

Spektakularne zjawiska kwantowe, które od dłuższego czasu uporczywie próbujemy zrozumieć, są na każdym kroku zaskakujące. Gdy wydaje nam się, że już je dość dobrze rozumiemy, natychmiast pojawia się nowe zjawisko, którego poznanie należy znów rozpocząć od samego początku. Czasami jest tak, że najpierw teoretycznie dane zjawisko zostało przewidziane, a następnie potwierdzone doświadczalnie, a czasami odwrotnie: najpierw jakieś zjawisko odkrywano, a dopiero później, na gruncie mecha-



Tomasz Sowiński jest fizykiem na Wydziale Biologii i Nauk o Środowisku UKSW i w Instytucie Fizyki PAN. W 2005 roku skończył studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie

fizyki teoretycznej, a trzy lata później uzyskał tam stopień naukowy doktora. Od lat zajmuje się popularyzacją nauk przyrodniczych. W roku 2008 otrzymał tytuł Mistrza Popularyzacji Nauki „Złoty Umysł” w konkursie Prezesa Polskiej Akademii Nauk.

Tomasz Sowiński

Niezwykłe przewodnictwo (cz. 1)

niki kwantowej, udawało się je wytłumaczyć. Właśnie taki przypadek zdarzył się na początku poprzedniego wieku za sprawą, wtedy już niemłodego, holenderskiego fizyka Heike Kamerlingha Onnesa, który w roku 1913 za swoje badania otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki.

SPECJALISTA OD NISKICH TEMPERATUR

Krótkie przybliżenie postaci Onnesa należy chyba rozpocząć od informacji, że był on uczniem kiedyś nam poznanych (MT 05/2007) Bunsena i Kirchhoffa.



Onnes w 1882 roku zajął się badaniami nad własnościami ciał schłodzonych do bardzo niskich temperatur

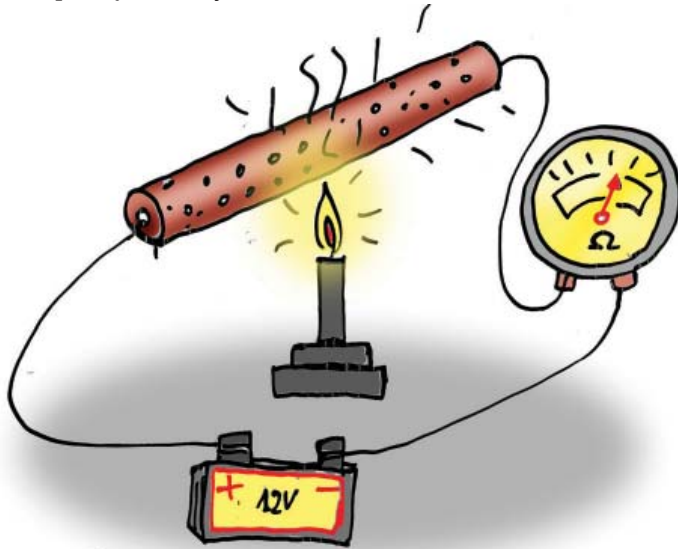
Byli oni już wtedy rozpoznawani w naukowym świecie ze względu na swoje odkrycia w dziedzinie spektroskopii i niewątpliwie miało to duży wpływ na przyszłość Onnesa. Świadczy o tym choćby fakt, że w roku 1879 Onnes otrzymał stopień naukowy doktora na podstawie rozprawy o dowodach na ruch obrotowy Ziemi, a już w roku 1882 otrzymał posadę profesora fizyki doświadczalnej na uniwersytecie w Lejdzie. Tam całkowicie zmienił kierunek swoich naukowych zainteresowań i zajął się badaniami nad własnościami ciał schłodzonych do bardzo niskich temperatur. Były to badania nowatorskie, które wymagały przede wszystkim opracowania zupełnie wcześniej nieznanymi technik schładzania ciał. Sam sposób pomiaru niskiej temperatury wymagał dużej innowacyjności. Warto sobie bowiem zdawać sprawę, że jeśli pierwszy raz w historii ludzkości osiągniemy jakąś niską temperaturę, to nie mamy nawet dobrego termometru, który mógłby ją dokładnie określić. W pewnym sensie dopiero osiągnięcie takiej temperatury pozwala na skonstruowanie termometru, który daje możliwość jej zmierzenia.

