namely, that due to the high Reynolds number involved, the measurements probably represent non-laminar flow.

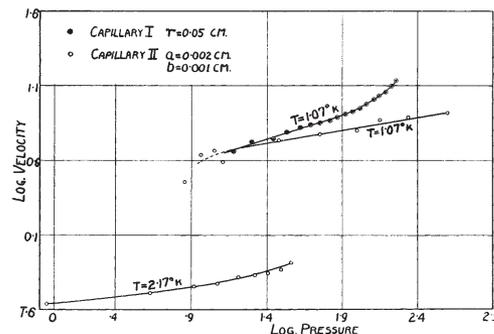
The present data were obtained from observations on the flow of liquid helium II through long capillaries. Two capillaries were used; the first had a circular bore of radius 0.05 cm. and length 130 cm., and drained a reservoir of 5.0 cm. diameter; the second was a thermometer capillary 93.5 cm. long and of elliptical cross-section with semi-axes 0.001 cm. and 0.002 cm., which was attached to a reservoir of 0.1 cm. diameter. The measurements were made by raising or lowering the reservoir with the attached capillary so that the level of liquid helium in the reservoir was a centimetre or so above or below that of the surrounding liquid helium bath. The rate of change of level in the reservoir was then determined from the cathetometer eye-piece scale and a stopwatch; measurements were made until the levels became coincident. The data showing velocities of flow through the capillary and the corresponding pressure difference at the ends of the capillary are given in the accompanying table and plotted on a logarithmic scale in the diagram.

Capillary I		Capillary II			
$T=1.07^{\circ}\text{K.}$		$T=1.07^{\circ}\text{K.}$		$T=2.17^{\circ}\text{K.}$	
Velocity (cm./sec.)	Pressure (dynes)	Velocity (cm./sec.)	Pressure (dynes)	Velocity (cm./sec.)	Pressure (dynes)
13.9	183.5	8.35	402	0.837	36.6
11.5	154.5	6.92	215	0.757	31.3
10.3	127.7	6.88	143	0.715	26.1
9.0	105.0	6.30	101	0.685	21.1
8.2	83.5	6.05	56	0.655	16.4
7.5	67.7	5.55	30	0.609	12.1
6.9	49.3	4.70	11.3	0.570	8.3
6.1	34.1	4.39	9.2	0.525	4.3
5.2*	20.3	3.92	13.0	0.433	0.9
4.5*	15.2	2.88	7.2		

The following facts are evident:

- The velocity of flow,  $q$ , changes only slightly for large changes in pressure head,  $p$ . For the smaller capillary, the relation is approximately  $p \propto q^2$ , but at the lowest velocities an even higher power seems indicated.
- The velocity of flow, for given pressure head and temperature, changes only slightly with a change of cross-section area of the order of  $10^3$ .
- The velocity of flow, for given pressure head and given cross-section, changes by about a factor of 10 with a change of temperature from  $1.07^{\circ}\text{K.}$  to  $2.17^{\circ}\text{K.}$
- With the larger capillary and slightly higher velocities of flow, the pressure-velocity relation is approximately  $p \propto q^2$ , with the power of  $q$  decreasing as the velocity is increased.

If, for the purpose of calculating a possible upper limit to the viscosity, we assume the formula for laminar flow, that is,  $p \propto \eta q$ , we obtain the value  $\eta = 4 \times 10^{-9}$  c.g.s. units. This agrees with the upper limit given by Kapitza who, using velocities of flow considerably higher than ours, has obtained



the relation  $p \propto q^2$  and an upper limit to the viscosity of  $\eta = 10^{-9}$  c.g.s. units.

The observed type of flow, however, in which the velocity becomes almost independent of pressure, most certainly cannot be treated as laminar or even as ordinary turbulent flow. Consequently any known formula cannot, from our data, give a value of the 'viscosity' which would have much meaning. It may be possible that the liquid helium II slips over the surface of the tube. In this case any flow method would be incapable of showing the 'viscous drag' of the liquid.

With regard to the suggestion that the high thermal conductivity of helium II might be explained by turbulence, we have calculated that the flow velocity necessary to transport all the heat input over the observed temperature gradient in the Allen, Peierls and Uddin experiments<sup>2</sup> is about  $10^4$  cm./sec. On the other hand, the greatest flow velocity produced by manipulation and by the pressure difference along the thermal conduction capillary will not be likely to be greater than 50 cm./sec. It seems, therefore, that undamped turbulent motion cannot account for an appreciable part of the high thermal conductivity which has been observed for helium II.

J. F. ALLEN.  
A. D. MISENER.

Royal Society Mond Laboratory,  
Cambridge.

Dec. 22.

<sup>1</sup> Burton, E. F., NATURE, 135, 265 (1935).  
<sup>2</sup> Allen, Peierls and Uddin, NATURE, 140, 62 (1937).

### Some Experiments at Radio Frequencies on Supraconductors

MEASUREMENTS were made on an extruded tin wire carrying an alternating current of a frequency of about 200 kilocycles per second superposed on a direct current. The resulting magnetic field at the surface of the wire was thus caused to pulsate cyclically.

# Janvier 1938: deux articles côte à côte



***Nature n°141, p. 74*** (received Dec. 3, 1937) :  
***P. Kapitza: « Viscosity of liquid helium below the lambda point »: en dessous de 2,2K, écoulement très rapide dans une fente de 0,5 microns entre 2 disques polis.***



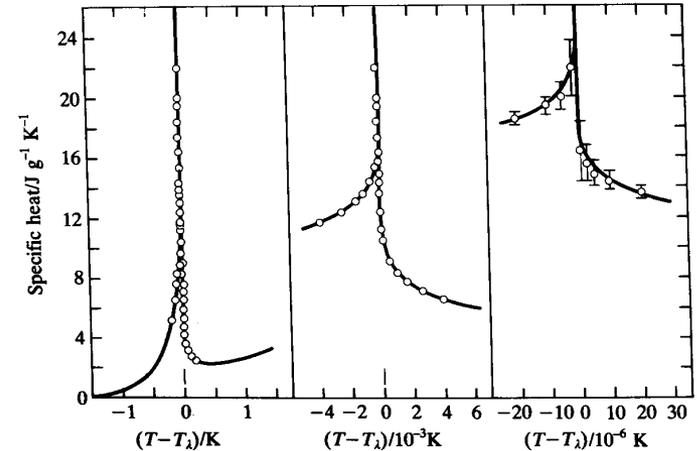
***Nature n°141, p. 75*** (received Dec. 22, 1937) : ***JF Allen et A.D. Misener: « Flow of liquid helium II »: le long de fins capillaires, à 1.07K, l'écoulement est indépendant de la pression et même du diamètre du capillaire (de 10 microns à 1 mm)***

