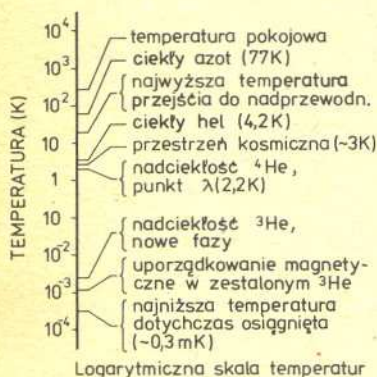


Doc. dr Lucjan ŚNIADOWER



Świat prawdziwie niskich temperatur rozpoczyna się dla fizyka gdzieś około 1 kelwina. Nie zawsze zdajemy sobie sprawę, iż obniżenie temperatury od 4,2 K (temperatura wrzenia ciekłego helu) do 10 mK to pod względem trudności prawie to samo, co na przykład ochłodzenie ciała o temperaturze 1000 K do temperatury 4,2 K. Ilustruje to diagram temperatury wykresiony w skali logarytmicznej. W ostatnich kilkunastu latach opanowano doświadczalnie obszar temperatur od 1 K do 0,3 mK, znacznie rozleglejszy w tej skali od obszaru zawartego między temperaturą pokojową a temperaturami helowymi, stanowiącego przez wiele ubiegłych lat domenę fizyki niskich temperatur.

Praca w niskich temperaturach, już poniżej ok. 3 K, stanowi dla fizyka olbrzymią atrakcję; jest on w stanie zrealizować w swoim laboratorium, w sposób sztuczny, warunki, których nie ma nigdzie na zewnątrz. Temperatura przestrzeni kosmicznej wynosi właśnie ok. 3 K i nie są nam znane naturalne obiekty o temperaturze niższej. Mamy tu zupełnie inną sytuację niż na przykład w fizyce wysokich energii, gdzie w warunkach ziemskich, przy pomocy największych nawet akceleratorów, jesteśmy w stanie osiągnąć energię stanowiącą jedynie cząstkę energii promieniowania kosmicznego.

Najogólniej mówiąc, fizyka niskich temperatur jest fizyką stanów uporządkowanych; im subtelniejsza jest natura tego uporządkowania, tym niższej potrzebujemy temperatury, aby ją zaobserwować i zbadać. Nadprzewodnictwo, nadciekłość, uporządkowanie magnetyczne i jądrowe — to kolejne szczeble osiągane przez fizykę niskich temperatur. Zjawiska te, czule na temperaturę, odgrywają zasadniczą rolę w jej pomiarze.

Pomiar niskich temperatur jest często równie skomplikowanym zadaniem jak ich otrzymywanie i przekazywanie. Termometry rtęciowe zamarzają już przy silnych mrozach i wcale niełatwo zbudować termometr działający w temperaturze np. 1 mK.

Do temperatury ok. 50 mK można z powodzeniem stosować półprzewodnikowe termometry oporowe, wykorzystując fakt silnej zależności oporu elektrycznego półprzewodników (domieszkowany german) od temperatury. Poniżej tej temperatury opór kryształu bardzo wzrasta, jest on już właściwie izolatorem i termometria jest już niemożliwa. Dodatkową trudnością jest pojawianie się oporu cieplnego na granicy dwóch ośrodków (tzw. opór Kapicy), maskującego prawdziwą temperaturę badanej próbki.

Z kilku zjawisk fizycznych, zależnych od temperatury w zakresie milikelwinów, prawo obywatelstwa w termometrii mili- i mikrokelwinów zyskały sobie w ostatnich latach dwa: orientacja jąder atomowych (NO — nuclear orientation) oraz magnetyczny rezonans jądrowy (NMR — nuclear magnetic resonance). Inne, możliwe do wykorzystania zjawiska, takie jak efekt Mössbauera, ciśnienie osmotyczne w kapilarach łączących ciekły ^3He i ciekłą mieszaninę $^3\text{He} + ^4\text{He}$, zestalanie ^3He , szum cieplny, paramagnetyzm soli CMN (azotan cerowo-magnezowy) czy też statyczna jądrowa podatność magnetyczna nie wytrzymują konkurencji z wymienionymi uprzednio najnowocześniejszymi metodami. Metoda orientacji jąder pozwala na pomiar temperatur w zakresie $100 \div 2$ mK, magnetyczny rezonans jądrowy służy do pomiaru najniższych uzyskiwanych obecnie temperatur sięgających ok. 0,3 mK.

Termometria NO

W rozpadzie promieniotwórczym jąder atomowych emitowane są cząstki α lub β oraz fotony γ . W pewnych warunkach kierunek tej emisji nie jest przypadkowy i zależy właśnie od temperatury. Dokładniej, rozkład kierunkowy tego promieniowania zależy od względnego obsadzenia tzw. nadsubtelnych podpoziomów jądrowych. W „wysokich” temperaturach (powyżej 100 mK) wszystkie poziomy są mniej więcej tak samo obsadzone i rozkład kierunkowy emitowanego promieniowania jest średnią rozkładów na każdym z poziomów i wobec tego nie zależy od temperatury. Z kolei poniżej 2 mK kierunek promieniowania zależy tylko od własności jąder atomowych i także nie jest czuły na temperaturę. Między tymi granicami, w przedziale $100 \div 2$ mK, dla określonych jąder atomów o znanych schematach rozpadu promieniotwórczego, pomiar niejednorodności kierunków promieniowania daje pojęcie o obsadzeniach poziomów i może stanowić czuły termometr.

Wielką zaletą takiego termometru jest fakt, iż pomiar odbywa się bez żadnych przewodów i doprowadzeń do „zimnej” części aparatury. Materiał promieniotwórczy umieszcza się w bezpośrednim kontakcie z obszarem, którego temperaturę chcemy zmierzyć, natomiast detektor promieniowania znajduje się na zewnątrz.

