
Od odkrycia nadciekłości do kwantowej turbulencji

Piotr Magierski*

Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej, Department of Physics, University of Washington

Abstrakt. W 1927 roku Mieczysław Wolfke i Willem Keesom zaobserwowali przejście fazowe w ciekłym helu. Poniżej temperatury 2,28 K gwałtownej zmianie uległy własności cieczy nazwanej helem II. Nie wiedzieli, że właśnie odkryli nowy rodzaj substancji, której własności wynikają z efektów kwantowych ujawniających się w niskiej temperaturze. Ich zrozumienie było przez wiele lat wyzwaniem dla fizyków, a postępujące badania stworzyły nową gałąź fizyki: fizykę niskich temperatur.

Słowa kluczowe: nadciekłość, nadprzewodnictwo, hel II, wiry kwantowe, turbulencja kwantowa

Abstract. In 1927 Mieczysław Wolfke and Willem Keesom have observed phase transition in liquid Helium. Below temperature of 2,28 K properties of the liquid, which dubbed Helium II, have changed abruptly. They did not realize they had just discovered a new kind of substance, having properties which are consequence of quantum effects manifesting themselves at low temperatures. Their understanding remained a challenge for physicists for many years and progressing research has resulted in creation of a new branch of physics: low temperature physics.

Keywords: superfluidity, superconductivity, Helium II, quantum vortices, quantum turbulence

1. Odkrycie nadciekłości

W lipcu 1908 roku na Uniwersytecie w Lejdzie wybitny holenderski fizyk Heike Kamerlingh Onnes doprowadził do skroplenia helu. Jednak to nie badania helu były jego celem. Ciekły hel był potrzebny do schłodzenia próbki platyny, dla której wykonywał pomiary zależności oporu elektrycznego od temperatury. W tamtym czasie nie było jasne jak będzie zachowywać się opór elektryczny materiału w bardzo niskich temperaturach. Lord Kelvin - uznany fizyk brytyjski twierdził, że opór powinien gwałtownie wzrastać, gdy temperatura dąży do zera bezwzględnego. Wiedzano wtedy, że za transport ładunku elektrycznego odpowiedzialne są elektrony, a opór jest konsekwencją ich rozpraszania przez jony metalu. Nie wiadomo jednak było, jak zmienia się amplituda rozpraszania z temperaturą. Eksperyment z platyną nie był zbyt udany. Stwierdzono tylko, że poniżej temperatury 4,25 K opór jest stały, co przeczyło hipotezie Kelvina. W końcu Kamerlingh Heike Onnes zdecydował się zastąpić platynę rtęcią i w 1911 roku zaobserwował zadziwiające zjawisko: przy temperaturze 4,2 K opór nagle spadł z wartości $0,1\Omega$ do wartości mniejszej niż $10^{-6}\Omega$, co było wtedy granicą dokładności pomiaru. Dzięki temu odkryto zjawisko nadprzewodnictwa w metalach. Przy okazji, prawdopodobnie nieświadomie, odkryto również przejście fazowe helu do stanu nadciekłości, Kamerlingh Onnes zanotował bowiem w swoim dzienniku laboratoryjnym [1]: *Dorsman (który kontrolował i mierzył temperatury) na prawdę 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. Zauważono zatem efekt występujący przy schłodzeniu helu poniżej temperatury 2,2 K. Jak dziś wiemy, następuje wówczas przejście fazowe i hel zmienia stan skupienia na nadciekły. Jednak na prawdziwe odkrycie tej przemiany fazowej trzeba było poczekać jeszcze ponad 10 lat.

Od 1924 roku na Uniwersytecie w Lejdzie był regularnie Mieczysław Wolfke. Jego zainteresowania dotyczyły głównie pomiarów stałej dielektrycznej substancji w niskich temperaturach. Wyznaczył ją dla ciekłego i stałego wodoru oraz ciekłego helu. Planował również zestalić hel pod ciśnieniem, co udało się później Willemowi Keesomowi dzięki metodzie zaproponowanej przez Wolfkego [2]. Właśnie przy badaniu zależności stałej dielektrycznej helu od temperatury Wolfke i Keesom zauważyli dziwne zjawisko, występujące przy temperaturze ok. 2,2 K, które wskazywało na gwałtowną zmianę własności helu [3, 4]. Aby wyróżnić tę nową odmianę helu, występującą w niskich temperaturach, nazwali ją *helem II*. Wyznaczono również temperaturę przejścia $T_\lambda = 2,28\text{ K}$, a punkt przemiany fazowej nazwano punktem λ . Tak referował swoje odkrycie Wolfke na posiedzeniu Towarzystwa Naukowego Warszawskiego [2]: *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,*

