

Doc. dr Łukasz A. TURSKI

Sto lat temu dwóch naukowców, z podówczas prowincjonalnego miasta monarchii austro-węgierskiej — Krakowa, dokonało odkrycia, które stało się punktem zwrotnym w rozwoju dziedziny fizyki i techniki, którą dzisiaj nazywamy kriogenicą.

9 kwietnia 1883 roku Wróblewski depešował do sekretarza Akademii Nauk w Paryżu: „Tlen skroplony zupełnie ciekły, bezbarwny, jak kwas węglowy. Za kilka dni otrzyma Pan komunikat”, a 16 kwietnia: „Azot ochłodzony, skroplony przez rozprężanie. Menisk widoczny, ciecz bezbarwna”.

Nie sposób jest przecenić rolę osiągnięcia naukowego Wróblewskiego i Olszewskiego. Czytelnik zainteresowany historią nauki powinien niewątpliwie zajrzeć do wymienionej książki Mendelssoona „The Quest for Absolute Zero” (dostępny jest przekład rosyjski) opisującej m.in. spór, nie znany większości polskich fizyków, pomiędzy Olszewskim a Dewarem. Bardzo to pouczająca i ciekawa historia.

Czytając ten specjalny „jubileuszowy” numer *Delty*, poświęcony osiągnięciu Wróblewskiego i Olszewskiego, będziesz mógł, Czytelniku, poznać kilka konkretnych faktów z dziedziny fizyki i techniki niskich temperatur. Sądzę jednak, że wypada Cię ostrzec, iż jest to dziedzina bardzo trudna. Jak powiedział odkrywca nadprzewodnictwa Kamerlingh-Onnes (Nobel 1913) zajmuje się ona „podnoszeniem kurtyny, którą ruch cieplny przy normalnych temperaturach zasłania przed nami wewnętrzny świat atomów i elektronów”. I rzeczywiście, przy bardzo niskich temperaturach decydującą rolę odgrywają rządzące tym światem prawa mechaniki kwantowej.

Od czasu prac naszych rodaków dokonał się w kriogenicie olbrzymi postęp. Co prawda tak blisko rekordowo niskich temperatur jak za czasów Wróblewskiego i Olszewskiego już nigdy potem nie byliśmy, jednakże cały czas fizyka polska zaliczała się do światowej czołówki. I tak np. w latach trzydziestych M. Wolfke (późniejszy profesor Politechniki Warszawskiej i jeden z prekursorów holografii) pracując wraz z holenderskim uczonym Keesomem wniósł duży wkład do badań nad helum II. Nieco wcześniej kilku badaczy, w tym Kamerlingh-Onnes, zauważyło, że skroplony i nadal oziębiany izotop helu ^4He w temperaturze 2,18 K nagle zmienia swoje przewodnictwo cieplne. Helowi poniżej tej temperatury nadano nazwę hel II, która pozostaje w użyciu po dzień dzisiejszy. W kilka lat później Piotr Kapica odkrył nadciekłe własności helu II (Nobel 1978).

Tak się przyjęło, że prawie każdy artykuł o fizyce niskich temperatur zaczyna się od omówienia zjawiska nadciekłości. Chyba nie jest to słuszne. Mamy bowiem dzisiaj pełną świadomość tego, jaka jest istota nadprzewodnictwa, istnieje sprawnie działająca teoria tego zjawiska, nie mamy natomiast ani teorii, ani dobrych podstaw fizycznych dla zrozumienia nadciekłości helu ^4He . O nadprzewodnictwie pisze w tym numerze Eugeniusz Trojnar, ja ograniczę się do kilku uwag na temat aktualnego stanu badań nad własnościami helu w niskich temperaturach.

Hel występuje w trzech izotopach: ^4He , ^3He i ^6He . Hel ^3He i ^6He to dwa izotopy produkowane sztucznie w wyniku przemian jądrowych. Izotop ^3He jest trwały, natomiast ^6He ma czas życia ok. 1/3 s. Pomimo wysokiej ceny wiele laboratoriów może sobie pozwolić na doświadczenia z pokaźnymi ilościami ^3He , a niektórzy nawet myślą o podobnych doświadczeniach z ^6He .

To, co różni izotopy ^3He i ^4He , to ich spin. ^3He jest fermionem, ma spin taki jak elektron i podobnie jak elektron podlega zakazowi Pauliego — prawu zabraniającemu dwu identycznym fermionom przebywania w takim samym „stanie kwantowym”. Hel ^4He jest bozonem, tzn. jego spin ma wartość równą całkowitej wielokrotności $h/2\pi$ (h — stała Plancka). Bozony nie podlegają zakazowi Pauliego, a przeciwnie, nieoddziałujące bozony mają naturę tak towarzyską, że w dostatecznie niskiej temperaturze wszystkie zaczynają „pchać się” do jednego stanu kwantowego. W efekcie makroskopowa ich ilość (tj. ilość porównywalna z ilością wszystkich cząstek w układzie) znajduje się w jednym stanie. Zjawisko to nosi nazwę kondensacji Bosego-Einsteina.