W termometrii NO najbardziej użyteczny jest kobalt. Stabilny izotop ^{59}Co poddaje się działaniu niewielkiego strumienia neutronów w reaktorze, przeprowadzając go w izotop ^{60}Co . Schemat rozpadu ^{60}Co jest bardzo dobrze znany (emituje fotony γ o energii 1,173 i 1,332 MeV z okresem rozpadu 5,26 lat), stąd stosunkowa łatwość pomiaru. Jedynym wymaganym narzuconym na próbkę kobaltu jest jej monokrystaliczność i heksagonalność struktury krystalograficznej.

Sama aparatura jest w zasadzie bardzo prosta, poza niewielkim monokryształem kobaltu (typowe wymiary $1 \times 1 \times 5$ mm) składa się z licznika scyntylacyjnego i wielo- lub jednonkanałowego analizatora amplitudy. Dokładność wyznaczenia temperatury wynosi ok. 2% w 40 mK, a przy 2 mK jest nieco gorsza i wynosi ok. 7%.

Termometria NMR

Zastosowanie NMR do termometrii niskotemperaturowej pozwoliło przesunąć granicę pomiaru temperatury poniżej 1 mK. Wszystkie przeprowadzone w ciągu ostatnich 2–3 lat eksperymenty, w których osiągnęto temperatury $0,3 \div 0,4$ mK wykorzystywały tę właśnie zasadę pomiaru. Metoda NMR wykorzystuje fakt istnienia nieskomplikowanej zależności między temperaturą a momentem magnetycznym jąder atomowych. Wielkości te są odwrotnie proporcjonalne. Aby zmierzyć temperaturę, trzeba zatem zmierzyć moment magnetyczny jąder atomowych badanej próbki. Można to osiągnąć tak: Umieszczamy próbkę w stałym i jednorodnym polu magnetycznym. W tych warunkach wektor momentu magnetycznego każdego z jąder atomowych wykonuje ruch precesyjny wokół kierunku przyłożonego zewnętrznego pola magnetycznego z określoną częstością (tzw. częstość Larmora), a znajomość jej pozwala na obliczenie momentu magnetycznego jądra. Z kolei częstość Larmora wyznaczamy tak: Poddajemy próbkę działaniu fal elektromagnetycznych o częstości radiowej. Gdy częstość tych fal jest równa częstości Larmora, następuje rezonans: energia fal zamienia się w energię ruchu precesyjnego. Zatem, gdy będziemy znać długość fali elektromagnetycznej w chwili wystąpienia rezonansu, będziemy też wiedzieć, jaka jest częstość Larmora, więc i moment magnetyczny jąder, zatem i temperatura próbki.

Odwrotna proporcjonalność temperatury i momentu magnetycznego jąder obowiązuje aż do obszaru mikrokelwinowego i do tej granicy może służyć do wyznaczania temperatury. Próbkami termometrycznymi są sproszkowane metale, głównie miedź lub platyna.

Poza próbką należy w obszarze niskotemperaturowym umieścić także miniaturową cewkę zasilaną falami o częstości radiowej, będącą jednocześnie detektorem pochłaniania energii przez próbkę. Jest to duża niedogodność metody, same przewody elektryczne są już źródłem ciepła doprowadzonego do obszaru „zimnego”. Ponadto należy wytworzyć zewnętrzne pole magnetyczne o dużej jednorodności i stabilności. Jednakże wszystkie te mankamenty są z nawiązką skompensowane przez sam fakt wiarygodnego odczytu temperatury w zakresie mikrokelwinów. Uparte dążenie fizyków do osiągnięcia bezwzględnego zera przy pomocy coraz to bardziej zaawansowanych technik doświadczalnych nie jest rekordomanią. Odkryte w ostatnich latach fascynujące zjawiska fizyczne (nadciekłość ^3He , uporządkowanie magnetyczne zestalonego ^3He) świadczą o wielu nie zbadanych jeszcze możliwościach fizyki niskich temperatur. Fascynujące wydaje się być również i to, że granica zera bezwzględnego nie może być osiągnięta, fizyka niskich temperatur nie ma więc kresu...



Zadania

Redaguje mgr Krzysztof NOWIŃSKI

M 205. Wielomian $p(x) = x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \dots + a_1x + a_0$ ma n różnych pierwiastków całkowitych x_1, \dots, x_n . Wykazać, że wielomian $p(x) - 1$ nie może być iloczynem dwóch wielomianów niższego stopnia o współczynnikach całkowitych.

Rozwiązanie na str. 11

M 206. Znaleźć wszystkie wielomiany $p(x) = x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0$, mające 4 różne pierwiastki całkowite i takie, że $p(x) + 1$ rozkłada się na iloczyn dwóch wielomianów niższego stopnia o współczynnikach całkowitych.

Rozwiązanie na str. 7

M 207. Rozwiązać układ równań $\sin(2x + 3y) = 0$

$$\sin(3x + y) = 0$$

Rozwiązanie na str. 8

Redaguje dr Halina Abramowicz

F 69. a. Jaka musi być masa gazów wypływających w jednostce czasu przez dyszę rakiety, aby rakieta mogła oderwać się od Ziemi? Prędkość wypływu gazów wynosi $w = 2$ km/s, a masa startującej rakiety $m_0 = 2729$ t (masa rakiety Saturn V z księżycowym statkiem Apollo).

b. W jakim czasie silniki rakiety startującej z Księżyca (brak oporu atmosfery) powinny wyrzucić określoną ilość gazów o stałej prędkości, na to by rakieta osiągnęła maksymalną wysokość?

Rozwiązanie na str. 16