*e-mail: piotr.magierski@pw.edu.pl
ORCID: 0000-0001-8769-5017

również ciekłą. Nazwijmy modyfikacją 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, jaką posiada ciekły hel II. Słuszność naszego przypuszczenia została potwierdzoną przez cały szereg anomalii, jakie ciekły hel w powyższej temperaturze ujawnia, na które jednak dotychczas nie zwrócono dostatecznej uwagi. Anomalje te dotyczą poniżej wymienionych zjawisk.[...] Charakteryzując dwie te modyfikacje ciekłego helu stwierdzamy, że ciekły hel II, modyfikacja stała w niższych temperaturach, posiada mniejsze: stałą dielektryczną, gęstość i napięcie powierzchniowe, większe zaś ciepło parowania, niż ciekły hel I, przyczem przemiana ciekłego helu II w ciekły hel I wymaga odpowiedniego ciepła.

Szkoda jednak, że Wolfke nie kontynuował tych badań. Później Keesom ze współpracownikiem odkryli również zdolność przepływu helu II przez bardzo wąskie szczeliny.

Dopiero 10 lat później, w grudniu 1937 roku, do czasopisma *Nature* wpłynęły dwie prace: Piotra Kapicy z Instytutu Problemów Fizycznych w Moskwie *Viscosity of liquid helium below the lambda point* [5] oraz Johna F. Allena i Dona Misenera z Laboratorium Mond w Cambridge *Flow of liquid Helium-II* [6].

W swoim artykule Kapica napisał: *Przepływ cieczy powyżej punktu λ można było wykryć tylko po czasie kilku minut, podczas gdy poniżej punktu λ 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 przy normalnym ciśnieniu. [...] hel poniżej punktu λ znajduje się w wyjątkowym stanie, który mógłby być nazwany nadciekłym.*

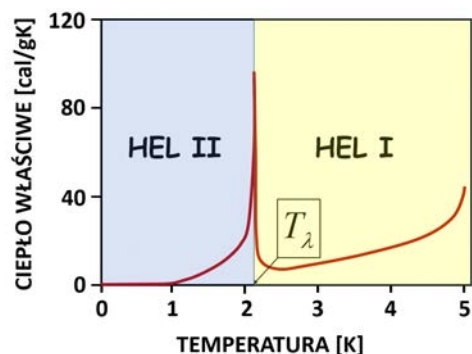
Kapica po raz pierwszy użył terminu nadciekłość, przy czym ewidentnie nawiązywał do stanu nadprzewodzącego w metalu odkrytego przez Kamerlingha Onnesa, o czym zresztą wspominał. Biorąc pod uwagę, że ani teoria nadciekłości ani teoria nadprzewodnictwa jeszcze nie istniały (teoria BCS opisująca nadprzewodnictwo w metalach powstała dopiero w 1957 roku), Kapica wykazał się ogromną intuicją, dziś bowiem wiemy, że oba zjawiska są rzeczywiście blisko spokrewnione.

Niezależnie od Piotra Kapicy John Allen i Don Misener także zauważyli gwałtowny spadek lepkości helu II. W swoim artykule napisali: *Badanie różnych właściwości ciekłego helu II skłoniło nas do dokładniejszego zbadania jego lepkości. Jeden z nas [...] wcześniej wydedukował górną granicę 10^{-5} jednostek cgs dla lepkości helu II przez pomiar tłumienia oscylacji cylindra. Doszliśmy do tego samego wniosku co Kapica w powyższym liście; mianowicie, że ze względu na wysoką liczbę Reynoldsa, pomiary prawdopodobnie wskazują na przepływ nielaminarny.*

Tak więc obaj badacze zwrócili szczególną uwagę na zanik lepkości helu II, który umożliwiał swobodny przepływ tej substancji nawet przez bardzo wąskie kapilary. Jednak tylko Piotr Kapica został uhonorowany nagrodą Nobla za fundamentalne dokonania w dziedzinie fizyki niskich temperatur (1978).

