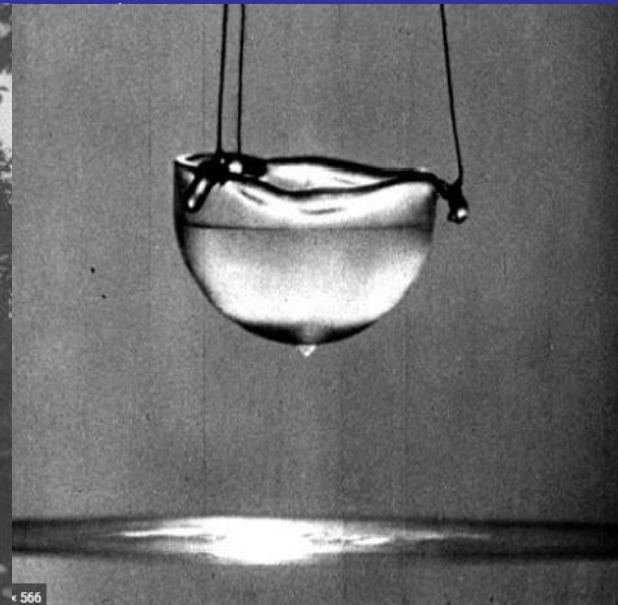


Od odkrycia nadciekłości do kwantowej turbulencji



*Piotr Magierski
(Politechnika Warszawska)*



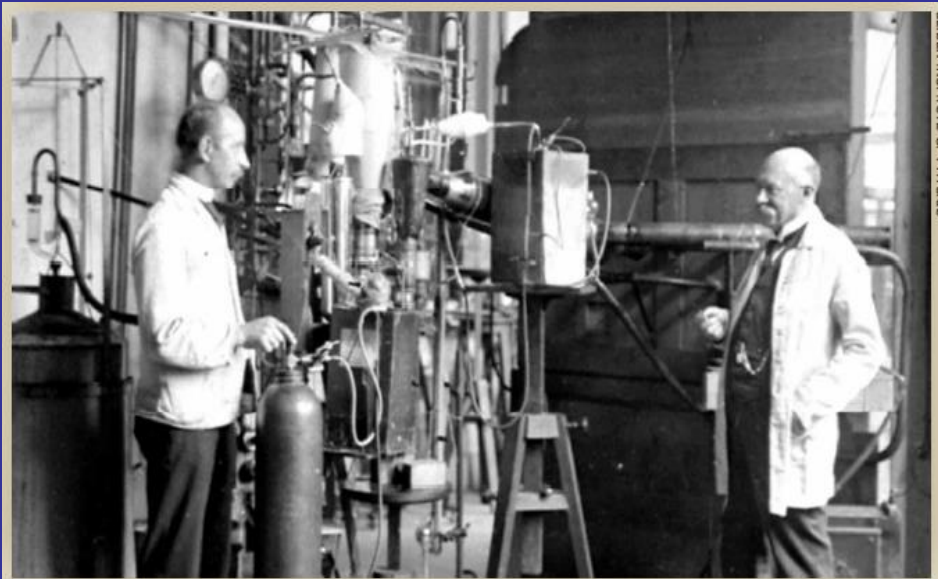
Symposium
"Mieczysław Wolfke 1922-2022"

... do badania wewnętrznej budowy materji i sił jej międzycząsteczkowych koniecznem jest chociaż częściowe zahamowanie ruchu termicznego czyli obniżenie temperatury badanych ciał. Dlatego też dziedzina niskich temperatur jest tak ważną i ciekawą dla fizyka.

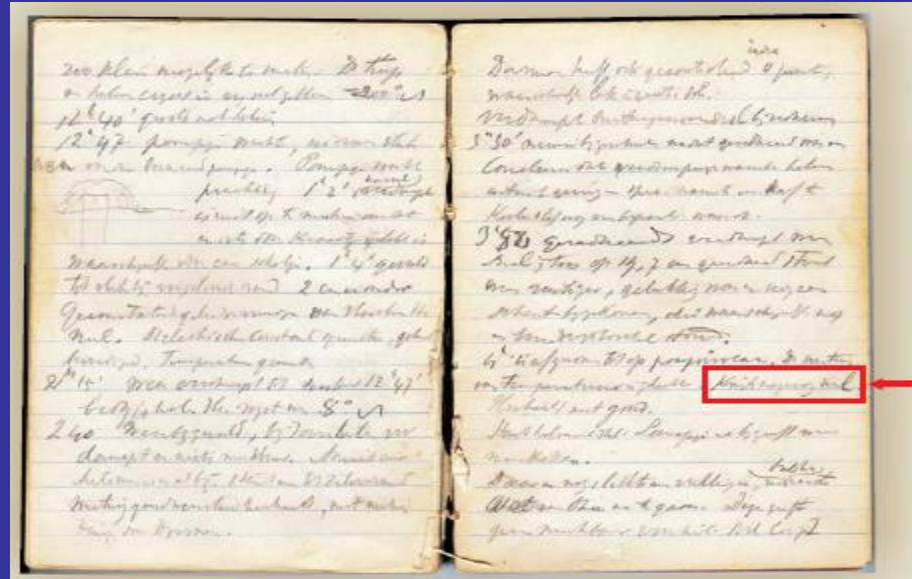
Dziedzina badań własności materji w niskich temperaturach jest rozległa, pełna najbardziej dziwnych i niespodziewanych zjawisk, których zbadanie niewątpliwie rzuci nowe światło na tajemnicę budowy wewnętrznej materji.