# **L'hélium à basse température**

## *préhistoire de la découverte 1927-1937*

**1927-32: W.H. Keesom, M. Wolfke and K. Clusius (Leiden):** une singularité dans la courbe de chaleur spécifique (le « point lambda »)

**deux états différents qu'ils appellent « helium I » à  $T > 2.2\text{K}$  et « helium II » à  $T < 2.2\text{K}$ .**



*Buckingham and Fairbank 1961*

**1932: McLennan et al. (Toronto):** He liquide cesse de bouillir à  $T < 2.2\text{K}$

**B.V. Rollin (Oxford, 1935 sous la direction de F. Simon), W.H. Keesom and A. Keesom (Leiden, 1936) :** films mobiles sur parois

**J.F. Allen R. Peierls and M.Z. Uddin (Cambridge, 1937) :**

**helium II est un excellent conducteur thermique (par convection ?)**

*le film de J.F. Allen et J. Armitage*  
*(St Andrews, 1971 - 82)*

SUPERFLUID

HELIUM

# *l'écoulement d'un superfluide*

Superleak



# Piotr Kapitza a-t-il trouvé le premier ?

*Allen et Misener citent leur concurrent Kapitza:*

*« une revue des propriétés de l'hélium liquide nous a incités à étudier sa viscosité avec plus d'attention. L'un d'entre nous avait déjà trouvé une borne supérieure de  $10^{-5}$  en unités cgs pour la viscosité de l'hélium II en étudiant l'atténuation d'un cylindre oscillant. Nous sommes arrivés à la même conclusion que Kapitza dans la lettre précédente, à savoir que les mesures ne correspondent pas à un écoulement laminaire »*

*19 jours d'avance : ont-ils simplement reproduit les travaux de Kapitza ?*  
**NON**

*Kapitza a été couronné par le **prix Nobel en 1978** (pas Allen ni Misener)*

*Il a aussi inventé le mot « **superfluide** » pour qualifier l'hélium II, cet étrange liquide*

# Piotr Kapitza (1894 – 1984)

*1894: naissance à Kronstadt (Russie)*

*1918: doctorat en génie électrique à St Petersburg*

*1921: Cambridge, radioactivité « alpha » avec Rutherford, père de la physique nucléaire et prix Nobel de chimie 1908.*

*1929: Fellow of the Royal Society*

*1934: construit un liquéfacteur d'hélium qui produit ses premières gouttes liquides le 19 avril. Est séquestré en URSS par Staline le 24 septembre, à l'occasion du centenaire de Mendeleiev.*

*1934-37: obtient de Staline la construction d'un Institut pour mener ses recherches, de Cambridge la possibilité de racheter son matériel (sauf son liquéfacteur!), puis de construire un nouveau liquéfacteur à Moscou grâce à deux techniciens et un étudiant (David Schoenberg) qui fonctionnera le 22 février 1937.*

*5 déc. 1937: lettre à Nature “Je vous prie de trouver ci-joint une note, que j'espère vous voir publier dans les lettres aux éditeurs; je crois que c'est une note importante, et je serais heureux si vous pouviez la publier le plus vite possible avec mention de la date de réception. Pourriez vous envoyer les épreuves à PM Dirac, ou J. Cockcroft ou WL. Webster pour gagner du temps... tous ces amis sont compétents en la matière...”*

*1946: refuse de travailler à la bombe soviétique sous l'autorité de Béria (NKVD)*

*1953 : fin de la disgrâce avec la mort de Staline et l'exécution de Béria*

*1978: Prix Nobel de Physique*

*1984: décès à Moscou*

# Deux immigrants canadiens à Cambridge

*Jack Allen, né en 1908 à Winnipeg, doctorat en 1933 à Toronto,*

- embauché par Cambridge (avec R. Peierls) en 1935 à la place de Kapitza.*
- travaillait grâce au liquéfacteur du même Kapitza*
- avait attiré un jeune étudiant canadien, Don Misener en 1937*

*le travail de Allen et Misener était indépendant de celui de Kapitza*

*(sauf pour la fourniture d'hélium liquide):*

- ils travaillaient depuis au moins 6 mois sur l'hélium liquide*
- nombreuses mesures effectuées sur plusieurs capillaires*
- résultats consignés dès novembre 1937 dans leur cahier d'expériences*

*John Cockcroft, directeur du Mond laboratory, Nobel 1951, leur avait demandé de rédiger leurs travaux d'urgence, puis demandé à Nature de publier les 2 lettres côte à côte.*

*et celui de Kapitza ?*

# le cahier de J.F. Allen en novembre 1937

3-

23/X	37	In X In XI	Cement Effects	II	Transverse field. large thermal exp.
13/X	38	In VII In XII	Cement Effects	III	Transverse field -
22/X	39	In VII In VIII	Cement Effects	III	Transverse field.
27/X	40	In XIV In XV	Cement Effects	III	Transverse field.
29/X	41	In XIV In XV	Cement Effects	III	longitudinal Field
4/X	42	In XVI In XVII	Cement Effects	III	longitudinal Field
5/X	43	In XV	Cement Effects	III	longitudinal Field
11/XI	44	SC. 1	viscosity & expansion.	VII	Flow not viscous ←
17/XI	45	SC. 2	viscosity	VII	Capillary too large.
10/XI	46	In VIII In VIII	Cement Effects	III	longitudinal Field
19/XI	47	In IX In IX	{ Threshold Field Cement Effects	III III	longitudinal Field
24/XI	48	ST. 1	viscosity & surface ten.	VII VIII	long capillary - now viscous flow. ←
1/XII	49	ST. 2, 3, 4.	surface ten.	VIII	Preliminary, & as if jump at 7 point.
3/XII	50	ST. 2, 3, 4	surface ten.	VIII	Basal determination. Data published.
15/XII	51	In XX	Resistance	I	Measurement of successive 1 cm. sections.
17/XII	52	SC. 3	viscosity	VII	Thermometer tubing
(19/38) 12/X	53	PT. 1	viscosity	VII	Discovery of Helium Fountain ←
14/I	54	PT. 2	viscosity	VII	Tube packed with 48 Carborane

# Quels contacts entre Kapitza et Cambridge ?

*David Schoenberg 22 jan 2001: pas de contacts  
à cette époque il aurait été dangereux de communiquer*

*Correspondance de Kapitza:  
Contacts réguliers.*

*Rutherford à Kapitza (9 oct. 37) mentionne les travaux sur l'hélium à  
Cambridge puis meurt le 21 oct. 37*