2. Kłopot z helem II

Ciekły hel, schłodzony do temperatury poniżej 3 K, wykazuje raptowny skok ciepła właściwego. Świadczy to o gwałtownej zmianie strukturalnej wewnątrz substancji, która powstaje w wyniku przejścia fazowego. Z uwagi na kształt zależności ciepła właściwego od temperatury przypominający grecką literę λ (rys. 1), punkt nieciągłości nazwano punktem λ , któremu odpowiada temperatura T_λ . Poniżej T_λ ciecz zmienia diametralnie swoje własności. Można wyróżnić trzy efekty, które są przejawem nietypowych własności helu II. Pierwszym z nich jest zjawisko wspinania się cieczy po ściankach naczynia z helem II. Tworzy się w ten sposób cienka warstwa cieczy przylegająca do ścianek. Z tego powodu hel II może samoistnie wylewać się z naczynia. Drugim zdumiewającym efektem jest zjawisko przepływu cieczy nawet przez bardzo cienkie kapilary o średnicy rzędu 10^{-8} – 10^{-9} m. Co więcej, podczas wypływu zaobserwowano zwiększenie temperatury w zbiorniku z pozostałym helem. Trzecim zjawiskiem, któremu zawdzięczamy nazwę nadciekłość, jest zanik lepkości. Nie oznacza to jednak, że lepkość helu poniżej temperatury T_λ spada do zera. W przeprowadzonych eksperymentach zanurzano w cieczy drgające wahadło torsyjne. Zauważono, że oscylacje są stopniowo wyhamowywane i w związku z tym wskazują na małą, ale jednak niezerową lepkość. Z drugiej strony, przepływ cieczy przez wąską kapilarę może odbywać się praktycznie bez żadnej różnicy ciśnień wskazując, że w tym przypadku lepkość spada do zera. Owe dwa wzajemnie sprzeczne rezultaty wskazujące na zależność wartości lepkości od rodzaju przeprowadzanego eksperymentu stanowiły wielką zagadkę. Efekty te były zupełnie niezrozumiałe na gruncie fizyki klasycznej i stało się



Rys. 1. Ciepło właściwe ciekłego helu w otoczeniu punktu λ odpowiadającego temperaturze $T_\lambda \approx 2,2$ K. Poniżej tej temperatury ciecz jest w stanie nadciekłym (hel II), powyżej – w stanie normalnym (hel I)

wkrótce jasne, że wytłumaczenie dziwnych własności helu II wymaga całkiem nowego modelu teoretycznego.

Węgierski fizyk Laszlo Tisza był pierwszym, który stworzył fenomenologiczną teorię opisującą zachowanie helu II. Dziś znamy ją pod nazwą modelu dwóch płynów. Była to pomysłowa próba włączenia do opisu nadciekłości kondensacji Bosego–Einsteina, należy bowiem pamiętać, że od ok. 1925 roku znane było teoretyczne przewidywanie tego szczególnego stanu gazu. Wedle hipotezy wysuniętej przez indyjskiego fizyka Satyendra Natha Bosego, gaz identycznych cząstek o spinie całkowitym (w jednostkach stałej Plancka) w dostatecznie niskich temperaturach doznaje przejścia fazowego do stanu, w którym makroskopowa ilość cząstek gazu znajduje się w tym samym stanie kwantowym. Uogólnienie wyników Bosego na przypadek cząstek masowych zostało dokonane przez Alberta Einsteina [8, 9]. We wstępie do swojej książki [7] Fritz London napisał: *W 1924 Einstein opracował bardzo dziwną koncepcję gazu identycznych molekuł, które z założenia były nieodróżnialne. Einstein zauważył, że to usunięcie ostatniego śladu indywidualności cząsteczek implikuje statystyczną preferencję cząsteczek do posiadania takiej samej prędkości, nawet jeśli jakiegokolwiek oddziaływania między nimi zostały pominięte, oraz ta preferencja prowadziły, w dobrze określonej temperaturze, do pewnego rodzaju zmiany stanu skupienia: cząsteczki „kondensowałyby” do najniższego stanu kwantowego, stanu o zerowym pędzie. 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. Ponadto poddawano w wątpliwość poprawność matematyczną rozważań Einsteina, a zatem sprawa została zignorowana, jakby nie było „kondensacji Bosego–Einsteina”.*