W roku 1904 Onnes założył na swoim uniwersytecie bardzo nowoczesne i chyba największe w tamtych czasach laboratorium kriogeniczne, które w zamierzeniu miało doprowadzić do osiągnięcia naprawdę ekstremalnie niskich temperatur. I rzeczywiście tak się stało. Już w roku 1908 w laboratorium Onnesa nastąpił wielki przełom w schładzaniu substancji – uzyskanie temperatury 4 stopni w skali Kelvina i zmiana stanu skupienia helu z gazowej na ciekłą! Poprzednie takie wydarzenie miało miejsce na Uniwersytecie Jagiellońskim w roku 1883, kiedy to Zygmunt Wróblewski i Karol Olszewski dokonali skroplenia tlenu i azotu (temperatury odpowiednio: 90 i 77 stopni w skali Kelvina). Skroplenie helu przyniosło Onnesowi wielką sławę w świecie fizyki ekspery-

talnej i wszyscy zaczęli śledzić jego dalsze poczynania. Jednak największe odkrycie przyszło parę lat później.

ZWIĄZEK TEMPERATURY Z OPOREM ELEKTRYCZNYM

Znanym powszechnie już w tamtych czasach faktem była informacja, że opór elektryczny wszystkich krystalicznych przewodników rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Najprostsze wyjaśnienie takiego zjawiska wydaje się bardzo intuicyjne i rozsądne. Oto ze wzrostem temperatury rosną termiczne drgania sieci krystalicznej przewodnika, a tym samym elektrony, które uczestniczą w przepływie prądu elektrycznego, są mocniej przez tę sieć rozprasane. To oznacza, że znacznie trudniejsze jest utrzymanie uporządkowanego ruchu elektronów w temperaturach wyższych niż w temperaturach niższych. Uporządkowany ruch elektronów to natomiast nic



Opór elektryczny wszystkich krystalicznych przewodników rośnie wraz ze wzrostem temperatury

innego jak właśnie przepływ prądu, którego natężenie mierzymy w amperach. Aby podtrzymać ten uporządkowany ruch elektronów, który jest nieustannie zaburzany przez drgającą chaotycznie sieć krystaliczną, musimy do końców przewodnika przyłożyć napięcie elektryczne. Napięcie to musi być tym większe, im większe natężenie prądu elektrycznego chcemy uzyskać. Wielkością, która charakteryzuje dokładnie ten związek, jest opór elektryczny – wielkość pokazująca, jak bardzo sieć krystaliczna rozprasza przemieszczające się elektrony. Im drgania sieci krystalicznej są większe, tym mniejsze jest natężenie prądu, które uzyskamy po przyłożeniu danego napięcia. Zatem tym większy jest opór elektryczny przewodnika. Skoro natomiast rozpraszające drgania są tym większe, im większa jest temperatura, to stąd naturalny wniosek, że wraz z jej wzrostem musi rosnąć i opór elektryczny.

Rozumowanie przedstawione powyżej jest oczywiście przeprowadzone na podstawie obserwacji zjawisk, jakie następują w temperaturach dość bliskich temperaturze pokojowej. Nie było do końca jasne, czy prawo wzrostu oporu elektrycznego wraz z temperaturą jest również słuszne w bardzo niskich temperaturach. Były różne co do tego przekonania

i różne hipotezy. Można sobie przecież dość łatwo wyobrazić, że w bardzo niskich temperaturach ujawniają się jakieś zjawiska, które powodują, że opór elektryczny zaczyna rosnąć, choć temperaturę nadal obniżamy. Jeśli zjawiska te w wyższych temperaturach są zdominowane przez rosnące drgania sieci krystalicznej, to przestają mieć znaczenie. Ale przy temperaturach niskich, kiedy drgania sieci są bardzo małe, mogą być najważniejsze i całkowicie determinować przewodnictwo elektryczne. Ze względu na brak danych doświadczalnych nie było wiadomo, kto w tym teoretycznym sporze ma rację.