*Kapitza à Cockcroft le 1 nov. 37: « difficile de croire que Rutherford n'est plus.  
Le nouveau liquéfacteur a produit 4 litres/heure... Pearson sera libre avant la  
fin de l'année... »*

*Webster était venu en septembre (signalé par David Schoenberg)*

*Mais le 10 déc. 37 Kapitza écrit à Niels Bohr: « j'ai reçu votre lettre à propos de  
la mort de Rutherford... Vous vous souvenez des idées dont je vous ai parlé en  
juin ? Les expériences progressent et les résultats sont très intéressants... je  
vous envoie une copie de ma lettre à Nature... »*

# Indépendants, mais pas équivalents

*Kapitza conclut en écrivant: « the viscosity of helium II is at least 1500 times less than that of helium I ... which means that the flow must have been turbulent » ... «by analogy with superconductors, ... the helium below the  $\lambda$ -point enters a special state which might be called **superfluid**. »*

*Allen-Misener:*

*« the observed type of flow ... in which the velocity becomes almost independent of pressure, most certainly cannot be treated as laminar or even as ordinary turbulent flow. Consequently, any known formula cannot, from our data, give a value of the viscosity which would have much meaning. »*

*Les travaux de Cambridge sont quantitatifs et Allen a compris que ce liquide ne pouvait pas être classique*

*Pourquoi Kapitza n'a-t-il obtenu le prix Nobel que 40 ans plus tard ?*

*Mais comment a-t-il eu l'intuition d'une similitude avec la supraconductivité des métaux et inventé le mot "superfluide" ?*

*discussions avec Lev Landau, génie de la physique soviétique de l'époque?*

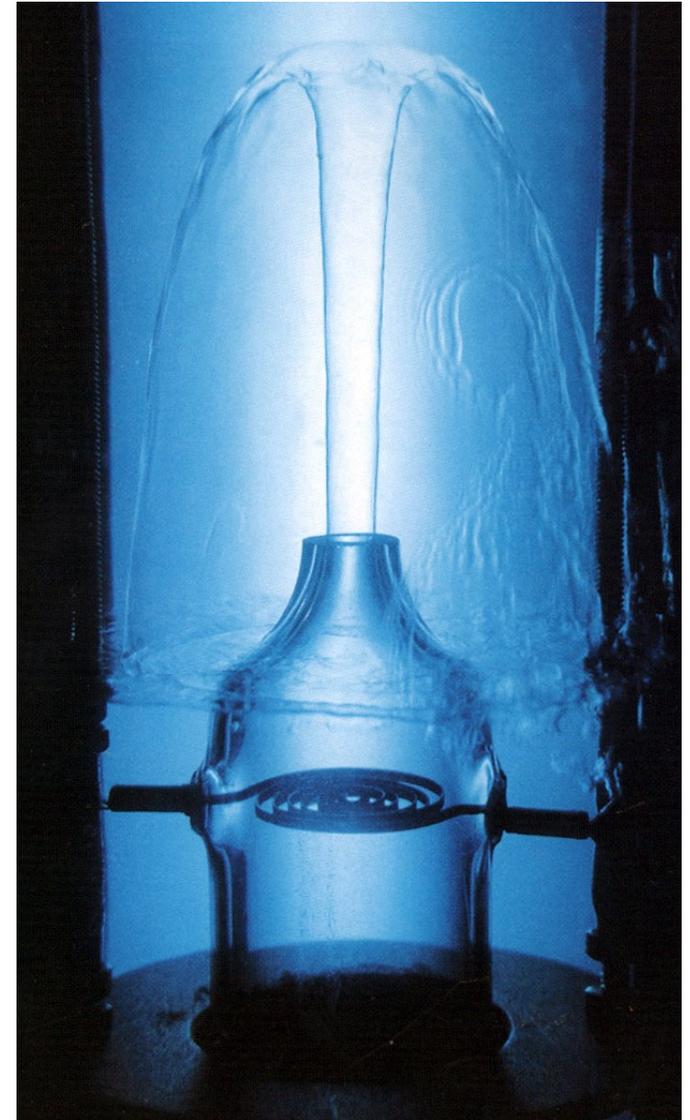
# 5 février 1938: l'effet fontaine

J.F. Allen et H. Jones découvrent l'effet fontaine **un mois plus tard** (Nature, 5 février 1938) :

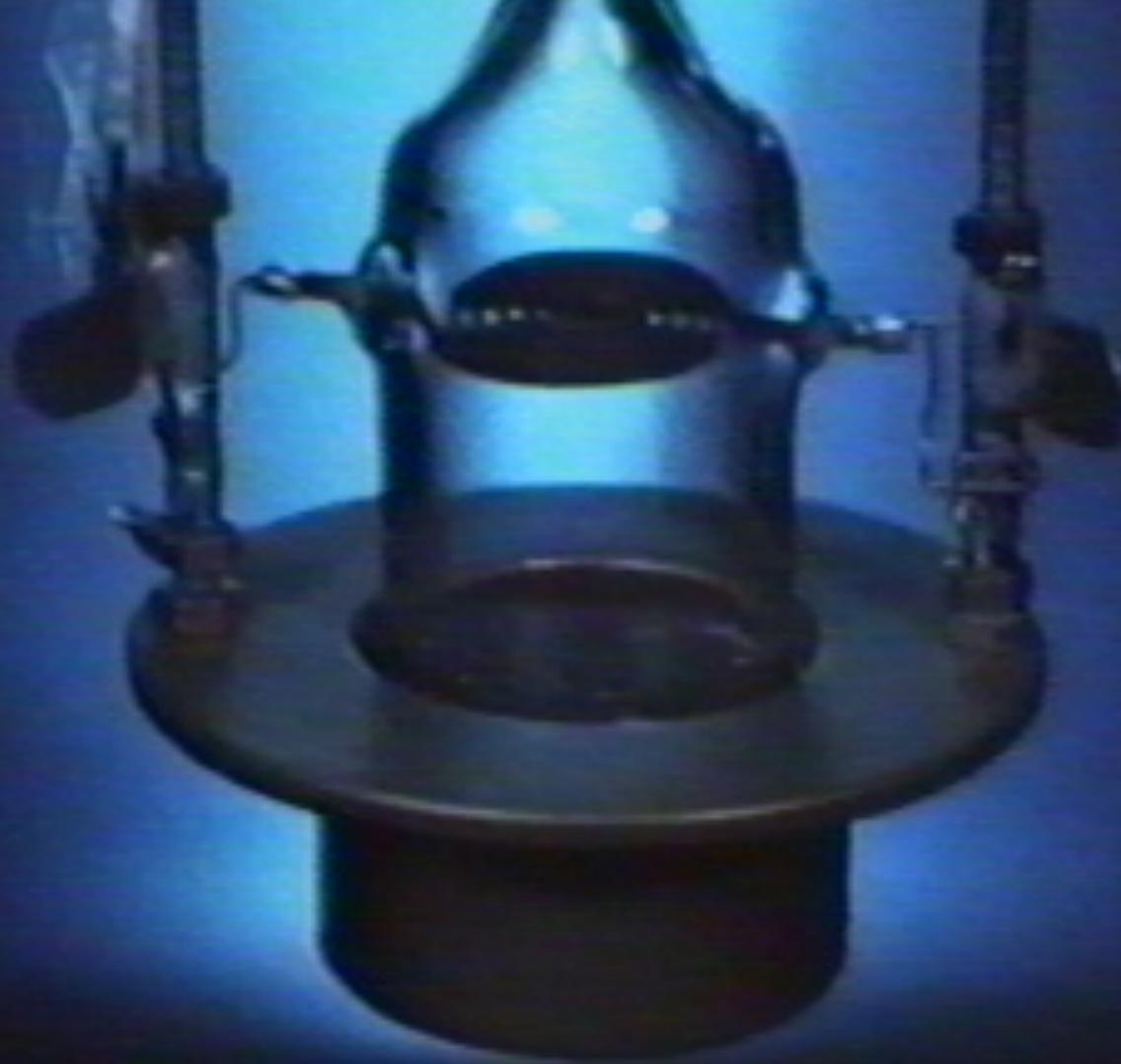
*chauffer l'hélium superfluide fait monter le niveau et provoque une fontaine.*