Einstein podał również wyrażenie na temperaturę, w której cząstki (bozony) o masie m i gęstości n tworzą kondensat:

$$T_{BEC} = \left(\frac{2\pi\hbar^2}{1,897mk_B} \right) n^{2/3}, \quad (1)$$

gdzie k_B jest stałą Boltzmana. Fritz London, fizyk urodzony w 1900 roku we Wrocławiu (wówczas Breslau), policzył, ile wynosiłaby temperatura kondensacji, jeśli zastosować wzór Einsteina do cieczy złożonej z atomów ^4He . Otrzymał wynik $T_{BEC} = 3,1$ K, który jest tylko nieznacznie większy od T_λ . Fritz London studiował filozofię, a później fizykę na uniwersytetach w Bonn, Frakfurcie, Göttingen i Monachium. W końcu znalazł się w Paryżu, gdzie dostał etat w Instytucie Henri Poincarégo. Tam

też spotkał Laszlo Tiszę, który przyjechał do Paryża po studiach w Budapeszcie, Göttingen i Charkowie. W Paryżu od 1937 roku był pracownikiem Collège de France.

Wiemy, że Tisza, dzięki kontaktom z Londonem, zainspirował się jego hipotezą i spróbował zastosować ją do zrozumienia własności helu II [10]. Zaproponował, aby potraktować hel poniżej temperatury T_λ jako układ dwóch płynów – jeden zawierający atomy helu, które tworzą kondensat Bosego–Einsteina, a drugi to cząstki znajdujące się poza kondensatem. Pierwszy składnik cieczy tworzy tzw. płyn nadciekły, którego lepkość, a w konsekwencji entropia, jest zerowa, podczas gdy drugi składnik stanowi płyn normalny, spełniający standardowe równania hydrodynamiki i posiadający niezerową entropię. Stosunek gęstości obu składników jest funkcją temperatury. W temperaturze zera absolutnego gęstość cieczy normalnej spada do zera, podczas gdy w temperaturze T_λ znika składnik nadciekły. W 1938 roku pojawiła się w czasopiśmie *Nature* krótka notatka Tiszy, gdzie po raz pierwszy został wprowadzony termin: model dwóch płynów [11].

Model Tiszy pozwolił wytłumaczyć dziwne zachowanie helu II oraz dwa pozornie sprzeczne eksperymenty z wahadłem torsyjnym i przepływem przez wąską kapilarę. W szczególności efekt przepływu przez wąskie kapilary jest możliwy tylko dzięki istnieniu składowej nadciekłej. Z drugiej strony, ponieważ ten rodzaj przepływu nie przenosi entropii, pozostająca w naczyniu ciecz zwiększa entropię na jednostkę objętości, a co za tym idzie jej temperatura rośnie. Natomiast efekt tłumienia oscylacji wahadła zanurzonego w helu II jest spowodowany obecnością normalnego komponentu cieczy.

Model dwóch płynów pozwolił do roku 1939 wyjaśnić, przynajmniej jakościowo, wszystkie obserwowane efekty związane z helem II. Ponadto Tisza wysunął hipotezę, że transport ciepła zachodzi zupełnie inaczej w helu II niż w cieczy normalnej. W normalnych substancjach transport ciepła jest wynikiem dobrze znanego procesu dyfuzji. Tisza zauważył jednak, że konsekwencją modelu dwóch płynów jest zupełnie inny charakter przewodzenia ciepła. Mianowicie, wedle modelu Tiszy, transport ciepła ma charakter falowy, gdzie „fala cieplna” powstaje jako lokalne zaburzenie różnicy gęstości między składową normalną i nadciekłą. Ta fala powinna rozchodzić się z określoną prędkością i model dwóch płynów przewidywał, że wynosi ona:

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

Z uwagi na podobieństwo do rozchodzenia się fali dźwiękowej, transport ciepła został później nazwany drugim dźwiękiem i stanowi obecnie jedną z podstawowych charakterystyk układów nadciekłych. Tisza uważał, że weryfikacja tego przewidywania stanie się świetnym testem

modelu dwóch płynów. Rzeczywiście, jego istnienie zostało potwierdzone w 1946 roku.

Należy jednak pamiętać, że model Tiszy ma charakter fenomenologiczny. Równania hydrodynamiki dla tego modelu nie zostały wyprowadzone z mikroskopowych rozważań, a jedynie zapostulowane. Dziś wiemy, że o ile założenie Tiszy o związku składowej nadciekłej z kondensacją Bosego–Einsteina jest słuszne, to jednak utożsamienie składowej nadciekłej tylko z cząstkami tworzącymi kondensat jest błędne. Nawet w temperaturze zera bezwzględnej cząstki te nie stanowią całości cieczy. Procent cząstek tworzących kondensat zależy od siły oddziaływania między nimi. Tylko w granicy, w której oddziaływanie znika, liczba cząstek w kondensacie, w temperaturze zera bezwzględnej, osiąga 100%. Paradoksalnie w helu II oddziaływanie jest bardzo silne i nawet w temperaturze zerowej ilość cząstek w kondensacie wynosi tylko ok. 10%. Mimo to, w tej temperaturze układ posiada tylko składową nadciekłą.