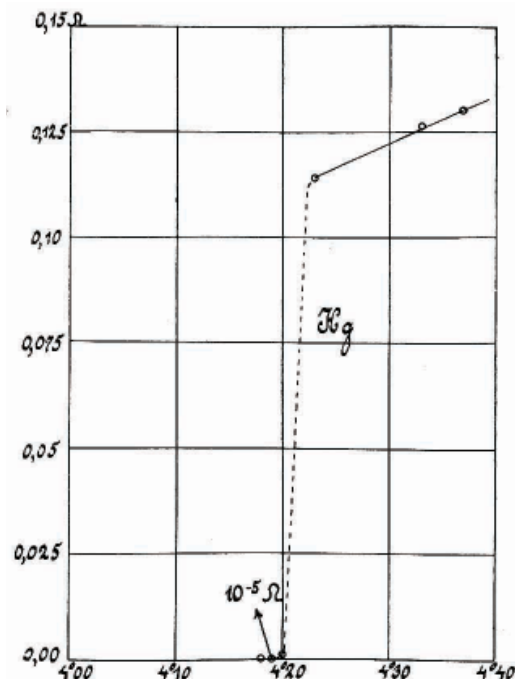
ODKRYCIE NADPRZEWODNICTWA

To właśnie dlatego zbadaniem tego zjawiska (zależności oporu elektrycznego od temperatury) w niskich temperaturach postanowił zająć się Onnes w swoim supernowoczesnym laboratorium kriogenicznym. Jednym z pierwszych materiałów zbadanych przez Onnesa musiała być oczywiście rtęć (Hg) – jedyny metal, który w warunkach naturalnych jest ciekły (jak dziś już wiemy, jest to zresztą skutek bardzo spektakularnego połączenia zjawisk mechaniki kwantowej i teorii względności). Temperatura topnienia rtęci to dopiero -39°C , czyli ok. 234 K.



Temperatura topnienia rtęci to dopiero -39°C czyli ok. 234 K

Wyniki, które uzyskał nasz dzisiejszy bohater, były tak niewiarygodne i spektakularne, że obiegły cały naukowy świat, a wykres doświadczalnej zależności oporu badanej próbki rtęci od temperatury przeszedł do historii. Wyglądał on tak:



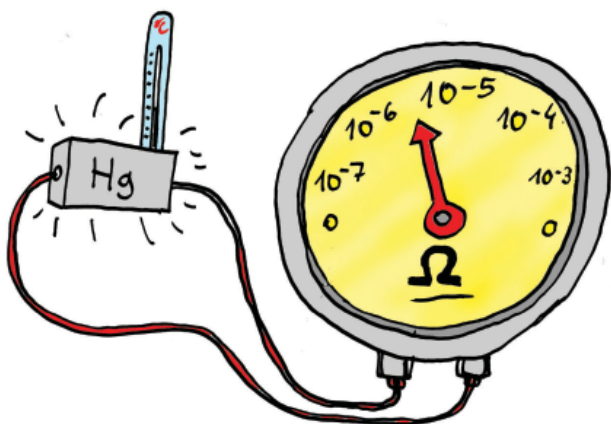


Z wykresu tego jasno widać, że gdy schładzamy rtęć, to jej opór elektryczny, tak jak można się spodziewać, maleje. Ale w momencie uzyskania temperatury ok. 4 K (dokładnie 4,2 K) jej opór spada tak bardzo, że żadne dostępne Onnesowi urządzenie nie było w stanie go zmierzyć. Na tej podstawie Onnes stwierdził, że dla jego próbki jest to na pewno mniej niż $10^{-5} \Omega$, bo taką czułość miały jego omomierze. Przypomnijmy, że powyżej tej magicznej temperatury opór był w tym przypadku rzędu 0,1 Ω . Choć sam Onnes oczywiście nie mógł tego wiedzieć,

Wyniki, które uzyskał nasz dzisiejszy bohater były niewiarygodne i spektakularne

to dalsze badania pokazały, że ilekroć zwiększano czułość urządzeń pomiarowych, tylekroć przekonywano się, że mierzony opór i tak jest niższy. Ostatecznie uznano, że rzeczywisty opór próbki to najprawdziwsze ZERO, a zjawisko nazwano NADPRZEWODNICTWEM. Temperaturę, po przekroczeniu której zwykły metal staje się nadprzewodnikiem, nazywamy temperaturą krytyczną.

Już na pierwszy rzut oka sytuacja wydaje się bardzo nietypowa. Jeśli już, to należałoby spodziewać się niespodzianki całkowicie odwrotnej. Tak jak już mówiłem, po znacznym wyciszeniu drgań sieci krystalicznej mogłoby raczej dojść do głosu inne zjawisko, które zwiększałoby opór wraz ze spadkiem temperatury. Wyniki Onnesa jakby przekonują, że nie tylko żadne dodatkowe mechanizmy nie dochodzą do głosu, ale nawet dotychczasowy mechanizm rozpraszania elektronów przestaje mieć znaczenie. Wygląda to tak, jakby poniżej pewnej temperatury drgania sieci krystalicznej, które niewątpliwie nadal istnieją, przestawały rozpraszać uporządkowany ruch elektronów. Elektrony jakby przestawały zupełnie czuć, że drga sieć przewodnika!