*un comportement incompréhensible pour un liquide classique*

*provoque la réflexion de London et Tisza*



# *l'effet fontaine*



# Fritz London 1900-1954

*naissance à Breslau (Wroclaw en Pologne)*

*Doctorat en 1921 à Munich*

*Molécule d'hydrogène en 1927 avec Walter Heitler*

*Rejoint Schrödinger en 1933 à Berlin*

*Fuit l'Allemagne nazie vers l'Angleterre*

*Est attiré à Paris en 1936 par Paul Langevin, Jean Perrin, Frédéric et Irène Joliot Curie, Edmond Bauer, intellectuels du Collège de France liés au front Populaire, et recommence à travailler à l'Institut Henri Poincaré*

*Découvre que la condensation de Bose-Einstein peut expliquer la superfluidité de l'hélium, un liquide où les fluctuations quantiques sont grandes*

*Fuit la France pour les Etats-Unis (en sept. 1939 !)*

*Professeur de chimie théorique à Duke Univ. (North Carolina)*

*Meurt d'une crise cardiaque en 1954*



Berlin 1928

**E. Schrödinger**

**F. London**

the effective mass  $m^*$  being of the order of magnitude of the mass of the atoms. But in the present case we are obliged to apply Bose-Einstein statistics instead of Fermi statistics.

(3) In his well-known papers, Einstein has already discussed a peculiar condensation phenomenon of the 'Bose-Einstein' gas; but in the course of time the degeneracy of the Bose-Einstein gas has rather got the reputation of having only a purely imaginary existence. Thus it is perhaps not generally known that this condensation phenomenon actually represents a discontinuity of the derivative of the specific heat (phase transition of third order). In the accompanying figure the specific heat ( $C_v$ ) of an ideal Bose-Einstein gas is represented as a function of  $T/T_0$ , where

$$T_0 = \frac{h^2}{2\pi m^* k} \left( \frac{n}{2,615} \right)^{2/3}.$$

With  $m^*$  = the mass of a He atom and with the mol. volume  $\frac{N_l}{n} = 27.6 \text{ cm.}^3$  one obtains  $T_0 = 3.09^\circ$ . For

$T < T_0$  the specific heat is given by

expected to furnish quantitative insight into the properties of liquid helium.

The conception here proposed might also throw a light on the peculiar transport phenomena observed with He II (enormous conductivity of heat<sup>1</sup>, extremely small viscosity<sup>2</sup> and also the strange fountain phenomenon recently discovered by Allen and Jones<sup>3</sup>).

A detailed discussion of these questions will be published in the *Journal de Physique*.

F. LONDON.

Institut Henri Poincaré,  
Paris.  
March 5.

<sup>1</sup> Fröhlich, H., *Physica*, 4, 639 (1937).

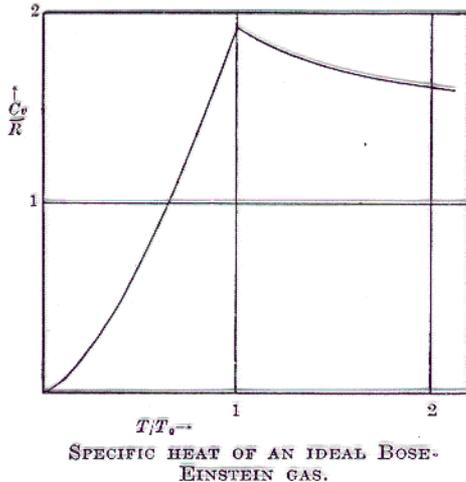
<sup>2</sup> Allen, J. F., and Jones, H., *NATURE*, 141, 243 (1938).

<sup>3</sup> Simon, F., *NATURE*, 133, 529 (1934).

<sup>4</sup> London, F., *Proc. Roy. Soc., A*, 153, 576 (1936).

<sup>5</sup> Rollin, *Physica*, 2, 557 (1935); Keesom, W. H., and Keesom, H. P., *Physica*, 3, 359 (1936); Allen, J. F., Peierls, R., and Zaki Uddin, M., *NATURE*, 140, 62 (1937).

<sup>6</sup> Burton, E. F., *NATURE*, 135, 265 (1935); Kapitza, P., *NATURE*, 141, 74 (1938); Allen, J. F. and Misener, A. D., *NATURE*, 141, 75 (1938).