Próbie wytłumaczenia własności helu II na gruncie mikroskopowym podjął Lew Landau. Przeniósł się z Charkowa do Moskwy w 1937 roku, aby dołączyć do grupy eksperymentalnej Piotra Kapicy. Tu powstała fundamentalna praca, w której Landau wprowadził pojęcie fononów i rotonów w kontekście helu II [12]. Landau uważał koncepcję kondensatu Bosego–Einsteina, który wg Tiszy był decydującym założeniem prowadzącym do wyjaśnienia zjawiska nadciekłości, za błędną. W swojej pracy z 1941 roku [13] napisał: *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 doświadczałyby 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.*

Landau w dalszej części pracy wprowadził pojęcie skwantowanego ruchu cieczy pisząc, że każdy stan wzbudzony cieczy można uznać za złożony ze wzbudzeń elementarnych. Podzielił je na dwie kategorie: fonony – odpowiedzialne za rozchodzenie się dźwięku i rotony, których natura była bardziej tajemnicza, choć nazwa nawiązywała do wzbudzeń w postaci elementarnych wirów. Różna natura obu typów wzbudzeń wiązała się z ich różnymi relacjami dyspersyjnymi, czyli związkami między energią i pędem. W przypadku fononów relacja ta była liniowa: $\epsilon(p) = cp$, gdzie c to prędkość dźwięku. Natomiast dla rotonów relacja miała postać: $\epsilon(p) = \Delta + \frac{(p-p_0)^2}{2\mu}$. Parametr Δ jest nazywany szczylną rotonową i definiuje minimalną możliwą energię rotonu, p_0 – odpowiadający jej pęd, a μ – efektywną masę rotonu. Postać relacji dyspersyjnej dla helu II

pokazana została schematycznie na rys. 2. Należy zauważyć przy tym, że dla wzbudzeń o dostatecznie dużej energii relacja dyspersyjna przechodzi w znaną relację pomiędzy energią i pędem cząstki helu: $\epsilon(p) = \frac{p^2}{2m}$. Modifikacja relacji dyspersyjnej dla niskoenergetycznych wzbudzeń helu II wynika z oddziaływania pomiędzy cząstkami cieczy. Oczywiście Landau nie był w stanie wyznaczyć parametrów Δ , μ , p_0 z mikroskopowej teorii opisującej oddziaływania międzycząsteczkowe w cieczy. Jednak wykorzystując swoją hipotezę mógł wyznaczyć ciepło właściwe układu w funkcji temperatury. Ciepło właściwe jest wielkością, która silnie zależy od własności elementarnych wzbudzeń układu. Dlatego po wyznaczeniu tej wielkości Landau zauważył, że otrzymana zależność bardzo dobrze zgadza się z eksperymentem, jeśli przyjąć $\Delta \approx 8,5$ K i $\mu \approx 7,5m$, gdzie m jest masą atomu helu.

W jaki sposób model Landaua wiąże się z modelem dwóch płynów Tiszy? Otóż w skończonej temperaturze poniżej T_λ w cieczy istnieje pewna liczba wzbudzeń w postaci fononów i rotonów i to one tworzą jej normalną składową. Normalny płyn charakteryzuje się niezerową entropią i skończoną lepkością. Reszta cieczy stanowi natomiast składową nadciekłą. W temperaturze zera bezwzględnej liczba wzbudzeń elementarnych w układzie dąży do zera, czyli znika składowa normalna, podczas gdy dla $T = T_\lambda$ znika składowa nadciekła.