W wielu popularnych podręcznikach fizyki niskich temperatur właśnie kondensacji Bosego-Einsteina przypisuje się podstawową rolę w zjawisku nadciekłości. Niestety, są pewne teoretyczne i doświadczalne powody, by mniemać, że w układzie takim jak hel ^4He , gdzie oddziaływania są dostatecznie silne, aby był on w fazie ciekłej, kondensacja Bosego-Einsteina jest mało istotna.

W tym, poświęconym kriogenicie, numerze warto wspomnieć o najstarszej metodzie uzyskiwania niskich temperatur. Do naczynia ze śniegiem lub tłuczonym lodem dodaje się, mieszając, sól kuchenną. Temperatura mieszaniny, przy dobrych proporcjach śniegu i soli, może spaść nawet do 251 K. Podobny efekt obserwuje się także dla wielu innych związków, np. KCl, NaNO_3 , CaCl_2 itp. Podobno najlepsze rezultaty (218 K) można uzyskać dodając do każdego 100 gramów lodu 42 gramy CaCl_2 .

Może Tobie, Czytelniku, uda się pobić ten rekord?

Szansa bowiem na to, żeby kondensacja była efektem dominującym, rośnie z maleniem oddziaływań międzycząsteczkowych. Kondensacja mogłaby mieć miejsce np. w bardzo „zimnym” gazie, gdzie oddziaływania międzycząsteczkowe są niewielkie. W dalszej części artykułu powrócimy jeszcze do tego problemu.

Mimo istotnych kłopotów fizycy nie są jednak zupełnie bezradni w „aferze” helowej. Od czasów pionierskich prac Lwa Landaua mamy całkiem sprawnie działającą fenomenologiczną teorię nadciekłości, a poza tym potrafimy wytłumaczyć zastanawiający fakt, że hel (wszystkie izotopy) pod normalnym ciśnieniem pozostaje ciekły aż do temperatury absolutnego zera. Ta własność helu jest efektem czysto kwantowym. Związana jest ona z falową naturą materii. Nawet w temperaturze absolutnego zera długość fali De Broglie’a atomu helu jest porównywalna z zasięgiem sił przyciągających dwa atomy helu do siebie. Dlatego też nieokreśloność położenia atomów wyklucza powstanie kryształu, w którym atomy musiałyby być zlokalizowane w węzłach sieci krystalicznej. Stały hel można uzyskać dopiero po przyłożeniu zewnętrznego ciśnienia rzędu kilkudziesięciu atmosfer.

Okazuje się, że taki zestalony hel to jedna z najbardziej zadziwiających substancji krystalicznych. Na przykład kryształ ^3He jest w pewnym sensie mniej uporządkowany niż ^3He w stanie ciekłym. Związane jest to z faktem, że atomy ^3He mają moment magnetyczny. Stały ^3He ma momenty magnetyczne mniej uporządkowane niż ciekły i w efekcie jego sumaryczna entropia, która jest miarą chaosu w układzie, jest większa niż entropia cieczy w tej samej temperaturze. Ta przedziwna własność ^3He jest wykorzystywana do osiągania bardzo niskich temperatur za pomocą adiabatycznego (przy stałej entropii) ściskania (!) helu ^3He . Ideę urządzenia opartego na tym zjawisku zawdzięczamy uczniowi Landaua, Pomeranczukowi. Właśnie za pomocą takiej komórki Pomeranczuka w 1973 r. (w laboratoriach firmy Bell) po raz pierwszy uzyskano nadciekły hel ^3He .

Pomimo że ^3He w fazie nadciekłej znany jest dopiero od 10 lat, to jednak wiemy o nim znacznie więcej niż o ^4He . Dla ^3He działa bowiem, z pewnymi zmianami i ulepszeniami, teoria taka jak dla nadprzewodnictwa. Dzięki temu i dzięki wybitnym osiągnięciom doświadczalnym I. Whetheya, O. Lounaasmy i innych fizyka ^3He przekształciła się w osobną wyspecjalizowaną dyscyplinę.

Niezwykle ciekawe jest to, że jest wiele nadciekłych faz ^3He . Jedną z tych faz, tzw. faza A, jest cieczą nadciekłą o silnie anizotropowych (tj. zależnych od kierunku) własnościach. Znanym przykładem „normalnej” cieczy anizotropowej są ciekłe kryształy. Ponieważ z ciekłymi kryształami można wyprawiać istne „cuda” (patrz np. *Delta* 6/1982), to łatwo sobie wyobrazić co można zrobić, gdy taka ciecz jest dodatkowo nadciekłą.