M. Wolfke, „O badaniach w niskich temperaturach”, Przegląd Techniczny 51-52 (1931).

Fizyka niskich temperatur u progu XX wieku – odkrycie nadprzewodnictwa



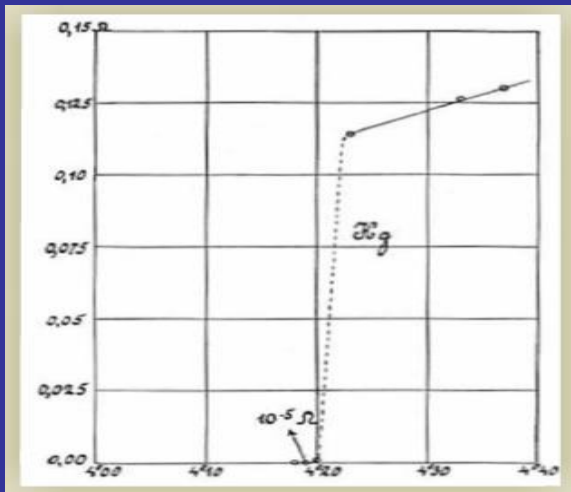
Heike Kamerlingh Onnes w swoim laboratorium



Dnia 8-go kwietnia 1911 roku.

Podkreślone zdanie:

„[Opór] rtęci praktycznie zero [przy 3K]”
(ze zbiorów Muzeum Boerhaave)



Oryginalny wykres oporu elektrycznego (w Ohmach)
w funkcji temperatury (w Kelvinach)

H. Kamerlingh Onnes, *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden. Suppl. 29*
(Nov. 1911).

Przy temperaturze 4.25K opór spadł nagle z wartości 0.1Ω do wartości 10⁻⁶ Ω!

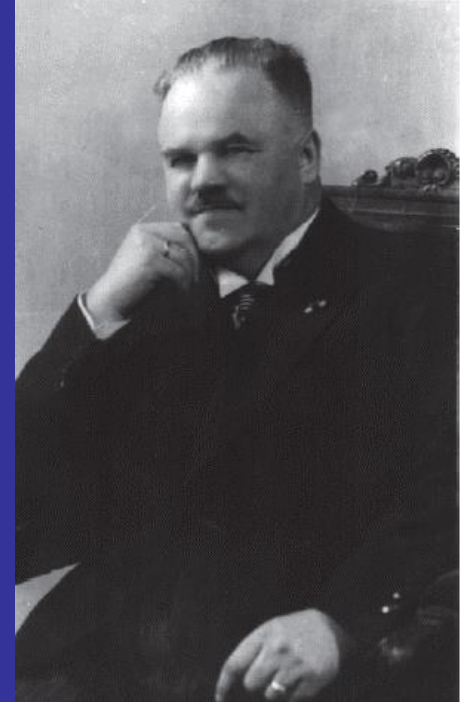
W kriostacie używany był ciekły hel skroplony w 1908 r. przez Kamerlingha Onnesa.

Z dziennika laboratoryjnego Kamerlingha Onnesa:

Dorsman (który kontrolował i mierzył temperatury) naprawdę musiał się spieszyć, aby dokonać obserwacji. [...] Tuż przed osiągnięciem najniższej temperatury (około 1,8 K), wrzenie nagle ustało i zostało zastąpione przez parowanie, po którym ciecz wyraźnie się skurczyła. Tak więc, zadziwiająco silne parowanie na powierzchni.



Wizyta Mieczysława Wolfkego w laboratorium Heikego Kamerlingha Onnesa w Lejdzie (siedzą od lewej strony: Józef Wierusz-Kowalski, Heike Kamerlingh Onnes, Willem Hendrik; stoją od lewej: Mieczysław Wolfke, Gerrit Jan Flim (dyrektor techniczny), Lars Vegard)



Pamiętnik M. Wolfkego:

1924 (Warszawa) - Od maja do sierpnia pracowałem w Instytucie Kryogenicznym Uniwersytetu Lejdejskiego nad stałą dielektryczną w bardzo niskich temperaturach.[...] Zaproponowałem H. Kamerlinghowi Onnesowi zestalenie helu pod ciśnieniem - nie zgodził się na przeprowadzenie prób.

1926 (Warszawa) - W. Keesom w Lejdzie zestalił hel zapronowaną przeze mnie metodą pod ciśnieniem; zaprosił mnie do Lejdy dla dalszych badań nad helem w niskich temperaturach.

1927 (Warszawa) - W Lejdzie w Inst. Kryogenicznym Uniwersytetu pracowałem w letnim semestrze wraz z Keesomem nad stałą dielektryczną ciekłego helu. Keesom przyznał mi pierwszeństwo [...] pomysłu zestalenia helu pod ciśnieniem.

1928 (Warszawa) - Zakończyłem w Laboratorium Kryogenicznym Lejdejskim prace moje wspólne z W.H. Keesomem nad stałą dielektryczną ciekłego helu.

Brak w pamiętniku informacji o wykryciu nowej fazy „modyfikacji” helu.

Pomiary stałej dielektrycznej helu

Odbitka ze sprawozdań z posiedzeń Towarzystwa Naukowego Warszawskiego XX. 1928. Wydział III.



W. H. Keesom i M. Wolfke.

Dwie różne modyfikacje ciekłego helu.