Prąd płynie w przewodniku bez przyłożonego napięcia

Warto może w tym miejscu dodać, że przekroczenie temperatury krytycznej zupełnie nie zmienia innych własności fizykochemicznych metalu. Ma on praktycznie tę samą gęstość, tę samą strukturę krystaliczną. Jedyne, co się zmienia, to fakt, że całkowicie traci on opór elektryczny. To od razu sugeruje, że przejście do fazy nadprzewodnictwa jest raczej związane z własnością samych elektronów niż z budową mikroskopową metalu jako całości.

Zjawisko nadprzewodnictwa było dla ówczesnych fizyków zupełnie niewyjaśnialne. Wybiegając w przyszłość, powiem zresztą, że i dziś nie do końca rozumiemy wszystkie jego aspekty. Ale wtedy, na początku XX wieku, to był naprawdę wielki szok, że może istnieć sytuacja, że prąd płynie w przewodniku bez przyłożonego napięcia. Brzmiało to tak niesamowicie, że aż trąciło herezją naukową. To trochę tak, jakby powiedzieć, że istnieje perpetuum mobile.

EFEKT MEISSNERA

Ciało znajdujące się w stanie nadprzewodzącym, oprócz tego, że ma zerowy opór elektryczny, ma zdumiewające i inne własności, z których najciekawsze to własności magnetyczne. Jedną z nich jest tzw. efekt Meissnera, który polega na wypychaniu pola magnetycznego z wnętrza nadprzewodnika. Został on po raz pierwszy zauważony i dogłębnie przeanalizowany doświadczalnie przez Meissnera i Ochsendfelda w 1933 roku.

Wyobraźmy sobie, że mamy zwykły metal, który znajduje się w zewnętrznym stałym polu magnetycznym. Pole to wnika do próbki i powoduje, że materiał się w jakiś sposób polaryzuje. Niezależnie, co się dokładnie dzieje, to jedno jest pewne: we wnętrzu znajduje się jakieś pole magnetyczne. Jeśli jednak ochłodzimy ten metal do temperatury niższej niż temperatura krytyczna, okaże się, że pole magnetyczne jest całkowicie z niego wypchane. We wnętrzu nadprzewodnika powstają samoistnie takie prądy elektryczne, aby wytworzone przez nie pole magnetyczne dokładnie kasowało zewnętrzne pole magnetyczne.

Efekt Meissnera jest najczęściej demonstrowany w doświadczeniu lewitującego magnesu. Jeśli położymy magnes na nadprzewodnik w temperaturze wyższej od temperatury krytycznej, to zostanie on do niego przyciągnięty, bo każdy metalowy przedmiot jest przyciągany przez magnes. Jeśli następnie nadprzewodnik schłodzimy do temperatury niższej niż temperatura krytyczna, to na skutek efektu Meissnera zostaną w nim wyindukowane takie prądy, aby wypchnąć pole magnetyczne od magnesu. To sprawi, że magnes uniesie się i będzie zwisał na takiej wyso-

kości, na której działająca na niego siła grawitacji będzie się równoważyła z siłą oddziaływania pomiędzy magnesem a prądami wyindukowanymi w nadprzewodniku. Film ilustrujący takie doświadczenie można znaleźć w wielu miejscach, np. na YouTube (<http://www.youtube.com/watch?v=4VGACLNfZ8s>).

To naprawdę wygląda jak czary.

Zaraz po odkryciu efektu Meissnera oczywiście zaczęto się zastanawiać nad możliwościami jego praktycznego zastosowania. Jeden z takich sposobów można zobaczyć na innym bardzo ciekawym filmie przedstawiającym lewitującą kolejkę (<http://www.youtube.com/watch?v=GHTAwQXVsuk&feature=related>).

WIECZNY PRĄD

Warto sobie na zakończenie zadać pytanie, co to tak naprawdę znaczy, że opór elektryczny nadprzewodnika jest równy zero. Ponieważ nie jest to zbyt intuicyjne stwierdzenie, nawet najlepsi fizycy starali się znaleźć odpowiedź na to pytanie. Chyba najlepszą z nich dali J. File i R.G. Mills w roku 1963. Wykonali oni dość proste koncepcyjnie doświadczenie z nadprzewodnikiem w kształcie pierścienia. W temperaturze większej niż temperatura krytyczna umieścili owy pierścień w zewnętrznym polu magnetycznym, którego kierunek był równoległy do osi symetrii pierścienia. Pole to oczywiście wnikało do wnętrza materiału. Następnie schłodzili pierścień do fazy nadprzewodzącej, sprawiając, że ze względu na efekt Meissnera pole magnetyczne zostało z jego wnętrza wypchnięte przez prąd elektryczny, który został wyindukowany w nadprzewodniku. Ze względu na symetrię problemu prąd wyindukowany został w taki sposób, że zaczął krążyć wzdłuż pierścienia dookoła jego osi symetrii. Prąd ten wytwarzał pole magnetyczne w taki sposób, aby pole magnetyczne we wnętrzu było równe zero. Po wyłączeniu zewnętrznego pola magnetycznego prąd płynący w nadprzewodniku oczywiście pozostał, a File i Mills chcieli sprawdzić, jak długo taki stan będzie się utrzymywał.

