

## WYTWARZANIE NISKICH TEMPERATUR METODĄ CHŁODZENIA MAGNETYCZNEGO

### GENERATION OF LOW TEMPERATURES BY THE MAGNETIC COOLING METHOD

**Katarzyna Kotynia**

Politechnika Częstochowska  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów  
Instytut Fizyki  
Zakład Badań Strukturalnych i Magnetycznych  
Al. Armii Krajowej 19  
42-200 Częstochowa  
e-mail: kasiakotynia@o2.pl

**Abstract:** The discussed process of lowering temperature (below 1 K) concerns the utilization of the magnetic properties of paramagnetic materials. The most important achievements and the progress in the field of low temperatures have been presented. The use of the effect of adiabatic paramagnetic material demagnetization known for over a hundred years has brought about numerous evident benefits. Although the magnetic cooling process is still not commonly used it is applied, for example, as an auxiliary way of attaining low temperatures of around 0 K, but its application is not common. This is due to the fact that the scientists are still searching for an appropriate material which would provide the capability to reduce the temperature to a sufficiently low level. So far, paramagnetic salts and alums, among others, have been used in the adiabatic demagnetization process, but the efficiency of those compounds is too low as against the needs.

**Keywords:** magnetic refrigeration, paramagnetic salts.

#### Wprowadzenie

Fizyka niskich temperatur w ogólnym pojęciu jest fizyką kwantowania energii skondensowanej materii. Z bardzo wielu względów technika niskich temperatur stanowi zupełnie specyficzne zagadnienie [1].

a) W bardzo niskich temperaturach niektóre ciała stają się bardzo kruche. Stwierdzono to w wypadku stali węglowej i kilku innych materiałów. Właściwość ta stała się przyczyną katastrof w przypadku kilku konstrukcji technicznych. Jednakże wiele niezależnych metali i stopów znosi niskie temperatury bardzo dobrze. Równie dobrze znosi je austenityczna stal nierdzewna.

b) Ciepło parowania cieczy posiadających niski punkt wrzenia jest bardzo małe. Wskutek tego ciecze te mogą być przechowywane jedynie w naczyniach doskonale izolowanych. W przy-

padku ciekłego helu bardzo małe ciepło parowania daje niewielki efekt chłodzenia. Na ogół chłodzenie aparatury do temperatury ciekłego helu polega przede wszystkim na wykorzystaniu pojemności cieplnej pary helu.

c) Opór elektryczny czystych metali jest w niskich temperaturach bardzo mały. Niektóre materiały poniżej określonej temperatury posiadają oporność zerową i zjawisko takie znane jest pod nazwą nadprzewodnictwa.

d) Przewodnictwo cieplne większości czystych metali i monokryształów poważnie wzrasta w niskich temperaturach i posiada wartość maksymalną, która może być wielokrotnie większa od wartości w temperaturze pokojowej. Z drugiej strony przy obniżaniu się temperatury większość stopów wykazuje progresywny spadek przewodnictwa cieplnego. Jeżeli temperatura zbliża się do zera absolutnego

przewodnictwo cieplne wszystkich ciał dąży do zera.

e) Ciepło właściwe wszystkich cieczy i ciał stałych zmniejsza się wraz ze spadkiem temperatury i w niskich temperaturach jest zupełnie nieznaczne.

f) We wszystkich niskotemperaturowych urządzeniach odpowiednia izolacja posiada istotne znaczenie. Wobec tego, że jednym z najlepszych izolatorów jest próżnia, technika wysokiej próżni odgrywa niezmiernie doniosłą rolę w technice niskich temperatur.

g) Przy wykorzystaniu wysokiej próżni jako izolatora zdarza się niekiedy, że całe szczątkowe przenoszenie ciepła odbywa się drogą promieniowania cieplnego poprzez próżnię izolującą, dlatego bardzo ważnym zadaniem jest analiza i kontrola przenoszenia ciepła drogą promieniowania.