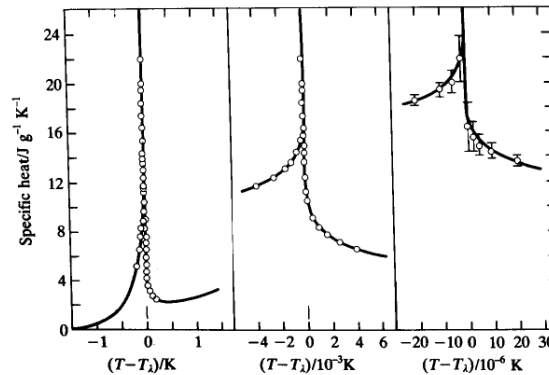
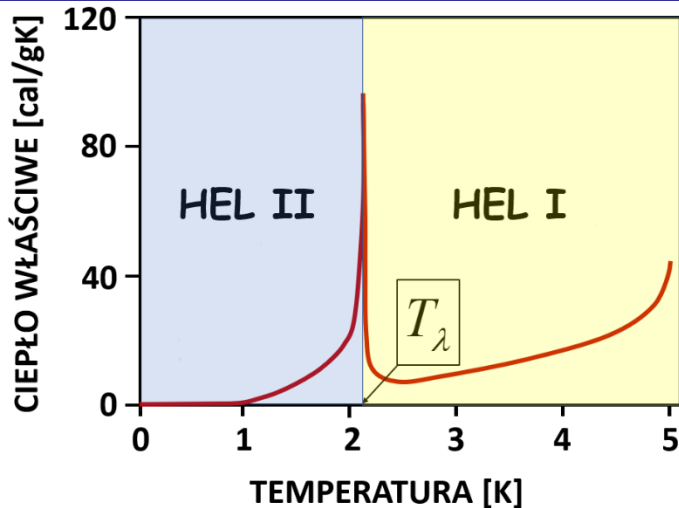
Przedstawił M. Wolfke.

Podczas pomiarów zależności stałej dielektrycznej ciekłego helu od temperatury skonstatowaliśmy nagły skok jej wartości w temperaturze 2,28°K (ob. Komunikat poprzedni). Zjawisko to nasunęło nam przypuszczenie, że w punkcie tym następuje przemiana jednej modyfikacji ciekłego helu w drugą, również ciekłą. Nazwijmy modyfikację ciekłego helu, stałą w temperaturach wyższych, „helem ciekłym I”, zaś modyfikację, stałą w temperaturach niższych, — „helem ciekłym II”. W takim razie stała dielektryczna ciekłego helu I jest większa od wartości jej, jaką posiada ciekły hel II.

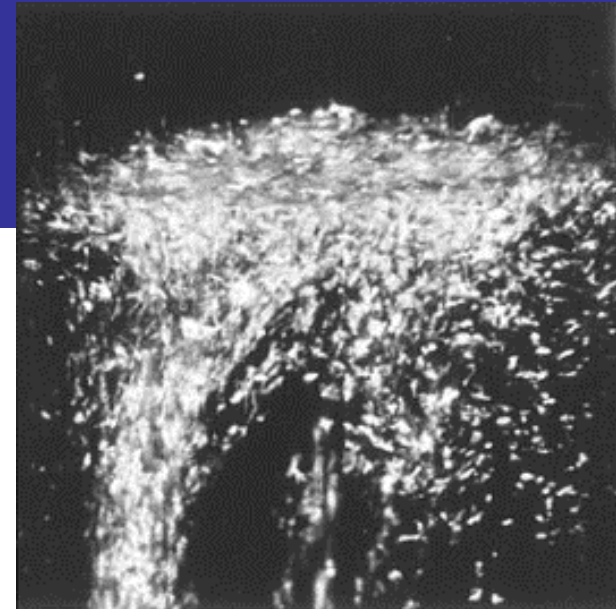


Nazwa: „hel II” pochodzi z prac: M. Wolfke and W.H. Keesom, Proc. Amsterdam 31, 81 (1927). W.H. Keesom and M. Wolfke, Leiden. Comm. 190b, (1927).

Pomiary ciepła właściwego helu

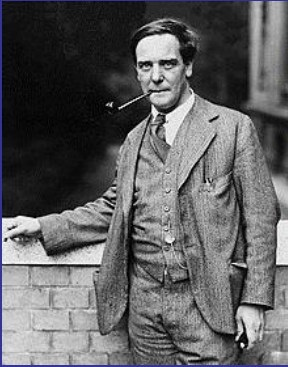


Punkt lambda i temperatura lambda



Wrzenie helu podczas przechodzenia przez punkt lambda

Dwa artykuły w Nature



Piotr Kapica, „*Viscosity of liquid helium below the lambda point*”, *Nature* 141, 74 (1938).
Instytut Problemów Fizycznych w Moskwie

„Przepływ ciecży powyżej punktu lambda można było wykryć tylko po czasie kilku minut, podczas gdy poniżej punktu lambda ciekły hel płynął dość łatwo, a poziom w tubie ustabilizował się w kilka sekund. Z pomiarów możemy stwierdzić, że lepkość helu II jest co najmniej 1500 razy mniejsza niż helu I pod normalnym ciśnieniem. [...] hel poniżej punktu lambda znajduje się w wyjątkowym stanie, który mógłby być nazwany nadciekłym.”



John F. Allen, Don Misener, „*Flow of liquid Helium-II*” *Nature* 141, 75 (1938).
Laboratorium Mond w Cambridge

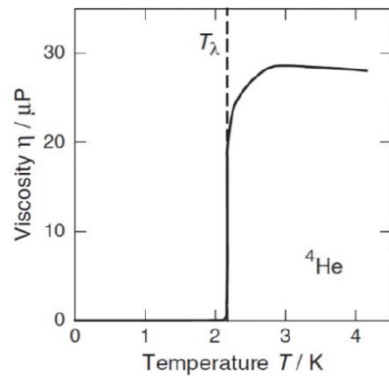
Nagroda Nobla (1978):

Piotr Kapica – za „*fundamentalne dokonania w dziedzinie fizyki niskich temperatur*”