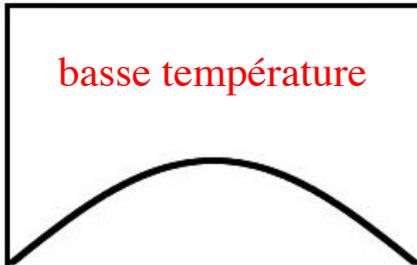
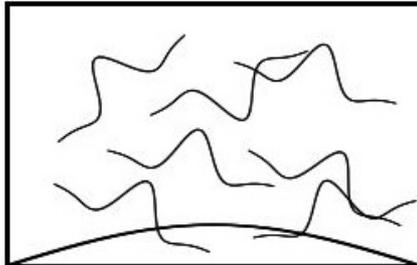
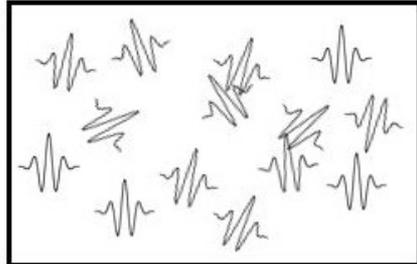
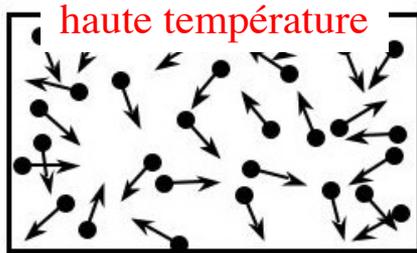
(4) Though actually the  $\lambda$ -point of helium resembles rather a phase transition of second order, it seems difficult not to imagine a connexion with the condensation phenomenon of the Bose-Einstein statistics. The experimental values of the temperature of the  $\lambda$ -point ( $2.19^\circ$ ) and of its entropy ( $\sim 0.8 R$ ) seem to be in favour of this conception. On the other hand, it is obvious that a model which is so far away from reality that it simplifies liquid helium to an ideal gas, cannot, for high temperatures, yield but the value  $C_v = 3/2 R$ , and also for low temperatures the ideal Bose-Einstein gas must, of course, give too great a specific heat, since it does not account for

*5 mars 1938, Institut Henri Poincaré :*

*Fritz London:*

*la condensation de Bose-Einstein  
explique probablement la superfluidité*

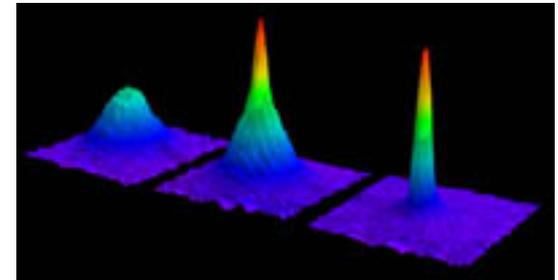
# Une onde de matière



*En 1924, Einstein développe les travaux d'un jeune physicien bengali, Satyendra Nath Bose: Accumulation d'atomes indiscernables dans un même état formant une onde macroscopique*

*Evidence expérimentale en 1995 (vapeurs alcalines (sodium, rubidium) grâce aux travaux de Cornell, Wieman (Boulder) et Ketterle (MIT), tous prix Nobel en 2001:*

*Un condensat de Bose-Einstein est une onde de matière cohérente*



# Laszlo Tisza invente le « modèle à 2 fluides » (Nature, Avril 1938)

## Transport Phenomena in Helium II

F. LONDON<sup>1</sup> has recently proposed a new conception of helium II, according to which this liquid can be regarded as a degenerate Bose-Einstein gas, that is, as a system in which one fraction of the substance—say,  $n$  atoms per cm.<sup>3</sup>—is distributed over the excited states in a way determined by the temperature, while the rest— $n_0 = n - n$  atoms per cm.<sup>3</sup>—is 'condensed' in the lowest energy level. If  $T_0$  denotes the temperature of degeneracy, the ratio  $n/n_0$  is given by

$$n/n_0 = (T/T_0)^s \text{ for } T < T_0 \quad (1)$$

For an ideal Bose-Einstein gas, according to London,  $s = 3/2$ , but for the real fluid one should rather insert  $s = 5$  in order to fit Keesom's specific heat

gradient causes a surplus convection current opposite to heat flow. This picture can account for the great values of the heating current required to maintain a temperature difference at the ends of the capillary<sup>2</sup>. Simultaneous measurements of the heating current and the total convection of substance could provide us with information about the relative magnitude of the processes (a) and (b).

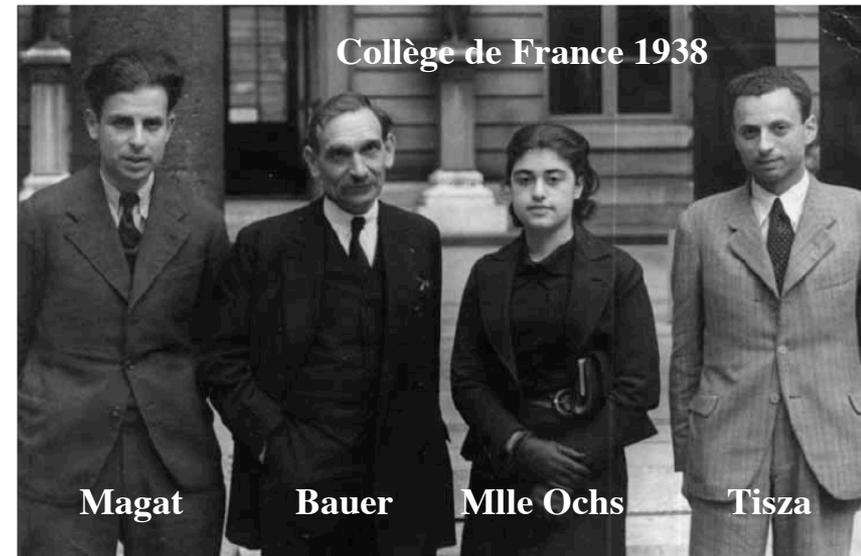
A detailed discussion of the problem will be given in the *Journal de Physique*. I am greatly indebted to Dr. F. London for the opportunity of seeing his paper before publication.

L. TISZA.

Laboratoire de Physique Expérimentale,  
Collège de France,  
Paris. April 16.



*Né en 1907, étudiant à Budapest puis avec Max Born à Gottingen et Heisenberg à Leipzig. 1 an de prison en 1934 pour délit d'opinion Grâce à Teller, part en post-doc chez Landau à Kharkov (1935-36), puis fuit l'URSS stalinienne et arrive à Paris en 1937, à l'invitation de Paul Langevin et Edmond Bauer au Collège de France Rencontre Fritz London Article à Nature le 16 avril 1938*



*le fluide est un mélange de deux composantes:*

*les atomes condensés et les atomes non-condensés (vision simpliste, les atomes sont indiscernables)*

*il existe deux champs de vitesse indépendants, hypothèse amplement vérifiée par la suite*

# un succès remarquable

**un mélange de 2 composantes:**  $\rho = \rho_s + \rho_n$  ;  $\rho_s = 0$  à  $T = T_c$  et  $\rho_n = 0$  à  $T = 0$   
la composante superfluide coule sans dissipation et la composante normale transporte l'entropie ( $\rho S = \rho_n S_n$ )

**2 champs de vitesse indépendants:**  $J = \rho_s v_s + \rho_n v_n$

**l'effet fontaine est un effet thermomécanique :**

équilibre thermodynamique :  $d\mu = 0 \Rightarrow \rho dP = SdT$  donc  $P$  augmente avec  $T$ .