Jak wspomnieliśmy wyżej, opis teoretyczny nadciekłego ^3He stosuje się również do nadciekłej cieczy elektronów w nadprzewodniku. Dlatego też zainteresowano się, czy przypadkiem w jakimś metalu nie da się zauważyć także anizotropowego nadciekłego płynu elektronów. Wydaje się, że „ślady” takiego anizotropowego nadprzewodnictwa zarejestrowano w niektórych metalach ziem rzadkich.

Ostatnio fizycy niskich temperatur zaczęli poważnie myśleć i pracować nad uzyskaniem nadciekłego (może powinienem napisać nadlotnego) gazu. Jeszcze w latach pięćdziesiątych Charles Hecht zauważył, że atomowy wodór, podobnie jak i jego cięższe izotopy, pozostanie w stanie gazowym aż do temperatury zera absolutnego. Wniosek ten był wynikiem identycznego rozumowania jak to, które przeprowadziliśmy dla helu. No i wszystko byłoby dobrze, gdyby nie to, że wodór atomowy nie występuje w stanie wolnym. W normalnej ziemskiej sytuacji atomy wodoru zawsze łączą się w molekuły H_2 . Reakcja tworzenia się takiej molekuley to najbardziej energochłonna reakcja chemiczna (energia wiązania molekuley H_2 wynosi ok. 432 tys. J/mol). Trzeba więc uważać, by nie wyprodukować za dużo wodoru atomowego, bo gdyby zrekombinował, trzeba byłoby budować laboratorium od nowa.

Występujący w przyrodzie wodór molekularny nie jest ciekawy z punktu widzenia fizyki niskich temperatur, bowiem skrapla się w „wysokiej temperaturze” kilkudziesięciu kelwinów, a potem krystalizuje. Jak więc wyprodukować wodór atomowy? Otóż w cząsteczce H_2 spiny elektronów ustawione są antyrównolegle. Aby zapobiec rekombinacji, trzeba ustawić spiny elektronów w tym samym kierunku. Taka sztuczka może się udać, jeżeli atomy wodoru umieścimy w bardzo silnym zewnętrznym polu magnetycznym. Wtedy spiny nie będą mogły się odwrócić i ustawić względem siebie antyrównolegle, co jest konieczne dla utworzenia molekuley. Utworzenie takiego spolaryzowanego wodoru to jeszcze nie koniec. Okazuje się, że trzeba coś zrobić ze ściankami naczynia, w którym ten gaz się znajduje. Pole magnetyczne skutecznie zapobiega niszczeniu uporządkowania spinów podczas nieuniknionych zderzeń pomiędzy atomami wodoru, nie zapobiega jednak niszczeniu uporządkowania podczas zderzeń atomów wodoru ze ściankami naczynia. Holenderski fizyk Isaak Silvera otrzymał kilka miesięcy temu nagrodę firmy Hewlett-Packard przyznaną przez Europejskie Towarzystwo Fizyczne właśnie za



Rekordowo niską temperaturę uzyskano w styczniu bieżącego roku w Instytucie Fizyki Ciała Stałego Uniwersytetu Tokijskiego metodą rozmagnesowania jądrowego. W kriostacie wypełnionym 200 litrami helu udało się obniżyć temperaturę do 30 μK . Artykuł o metodzie rozmagnesowania jądrowego, która jest współczesnym odpowiednikiem metody rozprężania adiabatycznego stosowanej w eksperymentach Wróblewskiego i Olszewskiego, zamieścimy w jednym z następnych numerów *Delt*.



badania nad długoczasowym utrzymywaniem atomowego, spolaryzowanego wodoru. Udaje się to zrobić — i w ten sposób wracamy do początku tego artykułu — pokrywając ścianki naczyń nadciętym ^4He . Jednak dopiero za jakiś czas będzie można udzielić odpowiedzi na pytanie, czy w spolaryzowanym atomowym wodorze, po jeszcze większym ochłodzeniu (osiągane obecnie temperatury są rzędu dwustu kilkudziesięciu milikelwinów, przy polach magnetycznych rzędu 7 tesli), zachodzi zjawisko kondensacji Bosego-Einsteina. Ponieważ oddziaływania pomiędzy atomami wodoru są bardzo słabe, sytuacja jest tu bardziej korzystna niż w helu ^4He . Taki skondensowany nadcięty gaz przejawiałby wiele nowych efektów, między innymi dlatego, że ma moment magnetyczny. Jestem przekonany, że badania nad spolaryzowanym wodorem umożliwią nie tylko głębsze zrozumienie roli kondensacji Bosego-Einsteina w zjawiskach nadciętości, ale i dalszy rozwój fizyki niskich temperatur.