Kłopot z helem II

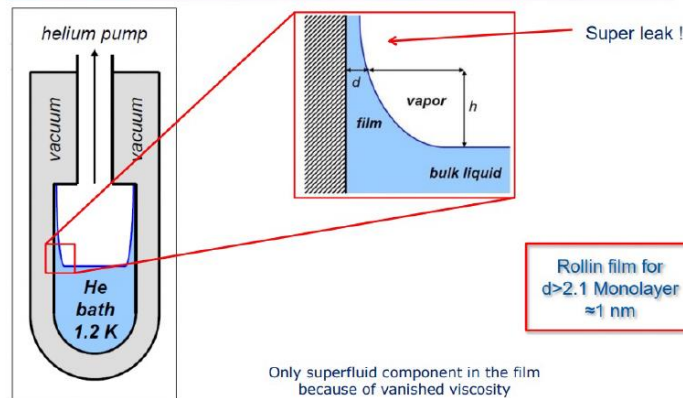
- Płynie bez trudności przez kapilary o średnicy 10^{-8} - 10^{-9} m.
- Wyptywając z naczynia przez kapilarę pozostała część helu-II nagrzewa się.
- Trudno jest oszacować lepkość, ale jest przynajmniej 1500 razy mniejsza niż helu-I

Viscosity of He II



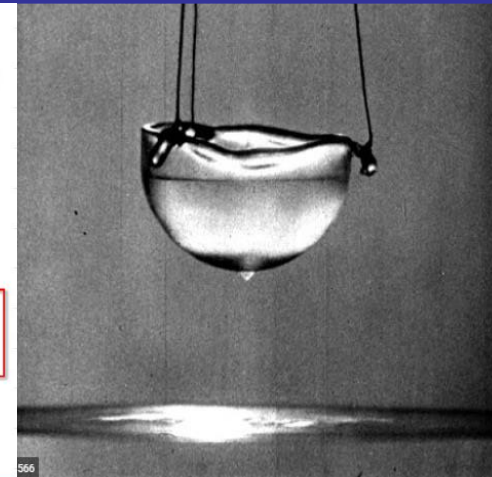
From: Enns, Hunklinger, Low temperature physics, 2005.

Superfluid Film Flow



Only superfluid component in the film because of vanished viscosity

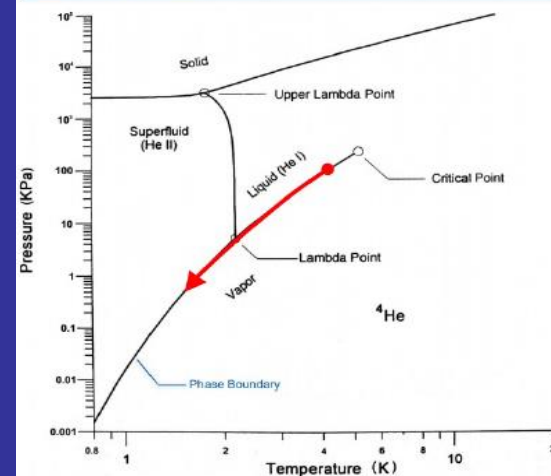
From Gross, Marx, Waither-Messner Institut, 2009.



The observed viscosity of He II is depending on the method of measurement !

- Wspina się po ściankach naczynia: „creeping effect”
- Ciepło rozchodzi się z charakterystyczną prędkością: „fala cieplna”
- Obiekt zanurzony w helu-II „ciągnie” za sobą tylko niewielką część cieczy.

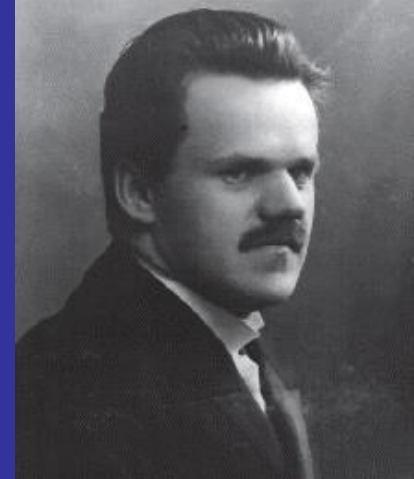
Phase Diagram of ^4He



$T_\lambda \approx 2.1768 \text{ K}$ @
 $p_\lambda \approx 50.41 \text{ mbar}$

From Weisend, Handbook of Cryogenic Engineering, 1984.

Z notatek M. Wolfkego:



Teoria He II.

20

I. Ciepłota właściwa

Wysoki stan energii termicznej - mniejsze skupienie - He I.

Niski stan energii termicznej - większe skupienie - He II.

Ciepłota przemiany He II \rightarrow He I - $C_{2,1}$ kal/gr.

Ciepłota właściwa He I: C_1 ;

Ciepłota właściwa He II: C_2 .

III. Teoria dwóch stanów ciekłego helu.

He I jest to zwykły ciekły hel o ciepłej właściwej wartości: C_1 .

He II jest to mieszanka ciekłego helu i helu zestalonego.

Przy zmianie temperatury ciepło dostarczone idzie na ogrzanie i częściowe stopienie stałej domieszki.

Pomysł: Hel II jest „mieszanką ciekłego helu i helu zestalonego”

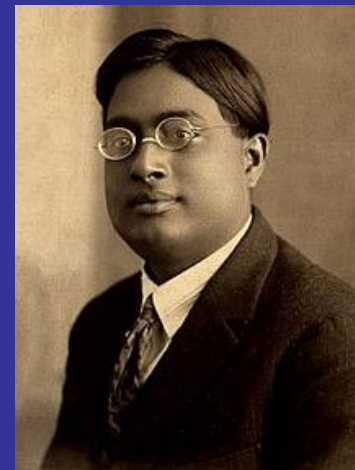
„Przy zmianie temperatury ciepło dostarczone idzie na ogrzanie i częściowe stopienie stałej domieszki”

Koncepcja kondensatu Bosego-Einsteina



Einstein w liście do Paula Ehrenfesta:

„Od pewnej temperatury molekuly „kondensują” bez oddziaływań przyciągających, czyli gromadzą się przy zerowej prędkości. Teoria jest ładna, ale czy jest w niej trochę prawdy?”