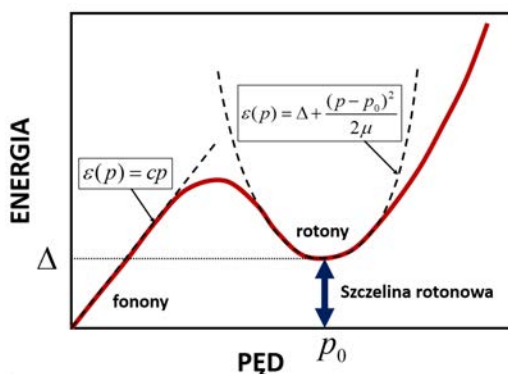
Co więcej, Landau był w stanie, w ramach swojego modelu, określić graniczną prędkość składowej nadciekłej, zauważył bowiem, że model fononów i rotonów, jako dwóch typów wzbudzeń elementarnych, przewidywało istnienie dwóch rodzajów prędkości charakterystycznych dla cieczy:

$$V_{\text{kryt.fonon}} = c, \quad (3)$$

$$V_{\text{kryt.roton}} = \sqrt{\frac{2\Delta}{\mu}}. \quad (4)$$

Obydwie prędkości stanowią rodzaj prędkości granicznych dla przepływu helu II. Jeśli przepływ odbywa się z prędkością mniejszą niż $V_{\text{kryt.fonon}}$, to z zasady zachowania energii i pędu wynika, że w układzie nie można wzbudzić fononów. Natomiast podczas przepływu z prędkością mniejszą niż $V_{\text{kryt.roton}}$ nie zostaną wzbudzone żadne rotony. Ponieważ wzbudzenie fononów i rotonów jest jedynym sposobem na to, aby układ w modelu Landaua wykazywał niezerową lepkość, oznacza to, że przepływ będzie wykazywał cechy nadciekłości, jeśli ruch cieczy będzie dostatecznie wolny.

Ten wynik, który obecnie funkcjonuje w literaturze pod nazwą prędkości krytycznej Landaua, jest cechą charakterystyczną każdego układu nadciekłego. Poniżej tej prędkości, w temperaturze zera bezwzględnej, podczas ruchu cieczy nie występuje zjawisko lepkości,



Rys. 2. Schematyczne widmo wzbudzeń kwazicząstkowych helu II w modelu Landaua. Dla niskich energii relacja dyspersyjna jest liniowa i odpowiada fononom; wzbudzenia rotonowe charakteryzuje energia wzbudzenia większa od Δ i kwadratowa zależność od pędów

ponieważ energia przepływu nie może się rozpraszać, to bowiem oznaczałoby wzbudzenie fotonów i rotonów.

Mimo, że teoria Landaua zgadzała się z modelem Tiszy, w podejściu Tiszy nie istniało pojęcie prędkości krytycznej. Ponadto model Tiszy przewidywał, że prędkość drugiego dźwięku dąży do zera w temperaturze zera bezwzględnego (2), podczas gdy podejście Landaua przewidywało, że $V_2(0) = \frac{c}{\sqrt{3}}$. Dokładne pomiary prędkości drugiego dźwięku wykonane w 1948 wykazały, że to Landau miał rację [14].

Teoria Landaua zapoczątkowała również bardzo płodne podejście teoretyczne do badania cieczy kwantowych, których własności wynikają ze wzbudzeń elementarnych. Obecnie nazywamy je kwazicząstkami. Kwazicząstki charakteryzują się określonymi relacjami dyspersyjnymi (tzn. relacjami między energią i pędem) i funkcjonują zarówno w układach bozonowych, takich jak ciekły ^4He , jak i fermionowych, takich jak np. ^3He .

Trzeba jednak przyznać, że Tisza miał częściowo rację, gdy wiązał własności nadciekłego helu II z kondensatem Bosego–Einsteina. Landau odrzucał tę koncepcję i w ogóle nie brał pod uwagę roli statystyk kwantowych Bosego–Einsteina i Fermiego–Diraca dla własności zaproponowanych przez siebie kwazicząstek. W 1949 roku napisał krótki artykuł w *Physical Review* [15], w którym odniósł się do modelu Tiszy: *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.*

W odpowiedzi Tisza napisał [16]: *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.