**Un effet inverse:** un refroidissement doit être associé à un écoulement à travers des microcanaux . Le poreux est un **filtre à entropie**. Découvert en 1939 à Oxford par Daunt et Mendelssohn Nature 143, 719 (1939)

Dans ses 2 articles suivants (Comptes Rendus Ac. Sciences Paris, 207, 1035 and 1186 (1938) ) Tisza prédit l'existence d'**ondes de chaleur** appelées plus tard « second sound » par Landau.

**Avec F. London, L. Tisza réussit à expliquer toutes les propriétés de l'hélium superfluide connues en 1938:** point  $\lambda$ , écoulement, effets thermiques et aussi

- la contradiction apparente entre les mesures de viscosité effectuées à Toronto et à Cambridge: la dissipation dépend de la géométrie (du confinement).
- l'écoulement des films d'hélium liquide le long des parois (Rollin, Kürti and Simon 1936)

## 2 tests cruciaux

**Londres, juillet 1938:** *Tisza présente comme un test décisif de sa théorie l'étude expérimentale des "ondes de temperature" dont il a prédit l'existence*

*Elles devaient être découvertes peu après mais pas tout à fait conformes au modèle de Tisza.*

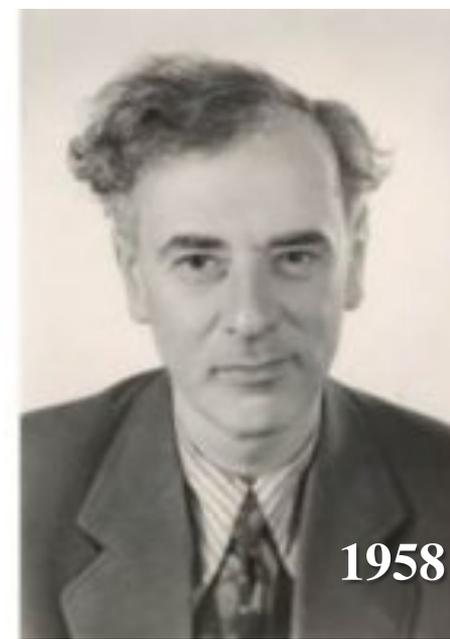
*Fritz London restait opposé à l'idée de 2 champs de vitesse indépendants. Il proposait de comparer l'hélium 4 (Bosons) à l'hélium 3 (Fermions)*

**1938** *le NKVD stalinien jette Landau en prison*

**1939** *la guerre arrête toute recherche sur l'hélium en occident...*

# Lev D. Landau

## 1908 - 1968



*1908: naissance à Baku*

*1927: Doctorat à Leningrad ( à 19 ans !)*

*1929: Bourses Rockefeller et*

*“Commissariat du Peuple pour l’éducation”, visite Rutherford, Dirac et Kapitza*

*(Cambridge), Pauli (Zurich), Born (Gottingen), Heisenberg (Leipzig) et surtout Niels Bohr (Copenhague + 1932 et 1933)*

*1932-37: Fonde son école de physique théorique à Kharkov et commence l’écriture des “Landau & Lifshitz”*

*Mars 1938: tract anti-stalinien, arrestation par le NKVD ancêtre du KGB, condamnation à 10 ans de prison*

*Avril 1939: Kapitza réussit à faire libérer Landau en se portant garant auprès de **Béria**. Landau recommence à travailler auprès de **Kapitza** à Moscou.*

***Juin 1941: Landau publie simultanément aux Etats Unis et en URSS une théorie de la superfluidité***

***1962: Prix Nobel et grave accident de voiture***

*1968: décès après 6 ans de souffrances*

# L'école de Landau

*fondation à Kharkov avec 5 élèves  
ou postdocs qui ont réussi le  
«Teorminimum exam»*

*1: Kompaneetz*

*2 : E. Lifshitz*

*3: Akhiezer*

*4: Pomeranchuk*

*5: L. Tisza*

*commence l'écriture de sa série de  
livres avec E.M. Lifshitz*

*1937: persécuté, Landau se  
réfugie auprès de Kapitza à  
Moscou...*

*et Tisza au Collège de France à  
Paris*

2. Лифшиц	34 д	23 Веденов	55 к
3. Ахиезер	35 (эк)	24 Максимов	55
4. Померанчук	И.И. КАТАНОВ	25 Пинаевский	55 к
5. Тисса	35	26 Саидев	55 к
6. Левин	37 эк	27 <sup>+</sup> Бекаревич	55 к
7. Берестецкий	39 д	28 Илья	56 к
8. Спорodinский	ШКОЛА ЛАНДАУ	29 Довго	57 к
9. Халатников	41 д	30 Мановар	58
10. Хуцишвили	ЧТО Я О НЕЙ ДУМАЮ	31 Фальковский	59
11. Тер-Мартirosian	47 д	32 Андрей	59
12. Абрикосов	47 д	33 Конраченко	59
13. Цорфе	49 д	34 Руцкий	59
14. Харков	50 к	35 Маринов	60
15. Ландаус	50 к	36 Берков	60
16. Судаков	51 к	37 Мелик-Беркударов	60
17. Калан	51 к.	38 Мокшаченко	61
18. Черинштейн	52 к.	39 Игнатюк	61
19. Горшков	53 д	40 Будко	61
20. Дьячонинский	53 к		

# la théorie de Landau

*Même affirmation au début des deux articles:*

*« It is well known that liquid Helium at temperatures below the  $\lambda$ -point possesses a number of peculiar properties, the most important of which is superfluidity discovered by P.L. Kapitza. »*

*D'après Landau, la découverte avait donc été faite à Moscou par l'homme qui lui avait sauvé la vie...*

*Landau continue ainsi:*

*« L. Tisza suggested that Helium II should be considered as a degenerate ideal Bose gas... This point of view, however, cannot be considered as satisfactory... nothing would prevent atoms in a normal state from colliding with excited atoms, ie when moving through the liquid they would experience a friction and there would be no superfluidity at all. In this way the explanation advanced by Tisza not only has no foundations in his suggestions but is in direct contradiction with them. »*