Bose S.N., Z. Phys. 26, 178 (1924).

Einstein A., Ber. Berl. Akad. 261 (1924)



Fritz London (Superfluids, Wiley & Sons 1950):

„W 1924 Einstein opracował bardzo dziwną koncepcję gazu identycznych molekuł, które z założenia były nieodróżnialne [...] Einstein nie podał szczegółowego dowodu, a jego rozważania nie wzbudziły wówczas dużej uwagi. Większość uważała to za pewien rodzaj osobliwości, który w najlepszym przypadku miał znaczenie czysto akademickie, ponieważ w tak ekstremalnie niskich temperaturach lub wysokich ciśnieniach, nie ma już gazów, a cała materia jest zamrożona lub przynajmniej skondensowana dzięki oddziaływaniom międzycząsteczkowym.”

A jednak:

z pracy F. Londona w Nature:

644

NATURE

APRIL 9, 1938, VOL. 141

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

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

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

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 heat⁵, extremely small viscosity⁶ and also the strange fountain phenomenon recently discovered by Allen and Jones²).

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

F. LONDON.

Institut Henri Poincaré,
Paris.

March 5.

¹ Fröhlich, H., *Physica*, 4, 639 (1937).

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

³ Simon, F., *NATURE*, 133, 529 (1934).

⁴ London, F., *Proc. Roy. Soc., A*, 153, 576 (1936).

⁵ 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).

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

Zdumiewająco blisko: $T_\lambda = 2.28K$

Tisza i Landau: model dwóch płynów

Laszlo Tisza (College de France, Paryż)

Pomysł: traktujemy hel II jako **mieszalinę dwóch płynów**, z których jeden tworzy **kondensat Bosego-Einsteina** o zerowej entropii i lepkości, a drugi jest **normalną cieczą** spełniającą standardowe równania hydrodynamiki i posiadającą niezerową entropię. Względna gęstość obu komponentów jest funkcją temperatury:

- gęstość cieczy normalnej spada do zera dla $T=0$
- gęstość kondensatu Bosego-Einsteina spada do zera dla $T=T_\lambda$

Model dwóch cieczy pozwolił wytłumaczyć jakościowo wszystkie zjawiska dotyczące helu-II.

W szczególności szybkość rozchodzenia się

„fali cieplnej” czyli tzw. **drugiego dźwięku** wynosi:

$$V_2(T) = 26 \sqrt{\frac{T}{T_\lambda} \left[1 - \left(\frac{T}{T_\lambda} \right)^{11/2} \right]} [m/s]$$

Tisza L., Nature 141, 913 (1938).

Supplement to NATURE of May 21, 1938

913

Transport Phenomena in Helium II

F. LONDON¹ 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.³—is distributed over the excited states in a way determined by the temperature, while the rest— n_0 — n atoms per cm.³—is 'condensed' in the lowest energy level. If T_0 denotes the temperature of degeneracy, the ratio n/n_0 is given by

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

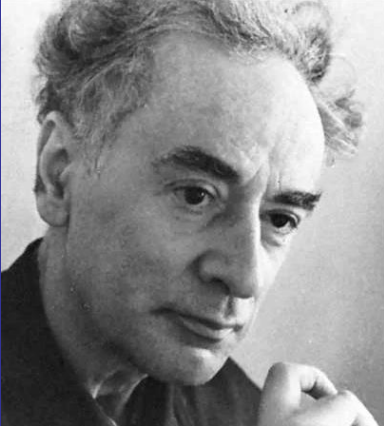
For an ideal Bose-Einstein gas, according to London, $s = 3/2$, but for the real fluid one should rather insert $s = 5$ in order to fit Keesom's specific heat

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 capillary². 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.



Lew D. Landau (Charków -> Moskwa, 1937)

Landau L.D., J. Phys. USSR 5, 71 (1941):

„L. Tisza [..] zasugerował, że hel II należy uznać za zdegenerowany, idealny gaz Bosego [..] Tego punktu widzenia nie można jednak uznać za zadowalający [..] nic nie zapobiegłoby zderzeniu atomów w stanie normalnym ze wzbudzonymi atomami, tj. podczas ruchu w cieczy doświadczaliby tarcia i nadpłynność w ogóle nie mogłaby istnieć. Dlatego wyjaśnienie podane przez Tiszę nie tylko nie ma oparcia w jego założeniach, ale jest z nimi w bezpośredniej sprzeczności.”

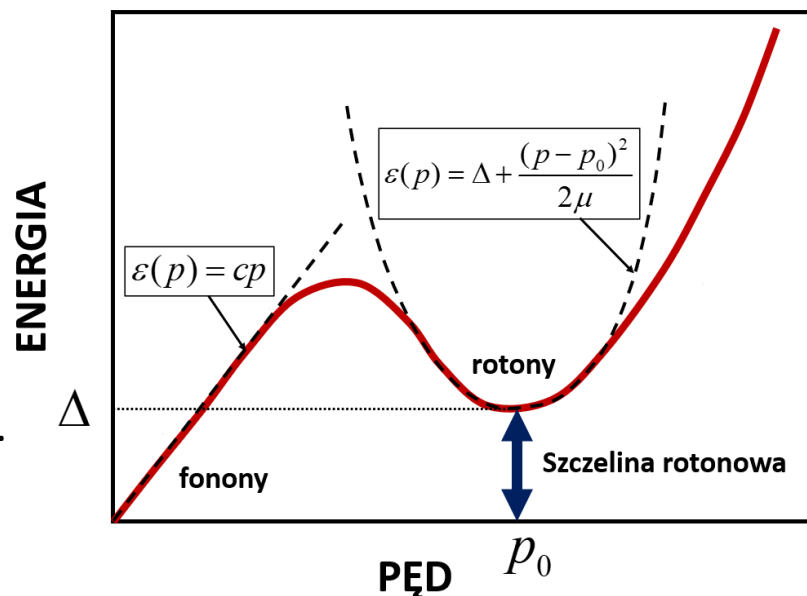
Koncepcja **kwazicząstek** – elementarne wzbudzenia układu.