Landau jednak był w błędzie, ponieważ koncepcja kondensatu Bosego–Einsteina oddziałujących cząstek jest kluczowa dla wyjaśnienia, skąd się biorą fonony o liniowej relacji dyspersyjnej. W 1947 roku Bogoliubow wykazał, w ramach mikroskopowej teorii opisującej słabo oddziałujący gaz bozonów, że w dostatecznie niskiej temperaturze układ ten podlega również kondensacji Bosego–Einsteina [17]. Jego widmo wzbudzeń charakteryzuje się natomiast liniową zależnością dyspersyjną. Bogoliubow pokazał również, że współczynnik proporcjonalności w relacji dyspersyjnej, czyli prędkość dźwięku, wiąże się z natężeniem oddziaływania między cząstkami. Z jego teorii wynika także, że kondensat Bosego–Einsteina nie obejmuje wszystkich cząstek, a tylko ich część i zależy to od siły oddziaływania między bozonami. Mikroskopowa teoria rozwinięta przez Bogoliubowa dotyczyła jednak tylko słabo oddziałującego gazu bozonów. Nie mógł odtworzyć w jej ramach części rotonowej spektrum wzbudzeń układu. W teorii Bogoliubowa krzywa dyspersyjna nie ma bowiem minimum odpowiadającego wzbudzeniom rotonów i przechodzi płynnie od zależności liniowej do zależności kwadratowej: $\epsilon(p) = \frac{p^2}{2m}$. Dziś wiemy, że dzieje się tak dlatego, iż hel II jest silnie oddziałującym układem bozonów, o czym świadczy fakt, że tylko niewielka część atomów ^4He tworzy kondensat Bosego–Einsteina.

Pomyłka Landaua, który zlekceważył rolę kondensatu Bosego–Einsteina w opisie nadciekłego helu II, była najprawdopodobniej spowodowana tym, że zarówno on, jak i Tisza myśleli o kondensacie złożonym z nieoddziałujących cząstek. Faktycznie, taki idealny gaz nie byłby nadcieczą (w tym przypadku prędkość dźwięku byłaby zerowa $c = 0$). Oddziaływanie cząstek tworzących kondensat Bosego–Einsteina jest kluczowe do odtworzenia poprawnej relacji dyspersyjnej dla fononów, a tym samym uzyskania skończonej prędkości krytycznej, poniżej której ruch składowej nadciekłej odbywa się bez strat energii wynikających z lepkości.

3. Ku kwantowej turbulencji

Nieuwzględnienie roli kondensatu Bosego–Einsteina w opisie nadciekłości prowadzi również do niezrozumienia roli wirów kwantowych w układach nadciekłych. Tylko dzięki temu, że atomy tworzą kondensat, jego pole prędkości ma charakter nierotacyjny (bezwirowy), co matematycznie wyraża się tym, że w każdym punkcie cieczy składowa nadciekła pola prędkości musi spełniać warunek:

$$\nabla \times \vec{v} = 0. \quad (5)$$

Oznacza to, że sumując prędkości wzdłuż dowolnej krzywej zamkniętej wewnątrz cieczy otrzymamy zero. Możliwe jest natomiast uzyskanie wartości niezerowej rotacji prędkości, ale tylko pod warunkiem, że wewnątrz konturu istnieje co najmniej jeden punkt, gdzie gęstość cieczy spada do zera. W takim przypadku wartość sumy prędkości wzdłuż krzywej zamkniętej nie może jednak przyjmować dowolnej wielkości, a jedynie zestaw dyskretnych wartości proporcjonalnych do stałej Plancka. Wyraża się to następującą relacją:

$$\oint_C \vec{v} \cdot d\vec{l} = \frac{2\pi\hbar}{m} n, \quad (6)$$

gdzie lewa strona równania oznacza sumę prędkości wzdłuż dowolnego konturu zamkniętego C , natomiast n jest dowolną liczbą całkowitą. Szczególna postać pola prędkości składowej nadciekłej, dla której $n \neq 0$, oznacza istnienie wirów kwantowych. Tworzenie wirów jest jedynym sposobem na przenoszenie w cieczy nadciekłej momentu pędu. Dlatego próba „rozkręcenia” zbiornika z cieczą nadciekłą prowadzi zwykle do wytworzenia szeregu wirów. Wiry te jednak różnią się od podobnych obiektów występujących w normalnych cieczech. W przypadku cieczy nadciekłej, z uwagi na brak lepkości, wir kwantowy jest obiektem stabilnym. Nie traci energii w związku z brakiem lepkości i nie może samoistnie zniknąć. Powstawanie wirów kwantowych w trakcie przepływu jest innym sposobem na rozpraszanie energii przepływu cieczy. Landau podejrzewał, że rotony są właśnie takimi elementarnymi wirami, jednak jego hipoteza okazała się fałszywa. Możliwość powstawania wirów kwantowych jest bezpośrednią konsekwencją istnienia kondensatu w cieczy nadciekłej, jak sądził Tisza. Rotony natomiast nie mają z wirami nic wspólnego. Landau wprowadził je do swojego opisu elementarnych wzbudzeń helu II, aby otrzymać poprawne wyrażenie na zachowanie się ciepła właściwego w funkcji temperatury. I choć istnienie tych szczególnych wzbudzeń zostało potwierdzone doświadczalnie, wiążemy je dziś z innym rodzajem wzbudzeń fononowych. Ponadto ich obecność, w przeciwieństwie do fononów o liniowej relacji dyspersyjnej, nie jest kluczowa dla zaistnienia zjawiska nadciekłości. Potrafimy już wytwarzać układy nadciekłe w gazach atomowych schłodzonych do bardzo niskich temperatur rzędu nanokelwinów [18]. W tych układach oddziaływanie jest dużo słabsze niż w helu II i wzbudzenia elementarne nie zawierają widma rotonowego. Jednak owe układy znajdują się w stanie nadciekłym, a wywołanie w nich kondensacji Bosego–Einsteina (1995) zostało uhonorowane nagrodą Nobla.