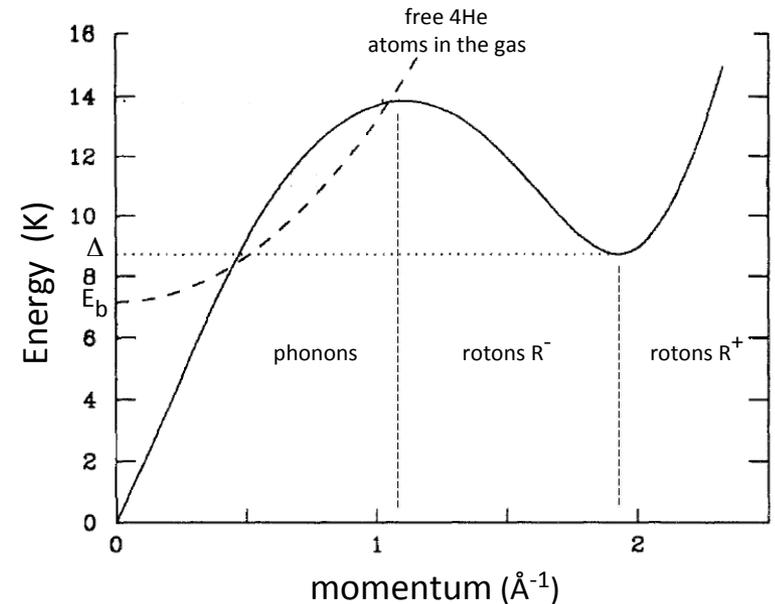
*une agressivité étonnante...*

# Landau quantifie l'hydrodynamique et réintroduit le modèle à 2 fluides de Tisza

**En 1941:** « every weakly excited state can be considered as an aggregate of single elementary excitations » :

ondes sonores quantifiées (phonons)  $\varepsilon = cp$   
tourbillons élémentaires ?  $\varepsilon = \Delta + p^2/2\mu$

**En 1947,** les rotons deviennent une branche du spectre des phonons  $\varepsilon = \Delta + (p-p_0)^2/2\mu$   
bon accord avec les mesures de chaleur spécifique de Keesom and Keesom (Leiden, 1935)



*introduit le concept de “vitesse critique”*

*Dissipation par émission de phonons mais Landau « leaves apart the question as to whether superfluidity disappears at a smaller velocity for another reason ».*

*Ensuite, Landau réintroduit le modèle à 2 fluides de Tisza's et retrouve l'existence d'ondes de températures qu'il baptise “second son”.*

*Seule différence importante: la composante normale est constituée des phonons + rotons, donc la vitesse du second son est différente.*

# Landau et Tisza

*l'introduction du modèle à 2 fluides par Landau est-elle “indépendante” de celle de Tisza?*

*D'après Tisza, Landau ignorait systématiquement le travail des autres et avait effectivement corrigé une erreur de sa part sur la nature du fluide normal dans son article de 1938 (confirmé par Peshkov en 1948; **atomes individuels/ comportement collectif d'atomes indiscernables**).*

*Dans son article de 1949 (Phys Rev 75, 884) Landau écrit à propos des articles de Tisza: “...I regret having missed seeing his previous short letters (Comptes-Rendus 207, 1035 and 1186 (1938)]...”*

*alors qu'il avait mentionné le nom de Tisza à propos de 2 équations de son article de 1941 et qu'il travaillait en étroite collaboration avec Kapitza qui, lui, citait Tisza ...*

*Landau parlait parfaitement anglais, français (“l'âne Dau”), allemand et danois*

# Landau : Intuition et preuve rigoureuse

Peierls à propos de Landau :

*Intuition* was for him an important tool, in spite of his great skill in solving problems mathematically. He regarded it as pedantic and unnecessary to look for a *rigorous proof* of a statement that was intuitively obvious.

He would say: "Well, if this is not obvious to you, you should not be a physicist".

En réalité, c'est bien Tisza qui a eu l'intuition

- du modèle à 2 fluides
  - donc de l'existence de 2 composantes dont la concentration dépend de  $T$
  - donc expliqué l'effet fontaine
  - et prédit l'existence d'ondes de chaleur (le 2<sup>nd</sup> son)
- même si c'est Landau qui en a fait le calcul correct.

# Landau, BEC, statistique quantique

*La théorie de Landau des excitations élémentaires est toujours la base de la compréhension actuelle des fluides quantiques*

***Mais,** Landau ignore totalement la condensation Bose Einstein, ET toute influence de la statistique quantique.*

*Il affirme sans preuve qu'il y a (dans tout liquide quantique?) un gap d'énergie entre les états irrotationnels et les états où la circulation de la vitesse est non-nulle (les "rotons"?), et cela quelle que soit la statistique. En fait, les rotons et les phonons sont des états irrotationnels.*

*L'absence d'excitations individuelles dans un gaz de Bose, seulement des excitations collectives dont la vitesse de phase est non-nulle, a été apportée en 1947 par Bogoliubov qu'il ignorait aussi.*

*Hélium 3 : D. Osborne et al. en 1949 démontrent que la superfluidité est bien une propriété des liquides de Bose.*

***D'après Tisza,** Landau n'acceptait pas qu'une théorie des gaz parfaits puisse s'appliquer à des liquides (il n'y a pas de continuité du gaz parfait au liquide)*

***D'après Pitaevskii:** la superfluidité est une propriété des liquides de Bose alors que la supraconductivité est une propriété des électrons qu'on ne savait pas apparier avant la théorie de Bardeen, Cooper et Schrieffer (BCS), a fortiori avant  $^3\text{He}$ , les gaz de Fermi...*

# Deux approches théoriques différentes

*Landau n'a jamais cité Fritz London qu'il considérait comme un mauvais physicien...*

*et toujours méprisé son ancien collaborateur Tisza*

*Fritz London avait considéré l'état fondamental de l'hélium superfluide au repos*

*Landau avait, lui, considéré ses propriétés hydrodynamiques dont il a inventé une théorie quantique, mais toujours nié un rapport quelconque avec Bose-Einstein.*

*Ils avaient en partie raison l'un et l'autre mais mourront avant de s'en rendre compte.*

*le véritable inventeur du modèle à deux fluides est bien Tisza, mais Landau ne voulait apparemment pas partager la gloire avec son ancien élève.*

*Il a aussi reçu le prix London en 1960 ! Proposé par Tisza !!*

# 70 ans plus tard...

***Superfluidité de bosons:*** Quantification des lignes de tourbillons (Onsager 1949, Hall et Vinen ), interférences, sauts de phase, courants permanents, évaporation quantique...

***Supraconductivité :*** théorie BCS en 1957, une superfluidité de paires d'électrons. Superfluidité de l'hélium 3 (appariement à  $T < 2$  mK).