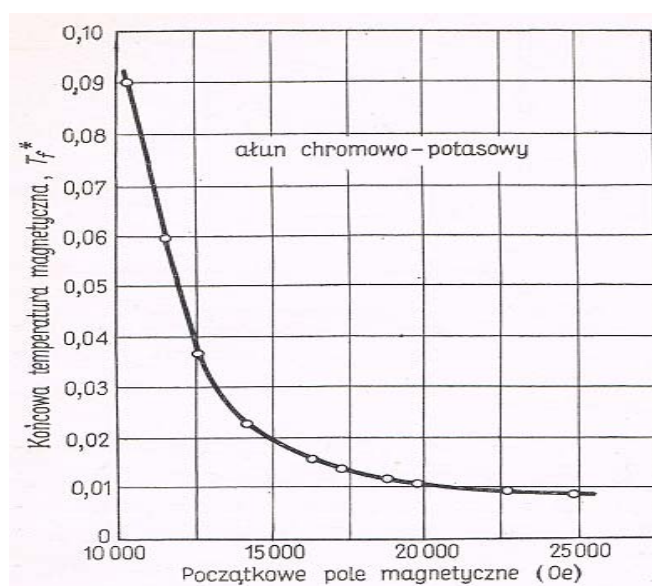
Postęp w rozwoju techniki niskich temperatur miał dwa główne źródła. Pierwsze to badania laboratoryjne, w których wykorzystywano niskie temperatury przy opracowaniu podstawowych zagadnień z dziedziny fizyki lub chemii. Drugie to zakłady dostarczające gazy przemysłowe. Wysiłki producentów gazów szły w kierunku znajdowania nowych procesów niskotemperaturowych służących do rozdzielania i oczyszczania gazów oraz do podniesienia w ten sposób ogólnej wydajności zakładów, w celu zmniejszenia kosztów produkcji. W laboratoriach naukowych skupiano się przede

wszystkim na poszukiwaniach najłatwiejszych sposobów osiągania niskich temperatur, niezbędnych do prac doświadczalnych. Pracownicy naukowcy zainteresowali się polepszeniem jakości oferowanego przez przemysł wyposażenia, niezbędnego do otrzymywania temperatur o wiele niższych od tych, jakie interesowały producentów gazu przemysłowego [1].

## Opis zagadnienia

### Osiągnięcia w dziedzinie niskich temperatur

Najniższa temperatura osiągnięta przez adiabatyczne rozmagnesowanie soli paramagnetycznej wyniosła w przybliżeniu 0,001 K. Wykorzystanie mieszaniny kryształów alunu chromowego i alunu glinowego przez De Klerka, Steenlanda i Gortera [2, 3, 4] pozwoliło na wyznaczenie drogą obliczeń temperatury 0,0014 K (rys. 1). To osiągnięcie zostało potwierdzone, a prawdopodobnie nawet przekroczone w doświadczeniu, w którym zastosowano rozmagnesowanie dwustopniowe [5]. Wydaje się jednak, że uzyskana temperatura jest najniższą osiągalną tą drogą. Wynika to z własności termicznych soli paramagnetycznych w bardzo niskich temperaturach. Te same własności, które powodują zjawisko chłodzenia adiabatycznego, wyznaczają granicę dla najniższej osiągalnej temperatury.



Rys.1. Wyniki otrzymane przez De Klerka podczas adiabatycznego rozmagnesowania alunu chromowo-potasowego (temperatura początkowa 1,17 K) [7].

Możliwe jest uzyskanie temperatury znacznie niższej, dzięki jądrowemu rozmagnesowaniu adiabatycznemu. Możliwość tę przewidział Simon w 1937 roku a pierwsze doświadczenia przeprowadzone były przez Kurtiego, Robinsona, Simona i Sphora [6] w 1956 roku. Eksperyment polegał na ustawieniu spinów jądrowych atomów miedzi, po ochłodzeniu jej do ok. 0,01 K na drodze adiabatycznego rozmagnesowania soli paramagnetycznej, przez pole magnetyczne o dużym natężeniu.

Sól paramagnetyczną stanowił alun chromowo-potasowy w postaci zawiesiny w glicerynie i wodzie. Próbkę miedzi wykonaną była z 1540 emaliowanych drutów. Tworzyły one połączenie termiczne z solą, przy czym druty próbki były zgięte 4-krotnie na długości ok. 7 cm, przez co uzyskana została zwarta masa. Użycie doskonale rozdrobnionej miedzi izolowanej było konieczne dla zmniejszenia nagrzewania przez prądy wirowe, które w cieple stałym powoduje 100 razy większe od energii odprowadzanej przez chodzenie adiabatyczne.