Dwa typy wzbudzeń helu II o dwóch różnych relacjach dyspersyjnych:

- **Fonony**
- **Rotony**

Konsekwencje:

- Istnieje **prędkość krytyczna** ruchu składowej nadciekłej, poniżej której ruch odbywa się bez dyssypacji energii: tzw **prędkość krytyczna Landaua**.
- Odtworzenie eksperymentalnej zależności ciepła właściwego od temperatury.



Kto miał rację?

Pomysł Landaua można powiązać z modelem dwóch płynów:

Wzbudzenia kwazicząstkowe tworzą **składową normalną** i w naturalny sposób znikają w temperaturze $T=0$.

Własności **fononów** i **rotonów** (relacje dyspersyjne) może wyznaczyć z dopasowania do danych eksperymentalnych dot. ciepła właściwego helu-II w funkcji temperatury.

Słabość koncepcji Landaua: brak poprawnego opisu składowej nadciekłej (odrzućcie ideę kondensatu Bosego-Einsteina).

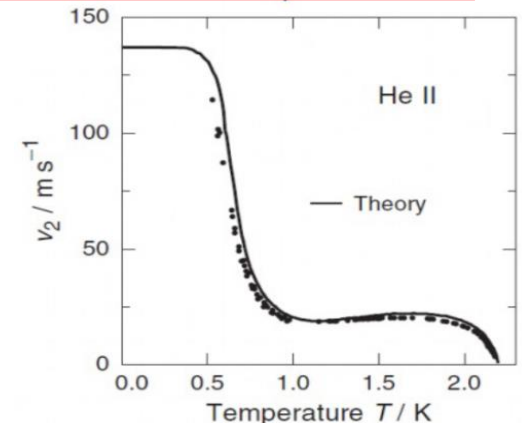
Słabość koncepcji Tiszy: nieprawidłowy opis własności składowej normalnej.

Stąd różne ilościowe przewidywania dot. **drugiego dźwięku**:

$$\text{Tisza: } V_2(T=0) = 0 \qquad \text{Landau: } V_2(T=0) = \frac{c}{\sqrt{3}}$$

Badania eksperymentalne potwierdziły w 1948 roku przewidywanie Landaua.

Peshkov V.P., Zh. Eksp. Teor. Fiz. 18, 951 (1948).



From Enss, Hunklinger, Low-temperature physics, 2005.

Prędkość krytyczna Landaua wynikająca z istnienia dwóch charakterystycznych prędkości:

$$V_{\text{kryt. fonon}} = c$$

$$V_{\text{kryt. roton}} = \sqrt{\frac{2\Delta}{\mu}}$$

nie występuje w modelu Tiszy.

Landau o podejściu Tiszy (Phys. Rev. 75, 884 (1949)):

„Cieszę się, że mogę oddać hołd L. Tiszy za wprowadzenie w roku 1938, koncepcji makroskopowego opisu helu II poprzez rozdzielenie gęstości cieczy na dwie części i wprowadzenie odpowiednio dwóch pól prędkości. Umożliwiło to przewidywania dwóch rodzajów fal dźwiękowych w helu II [artykuł Tiszy [..] nie był dostępny w ZSRR aż do 1943 roku z powodu wojny i żałuję również że nie zauważyłem jego poprzedniego krótkiego artykułu]. Jednak jego cała ilościowa teoria (zarówno mikroskopowa, jak i termodynamiczno-hydrodynamiczna) jest, w mojej opinii, całkowicie błędna.”

Prawdopodobnie nie jest to prawda. W pracy Kapicy z 1941 są odnośniki do dwóch prac Tiszy. Landau był w grupie Kapicy od 1937 roku.

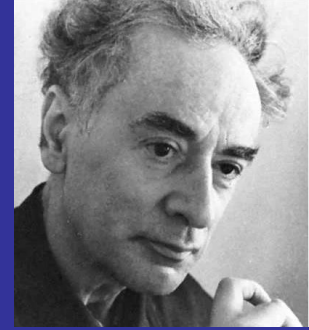
Landau nigdy też nie cytował Fritza Londona, który wysunął ideę kondensatu BE.

Odpowiedź Tiszy:

„Landau skrytykował nasze idee nie tyle z powodu ich wewnętrznej niekonsystencji, ile z powodu ich niezgodności z jego teorią fononów i rotonów. Naprawdę jesteśmy pod wrażeniem śmiałości i mocy podejścia Landaua ale wydaje nam się, że wprowadził on do swojej teorii pewne mniej lub bardziej ukryte założenia, których spełnienie nie jest oczywiste w porównaniu z zasadami mechaniki kwantowej.”



Co wiemy dziś?



Tisza miał słuszną intuicję wiążąc składową nadciekłą z kondensatem Bosego-Einsteina.

Statystyka kwantowa Bosego-Einsteina, zignorowana przez **Landaua**, ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia zachowania składowej nadciekłej.

Obaj jednak popełnili błąd:

- Kondensat składa się z **oddziałujących bozonów!**
- Bogoliubov pokazał, że **słabo oddziałujący kondensat bozonowy** posiada widmo wzbudzeń o **liniowej relacji dyspersyjnej** czyli **FONONY Landaua** (Bogoliubov N.N., J. Phys. USSR 11, 23 (1947))
- **Rotony** pojawiają się w widmie helu II na skutek wyjątkowo silnego oddziaływania.
- Oddziaływanie wybija atomy z kondensatu nawet dla $T=0$.
- W helu II tylko ok. **10% atomów w temperaturze zera bezwzględnej znajduje się w kondensacie.**

Mimo to **WSZYSTKIE** atomy w temperaturze $T=0$ tworzą komponent nadciekły!