Własności układów nadciekłych, w których istnieje wiele wirów kwantowych tworzących splecione konfiguracje, są obecnie obiektem intensywnych badań [19]. Taki stan określa się mianem kwantowej turbulencji. Co więcej, okazuje się, że taki egzotyczny stan można wytworzyć

nie tylko w układach nadciekłych złożonych z bozonów, ale również w układach fermionowych, które wyjaśnia teoria nadprzewodnictwa. Termin ten został wprowadzony przez Richarda Feynmana w przełomowej pracy [20], gdzie badał zjawiska dyssypacji w helu II. William Vinen, w serii artykułów [21], rozwinął tę ideę w teorię fenomenologiczną. Turbulencja kwantowa jest dziś przedmiotem intensywnych prac teoretycznych i eksperymentalnych, gdyż podejrzewa się, że jest powszechnym zjawiskiem występującym w wielu układach nadciekłych i nadprzewodzących.

Wydaje się, że ani Kamerlingh Onnes, ani Mieczysław Wolfke czy Willem Keesom nie podejrzewali, że ich badania doprowadzą do tylu fascynujących odkryć i stworzą całą nową dziedzinę badań układów kwantowych. Układów, w których prawa mechaniki kwantowej prowadzą do tak nietypowych zachowań układów makroskopowych.

Literatura

- [1] van Delft D., Kes P., “The discovery of superconductivity” *Physics Today* **63**, 38 (2010).
- [2] Petelczyc K., Kędzierska E., *Mieczysław Wolfke. Gdyby mi dali choć pół miliona. Biografia*, Oficyna Wydawnicza PW (2018).
- [3] Wolfke M. and Keesom W.H., *Proc. Amsterdam* **31**, 81 (1927)
- [4] Keesom W.H., Wolfke M., *Leiden. Comm.* **190b**, 90 (1927).
- [5] Kapitza P., *Nature* **141**, 74 (1938).
- [6] Allen J.F. and Misener A.D., *Nature* **141**, 75 (1938).
- [7] London F., *Superfluids I*, p.4, Wiley and Sons (1950).
- [8] Bose S.N., *Z. Phys.* **26**, 178 (1924).
- [9] Einstein A., *Ber. Akad. Wiss.* 261 (1924), 3 (1925).
- [10] Balibar S., “The Discovery of Superfluidity”, *J. Low Temp. Phys.* **146**, 441 (2007).
- [11] Tisza L., *Nature* **141**, 913 (1938).
- [12] Landau L.D., *Phys. Rev.* **60**, 356 (1941).
- [13] Landau L.D., *J. Phys. USSR* **5**, 71 (1941).
- [14] Peshkov V.P., *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **18**, 951 (1948).
- [15] Landau L.D., *Phys. Rev.* **75**, 884 (1949).
- [16] Donnelly R.J., “The two-fluid theory and second sound in liquid helium”, *Physics Today* **62**, 34 (2009).
- [17] Bogoliubov N.N., *J. Phys. USSR* **11**, 23 (1947).
- [18] Zwierlein M. et al., *Nature* **435**, 1047 (2005).
- [19] Barenghi C.F., Donnelly R.J., Vinen W.F. (ed.), “Quantized Vortex Dynamics and Superfluid Turbulence”, *Lecture Notes in Physics* Vol. 571, Springer 2001.
- [20] Feynman R.P., *Progress in Low Temperature Physics*, Vol. 1, North-Holland, Amsterdam, 1955, p. 17.
- [21] Vinen W., *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A* **242**, 493 (1957); Vinen W.F., *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A* **240**, 128 (1957); Vinen W.F., *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A* **243**, 400 (1958).