W warunkach normalnych, na skutek istnienia oporu elektrycznego, prąd taki natychmiast przestałby płynąć, a zgromadzona w nim energia zamieniłaby się na ciepło i ogrzała materiał. W sytuacji jednak, gdy opór elektryczny materiału (przynajmniej teoretycznie) jest równy zero, prąd taki powinien płynąć wiecznie. Jest to zatem doskonały test na sprawdzenie, czy przypadkiem opór elektryczny nadprzewodnika nie jest, choć bardzo mały, to jednak niezerowy.

Po siedemdziesięciu dniach utrzymywania materiału w fazie nadprzewodzącej File i Mills przerwali doświadczenie, nie obserwując żadnej zmiany w natężeniu płynącego w nadprzewodniku prądu. Na podstawie dokładności przyrządów, którymi dysponowali, oszacowali czas, po jakim najwcześniej prąd w nadprzewodniku zaniknie. Zrobili to po prostu przy założeniu, że zanikałby on wolniej, niż wynosi dokładność ich przyrządów, które żadnego zaniku przez te 70 dni nie zaobserwowały. Choć może wydawać się to zdumiewające, doświadczenie Fila i Millsa przekonuje ponad wszelką wątpliwość, że jeśli tylko prąd w nadprzewodniku zaniknie, to stanie się to nie wcześniej niż za 100 000 lat! Chyba nie ma lepszego uzasadnienia, że opór elektryczny nadprze-

wodzącego materiału do tak dokładnie zmierzone doświadczenie ZERO jak tylko się da!

KRYTYCZNE POLE MAGNETYCZNE

Na zakończenie warto jeszcze podkreślić jedną własność fazy nadprzewodzącej metali. Jak już wiemy, pojawia się ona po przekroczeniu pewnej specyficznej dla danego materiału temperatury, nazywanej temperaturą krytyczną. Poniżej tej temperatury materiał jest nadprzewodnikiem. Jest tak również wtedy, gdy umieścimy go w jakimś nie za dużym polu magnetycznym. Dla każdej temperatury poniżej temperatury krytycznej istnieje jednak takie natężenie pola magnetycznego (zwanego natężeniem krytycznym), które niszczy fazę nadprzewodzącą, zamieniając materiał znów w zwykły przewodnik. Nawet jeśli materiał jest poniżej temperatury krytycznej. Można powiedzieć, że pole magnetyczne jest na tyle silne, że nadprzewodnik nie może go wypchnąć ze swojego wnętrza. Pole wnika do środka i niszczy efekt nadprzewodzenia.



Teoretycy dostali zagadkę dlaczego nadprzewodnik wypycha pole magnetyczne ze swojego wnętrza oraz dlaczego silne pole niszczy fazę nadprzewodzącą

Niszczanie fazy nadprzewodzącej przez silne pole magnetyczne jest całkowicie odwracalne. Jeśli tylko wyłączymy pole lub nawet jeśli tylko zejdziemy z jego natężeniem poniżej natężenia krytycznego, to materiał natychmiast stanie się z powrotem nadprzewodnikiem. Takie zachowania nadprzewodnika było dodatkową zagadką, którą należało rozwikłać.

WYZWANIE DLA TEORETYKÓW

Odkrycie nadprzewodnictwa postawiło przed fizykami (tym razem teoretykami) bardzo trudny orzech do zgryzienia. Należało przede wszystkim zrozumieć, czym na poziomie mikroskopowym jest nadprzewodnictwo i dlaczego opór elektryczny spada tak drastycznie do zera. No i dlaczego nadprzewodnik wypycha pole magnetyczne ze swojego wnętrza oraz dlaczego silne pole niszczy fazę nadprzewodzącą. Teoretycy dostali zagadkę, której rozwiązanie było bardzo trudne, a niektóre jej elementy nie są jeszcze do dziś zupełnie rozwiązane. Ale o tym już następnym razem... •