Istnienie kondensatu implikuje bezwirowość pola prędkości składowej nadciekłej:

$$\nabla \times \vec{v} = 0$$

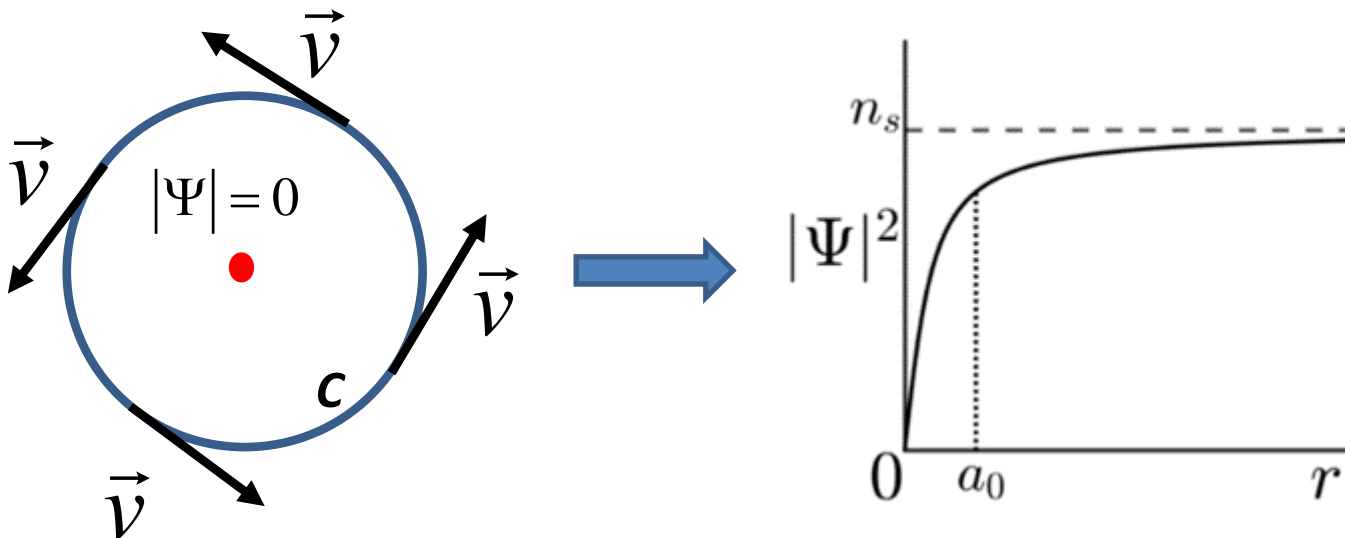
Funkcja falowa kondensatu:

$$\Psi(\vec{r}, t) = |\Psi(\vec{r}, t)| \exp[i\varphi(\vec{r}, t)]$$

$$\vec{v} \propto \nabla \varphi$$

$$\oint_C \vec{v} \cdot d\vec{l} = \frac{2\pi\hbar}{m} n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad \text{Skwantowana cyrkulacja komponentu nadciekłego}$$

Wir kwantowy



Poniżej **prędkości krytycznej** generacja **wirów kwantowych** jest jedynym sposobem dyssypacji energii ruchu cieczy i generacji niezerowego momentu pędu w nadciekłym komponentcie cieczy.

Wiry kwantowe w helu II

Powyżej punktu lambda

Poniżej punktu lambda

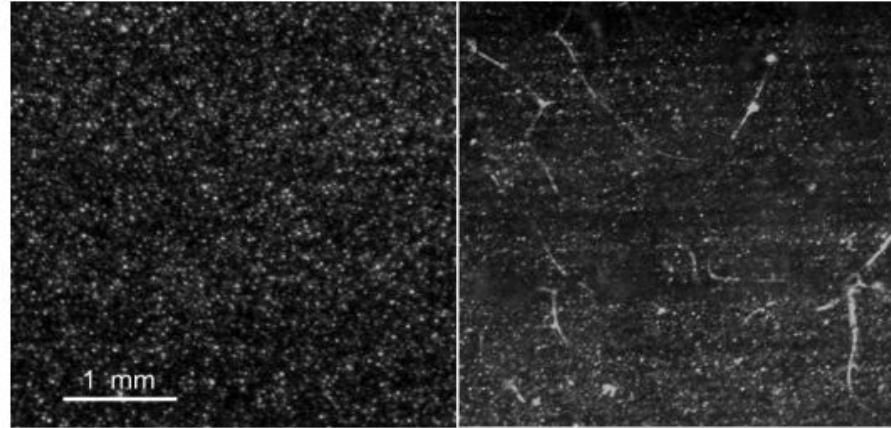
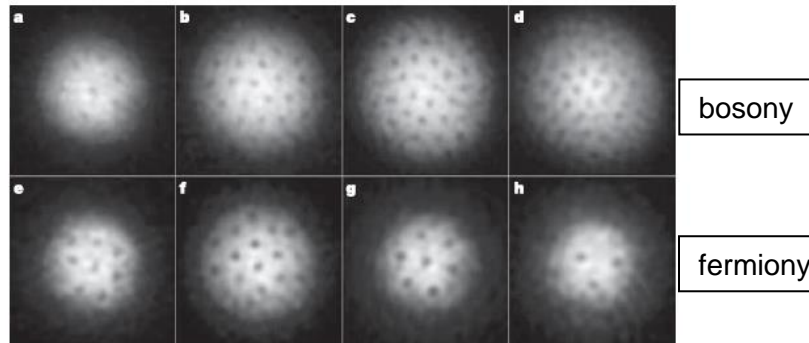
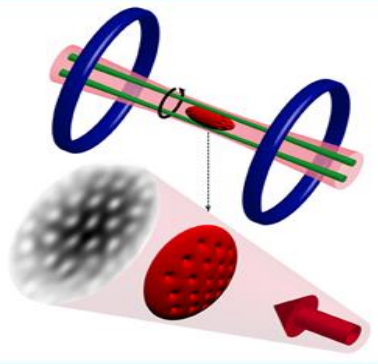