Podczas doświadczenia sól paramagnetyczna była najpierw chłodzona do ok. 1 K w polu magnetycznym o natężeniu 2 T. Rozmagnesowanie soli obniżało temperaturę soli próbki miedzi do ok. 0,01 K. Następnie próbka była powoli magnesowana do pola o wysokim natężeniu 2,8 T. Powstające przy tym ciepło, absorbowane było przez sól paramagnetyczną nie podnosząc istotnie jej temperatury. Po rozmagnesowaniu temperatura jader miedzi spadła do ok.  $20 \cdot 10^{-6}$  K. W ten sposób otrzymana temperatura wyniosła 20-milionowych stopnia ponad zero bezwzględne. Autorzy reasumując otrzymane wyniki stwierdzili, że znaczenie tego doświadczenia nie polega na osiągnięciu rekordowo niskiej temperatury, ale dostarczyło danych o zachowaniu się spinów jądrowych w ciałach stałych i ich oddziaływaniu na otoczenie.

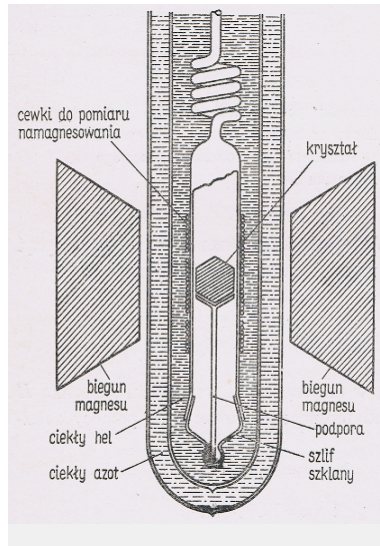
Istnieją dwie metody, które mają wpływ na osiągnięcie bardzo niskich temperatur. Pierwsza z nich polega na zastosowaniu bardziej intensywnego pola magnetycznego. Metoda druga polega na wykorzystywaniu systemu kaskadowego przy osiąganiu niskich temperatur. Dla rozmagnesowania jądrowego, niższą temperaturę wyjściową można otrzymać przez

zastosowanie dwóch lub więcej stopni chłodzenia wstępnego [1].

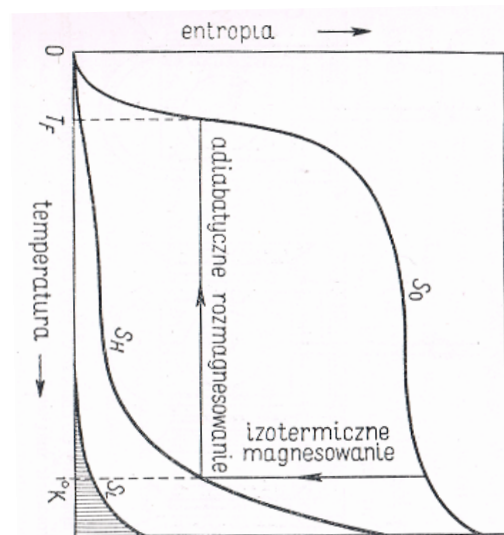
### Proces rozmagnesowania adiabatycznego

W 1926 roku W.F. Giauque [8, 9] (Niemcy), wpadli jednocześnie na myśl, że wykorzystując magnetyczne własności soli paramagnetycznych można otrzymać temperatury poniżej 1 K. W 1953 roku Giauque i MacDugall [10] pierwsi przeprowadzili odpowiednie doświadczenie. Wybrali oni siarczan gadolinu, umieścili go w naczyniu szklanym, do którego mógł być wpuszczony i w razie potrzeby gwałtownie odpompowany gazowy hel. Naczynie było otoczone ciekłym helem o temperaturze w przybliżeniu 1 K, która została otrzymana w wyniku odpompowania helu i obniżenia ciśnienia jego par. Przez naczynie Dewara z ciekłym helem przetaczano ciekły azot. Cały zespół naczyń był dostatecznie wąski, aby można było go umieścić pomiędzy nabiegunnikami elektromagnesu lub we wnętrzu bezrdzeniowego solenoidu. Urządzenie takie pokazane jest schematycznie na rys. 2. Sól paramagnetyczną stanowił zwykle konglomerat ciasno upakowanych kryształów, uformowany w kształcie kuli lub elipsoidy w celu osiągnięcia korzystnych własności magnetycznych.