Fizyka niskich temperatur, ta stworzona i rozwijana na potrzeby laboratoryjne, zaczęła w ciągu ostatnich kilkunastu lat odgrywać też znaczną rolę w astrofizyce. Punktem zwrotnym w tej „astrofizycznej fizyce niskich temperatur” było odkrycie pulsarów. Wkrótce po tym odkryciu wysunięto hipotezę, że pulsary są gwiazdami neutronowymi i że materia neutronowa w ich wnętrzu jest w stanie nadciętym. Neutrony to fermiony, można więc do płynu neutronowego w pulsarach stosować tę samą teorię co do płynu elektronowego w metalach. Okazuje się, że w ten sposób można wytłumaczyć wiele obserwacji, między innymi zjawisko tzw. trzęsień gwiazd neutronowych. Od kilku lat w laboratoriach pracuje się nad zbudowaniem w warunkach ziemskich modelu pulsara. Wykorzystuje się przy tym własności nadprzewodników i nadciętego helu ^4He . W jednym z takich eksperymentów biorą udział młodzi fizycy z Polski. O przebiegu prac możecie się dowiedzieć Czytelniku z artykułu Marty Ciepłak w tym numerze *Delta*. Czytając ten artykuł warto pamiętać, że u początków rozwoju fizyki niskich temperatur leżało doświadczenie przeprowadzone sto lat temu w Krakowie.

Jak to obliczyć — Konkurs

Uwagę Johna Smitha zwrócił neon reklamowy supermarketu. Miał dziwną treść. Ni mniej ni więcej, tylko 7.11. Zaintrygowany wszedł do obszernego hallu.

— O co chodzi? — zapytał, w gruncie rzeczy bez sensu, witającego go sprzedawcę.

— To proste. Od 7 rano do 11 wieczór. Tak handlujemy — usłyszał w odpowiedzi.

Istotnie, było to proste. Wiedział, co chciał wiedzieć i właściwie mógł już wyjść. Ale, skoro się już weszło do sklepu ... Wybrał z obfitego zaopatrzonej półki cztery produkty i niemal natychmiast usłyszał głos kasjera.

— Płaci pan 7.11.

— Co? Za to? — zapytał.

— 7 dolarów i 11 centów za zakupione towary — odpowiedź była precyzyjna.

— Bo takie są godziny otwarcia sklepu, co? — zdumiał się John.

— Nie. Po prostu odnotowałem ceny poszczególnych towarów, pomnożyłem i wyszło 7.11 — wyjaśnił kasjer.

— Panie, toż to trzeba dodać, a nie pomnożyć!

— Istotnie, przepraszam — palce kasjera znów zastukały w klawisze podręcznego komputerka — płaci pan 7.11.

— To są kpiny! — oburzył się John.

— Ale skąd, proszę sprawdzić.

Po sprawdzeniu okazało się, że kasjer, a właściwie jego komputer, oba razy nie popełnił błędu.

Jakie ceny miały produkty zakupione przez Johna Smitha? To właśnie jest pytanie naszego konkursu

jak to obliczyć

Oczekujemy odpowiedzi. Najbardziej elegancką (zdaniem redakcji) wydrukujemy, a czterem spośród autorów prawidłowych rozwiązań prześlemy nagrody książkowe.

Odpowiedzi prosimy przysyłać pod adresem redakcji do 15 lutego 1984 roku.



Rozwiązanie zadania M 350. Z równości $a^2 - b^2 = (a+b)(a-b)$ mamy

$$\begin{aligned} 2^{2^n} - 1 &= (2^{2^{n-1}} + 1)(2^{2^{n-1}} - 1) = \\ &= (2^{2^{n-1}} + 1)(2^{2^{n-2}} + 1)(2^{2^{n-2}} - 1) = \\ &= (2^{2^{n-1}} + 1)(2^{2^{n-2}} + 1) \dots (2^2 + 1) \times \\ &\quad \times (2^1 + 1)(2^1 - 1). \end{aligned}$$

Wynika stąd, że jeżeli $k < n$, to $2^{2^k} + 1$ dzieli

$$2^{2^n} - 1 = (2^{2^n} + 1) - 2 \text{ i NWD } ((2^{2^n} + 1), (2^{2^k} + 1)) \text{ dzieli } 2.$$

Liczby $2^{2^k} + 1$ i $2^{2^n} + 1$ są jednak nieparzyste i wobec tego ich wspólnym dzielnikiem może być tylko 1, co kończy dowód.