Figure 1: Images above and below the transition. For temperatures slightly above the lambda transition (left), hydrogen particles are randomly dispersed and make it possible to track the flow of the liquid helium. Below the transition (right), some fraction of the particles become trapped on lines in the flow. The particles are illuminated with a laser sheet; these are side views. Our data show that the lines thus observed are quantized superfluid vortices.

Wiry kwantowe w ultrazimnym gazie atomowym



Eksperyment z atomami Li-6

Figure 2 | Vortices in a strongly interacting gas of fermionic atoms on the BEC- and the BCS-side of the Feshbach resonance. At the given field, the cloud of lithium atoms was stirred for 300 ms (a) or 500 ms (b-h) followed by an equilibration time of 500 ms. After 2 ms of ballistic expansion, the

magnetic field was ramped to 735 G for imaging (see text for details). The magnetic fields were 740 G (a), 766 G (b), 792 G (c), 812 G (d), 833 G (e), 843 G (f), 853 G (g) and 863 G (h). The field of view of each image is $880 \mu\text{m} \times 880 \mu\text{m}$.

M.W. Zwierlein et al.,
Nature, 435, 1047 (2005)

Turbulencja w układach nadciekłych

Model dwóch płynów.

Turbulencja może powstawać w składowej normalnej – **turbulencja klasyczna**

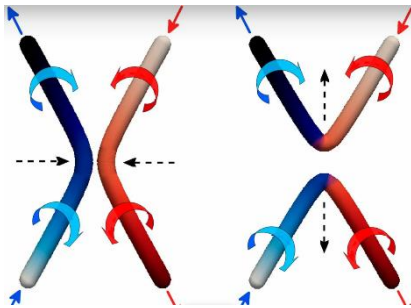
Składowa nadciekła jako układ splątanych wirów kwantowych wykazuje również ruch turbulentny – **turbulencja kwantowa**

W temperaturze $T=0$ mamy **czystą turbulencję kwantową**.

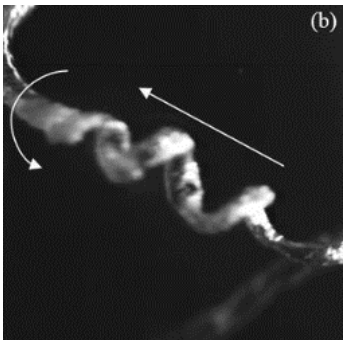
Cechą charakterystyczną układów turbulentnych jest **przekaz energii od większych skal długości do mniejszych**.

Kluczową rolę w tym procesie odgrywają **rekoneksje wirów** i generacja **fal Kelvina** – fal rozchodzących się wzdłuż wirów.

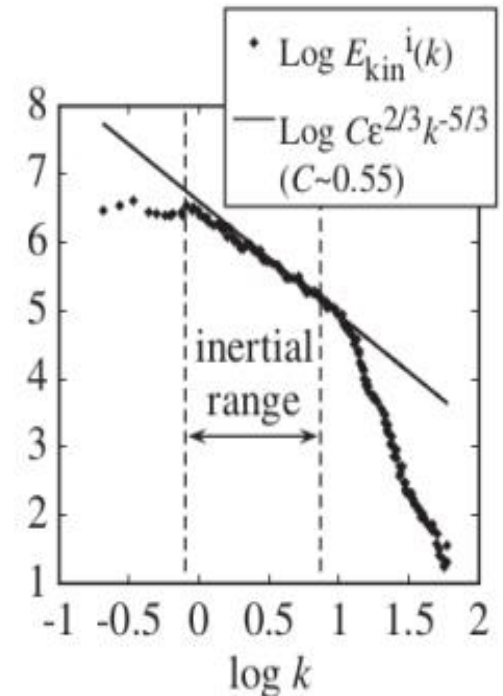
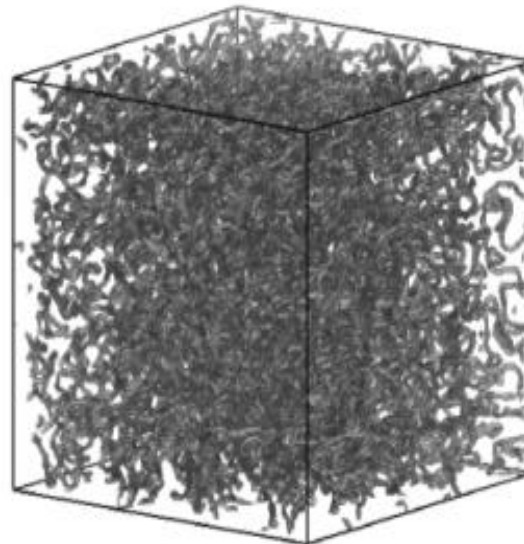
Rekoneksja wirów



Fala Kelvina



Splątane wiry kwantowe:
stan turbulentny



„Dziedzina badań własności materji w niskich temperaturach jest rozległa, pełna najbardziej dziwnych i niespodziewanych zjawisk, których zbadanie niewątpliwie rzuci nowe światło na Tajemnicę budowy wewnętrznej materji.”