Na rys. 3 przedstawiono idealny obieg w układzie  $T-S$  dla typowej soli, który obrazuje zasady chłodzenia paramagnetycznego. W temperaturze 1 K pozostała mała entropia sieci  $S_L$ , natomiast istotny udział entropii wynika ze spinów elektronów, które jeszcze podlegają prawu Curie. Odchylenia od tego prawa występują dopiero w temperaturze ok. 0,1 K lub niższej, gdy entropia zmniejsza się z powodu samorzutnego uporządkowania się spinów elektronów, wynikającego z wzajemnego oddziaływania między nimi. Krzywa  $S_0$  przedstawia entropię, gdy na układ nie działa żadne pole magnetyczne. W wyniku działania silnego pola magnetycznego w temperaturze 1 K następuje orientacja spinów i proces uporządkowania jest równoważny zmniejszaniu się entropii. W temperaturze 1 K pole magnetyczne o natężeniu 10 kOe zmniejsza entropię  $S_H$  do ułamka jej początkowej wartości.



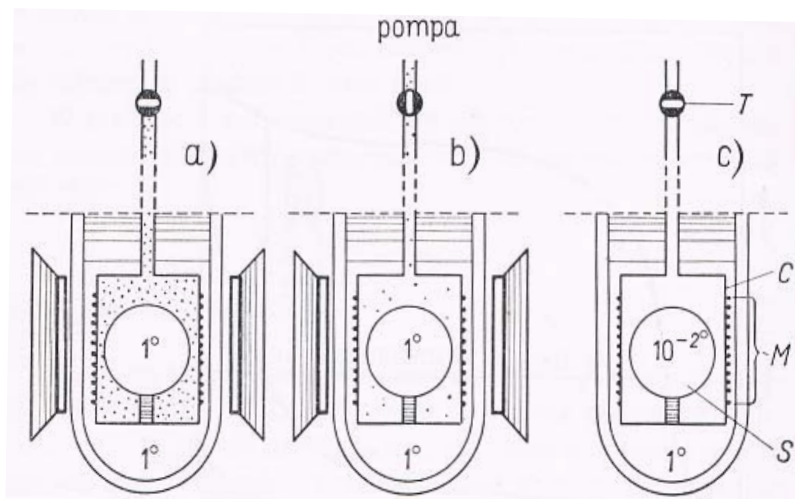
Ryc.2. Sól paramagnetyczna umieszczona pomiędzy biegunami magnesu [7].



Rys. 3. Wykres entropii paramagnetycznej soli, ilustrujący chłodzenie przy użyciu adiabaticznego rozmagnesowania [11].

Jeżeli proces ten ma przebiegać izotermicznie, ciepło które wyzwala się w czasie magnesowania spinów powinno być odprowadzone. Z drugiej strony, adiabaticzne rozmagnesowanie jest procesem izotropowym. Sól będzie się ochładzać wzdłuż linii stałej entropii, jeżeli pole magnetyczne zostanie usunięte bez możliwości odzyskania przez sól ciepła wydzielonego w czasie magnesowania. Końcowa temperatura  $T_F$ , jaką można osiągnąć odpowiada temu punktowi na wykresie  $T-S$ , przy którym entropia w polu magnetycznym równym zeru osiąga wartość  $S_H$  przy 1 K. Praktyczne zastosowanie tej metody jest pokazane schematycznie na rys. 4. W zbiorniku C znajduje się próbka soli S na podporze z

materiału o niskiej wartości przewodnictwa cieplnego. Zbiornik ten, w którym może być wytworzona próżnia przez zawór T, jest zanurzony w ciekłym helu o temperaturze 1 K. Po włączeniu pola magnetycznego wyzwala się z soli S ciepło, które jest odbierane przez znajdujący się w zbiorniku C hel gazowany i oddawany do kąpieli ciekłego helu, gdzie zostaje odprowadzone izotermicznie przez odparowanie (a). W tym stanie w temperaturze 1 K spiny są zorientowane. Następnie, gdy ciepło magnesowania zostaje całkowicie odprowadzone, otwiera się zawór C - sól zostaje termicznie odizolowana od ciekłego helu (b). Następnie pole magnetyczne jest wyłączone, a sól oziębia się do niskiej temperatury (c).



Rys. 4. Schemat aparatury do chłodzenia przy użyciu adiabatyicznego rozmagnesowania. M- termometr magnetyczny [11].