***Supraconducteurs à haute température (150K)***

***Applications:*** électroaimants, imagerie médicale, accélérateurs de particules

***gaz quantiques ultrafroids***

***propriétés des condensats***

***rôle des interactions***

***fermions: transition BEC-BCS***

***superfluidité et localisation de Mott***

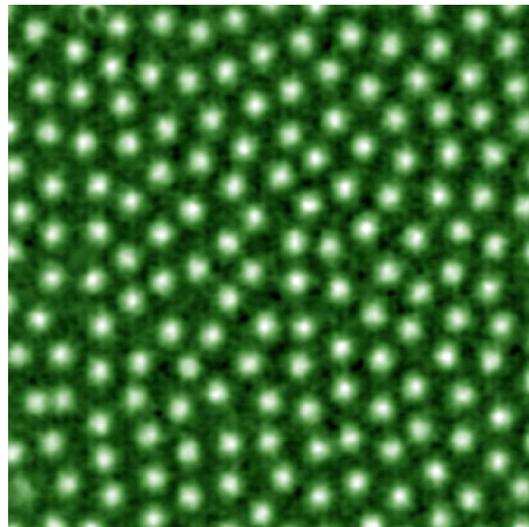
***Supersolidité??***

***Projets de détection d'ondes gravitationnelles???***

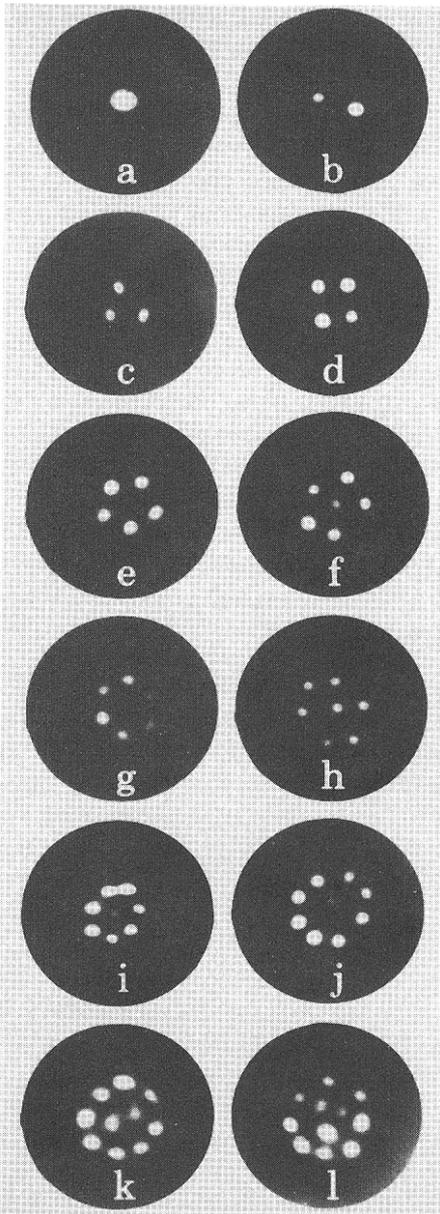
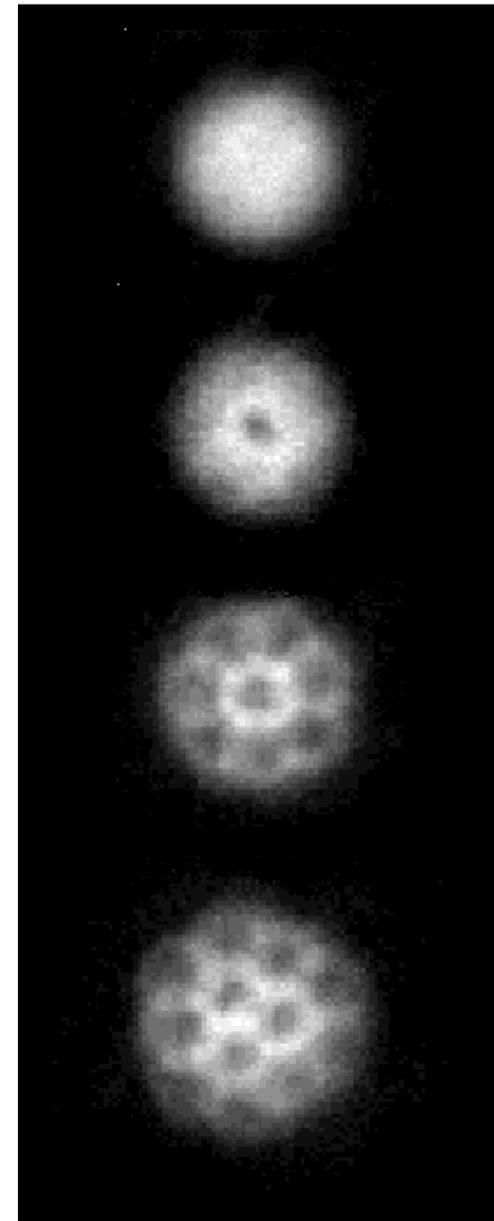
**superfluides en rotation  
et supraconducteurs sous  
champ magnétique:  
tourbillons quantifiés,  
réseaux d'Abrikosov**

*l'hélium liquide  
(Yarmchuk et al.  
1979)*

*le rubidium  
gazeux (Madison,  
Chevy, Dalibard  
et al. 2000)*



*supraconducteur NbSe2 sous faible champ magnétique  
(P.E. Goa et al. Oslo 2001)*



BOSE - EINSTEIN CONDENSATION (BEC).

In a thoughtful comment on the history of BEC Max Delbruck mused: "Was Bose-Einstein Statistics arrived at by Serendipity?" (J. Chem. Education 1980, 57, 467).

The Princes of Serendip make discoveries that they did not set out to make. Without the proper motivation they are more puzzled by their discoveries than being appreciative of them. Delbruck concludes: "Should we let matters rest with this expression of bafflement? Or, should we attempt a more positive approach?"

I opt for the positive approach. There is more to BEC than meets the eye, its meaning emerged gradually since the outset and more is still to come.

*ENS, Paris*  
*14 juin 2001*

*Laszlo Tisza*  
*né le 7/7/7*

*Sébastien  
Balibar*

*Eric  
Varoquaux  
Jean Dalibard*

*Bertrand  
Duplantier*

**les 27km d'aimants du LHC refroidis à 1.9K  
par de l'hélium 4 superfluide**



pour en savoir plus ...

## **The Discovery of Superfluidity**

**Sébastien Balibar**

*Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure associé aux Universités  
Paris 6 et 7 et au CNRS, 24 Rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05, France  
E-mail: balibar@lps.ens.fr*

***J. Low Temp. Phys. 146, 441 (2007)  
pour physiciens  
avec tous les détails scientifiques***

# Laszlo Tisza

tisza@MIT.EDU

*1991, centenary of the Hungarian  
Physical Society:*

*« If history has a lesson, it is that the  
« winner takes all » attitude deprives one  
of the pleasure of being the heir to the best  
of different traditions... »*

*a lesson for the future.*