Należy przy tym zwrócić szczególną uwagę, aby zmniejszyć do minimum dopływ ciepła do próbki soli S, czy to na skutek promieniowania, czy też przewodnictwa resztek gazu. Należy również unikać powstawania ciepła wewnątrz zbiornika C z drgań mechanicznych podstawy, na której wspiera się próbka S. Sól jest zazwyczaj w postaci monokryształu lub kapsułki. Kształt próbki powinien być eliptyczny, aby uzyskać prostą postać współczynnika rozmagnesowania. Najprostszym sposobem ochłodzenia innej substancji przy użyciu soli jest sprasowanie jej w jedną kapsułkę. W ten sposób zostało odkryte nadprzewodnictwo pewnej ilości metali w temperaturze poniżej 1 K. Często wskazane jest, aby próbka do badań oddzielona była przestrzennie od soli. W tym wypadku sól zostaje wprasowana w metalowy zbiorniczek, w którym badana próbka zostaje połączona termicznie poprzez pośredni styk.

W miarę spadku temperatury wymiana ciepła w soli oraz pomiędzy solą a drugą substancją pogarsza się. Ciekły hel jest odpowiednim ośrodkiem do wymiany ciepła w temperaturach obniżających się do ok. 0,1 K. Wewnętrzne ścianki jakiegokolwiek naczynia wypełnionego ciekłym heliem o tej temperaturze są zwilżane grubą ruchomą błoną cieczy, która wyparowuje w górnej części naczynia. Skraplająca się ponownie para oddaje wtedy znaczne ilości ciepła do wnętrza kriostatu i gwałtownie ogrzewa sól.

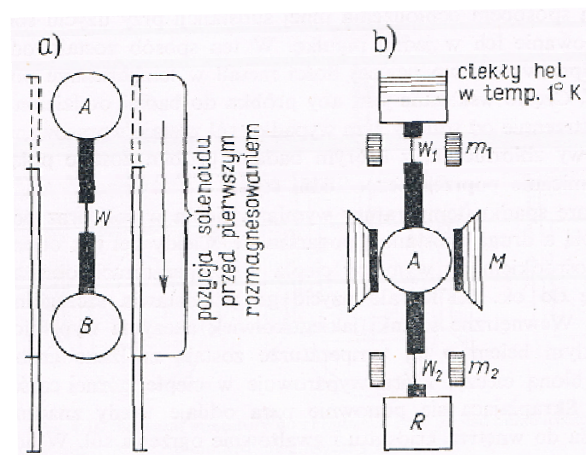
W doświadczeniach, w których sól ma być zanurzona w ciekłym helu, w celu uniknięcia tego zjawiska, rurka łącząca musi być bardzo cienką kapilarą. W niektórych wypadkach trudność ta może być pokonana przez umieszczenie soli wraz z drugą substancją w kapsułce wypełnionej heliem gazowym pod wysokim ciśnieniem w temperaturze pokojowej, a następnie uszczelnionej. W niskiej temperaturze gaz skrapla się i w ten sposób tworzy kapiel z ciekłego helu, która nie ma żadnej rurki prowadzącej na zewnątrz [11].

Bardzo niskie temperatury mogą być uzyskane przez dwustopniowe ochłodzenie. W metodzie tej dwie próbki soli A i B ( ryc.5 a) są połączone drutem ołowianym W, który ma większą zdolność przewodzenia ciepła w stanie normalnym niż w stanie nadprzewodnictwa. Na początku obie próbki zostają poddane działaniu pola magnetycznego w sposób zwykły. Następnie magnes zewnętrzny (w tym przypadku solenoid) zostaje wolno przesunięty ku dołowi. W ten sposób próbka A ochłodzi się przez rozmagnesowanie, podczas gdy próbka B pozostaje nadal w polu magnetycznym. W tymże czasie próbka B ochładza się do końcowej temperatury próbki A przez przewodnictwo cieplne drutu W. Wyłączenie całkowite pola magnetycznego powoduje w końcu stan nadprzewodnictwa drutu W, przez co przerywa się kontakt cieplny pomiędzy próbkami A i B, jak również rozmagnesowanie próbki B. Używając odpowiednich soli (alun żelazowo-amonowy jako próbka A oraz

rozcieńczony alun chromowo-potasowy jako próbka B) osiąga się temperaturę końcową próbki B  $3 \cdot 10^{-3}$  K przy użyciu pola magnetycznego o natężeniu 4 kOe. Aby uzyskać tę temperaturę przy zastosowaniu jednostopniowego rozmagnesowania potrzebne byłoby użycie pola magnetycznego o natężeniu 15 kOe. Stosując tę samą metodę Daunt i jego współpracownicy udoskonalili tę „magnetyczną lodówkę” o ciągłym procesie działania. Pracującą substancją jest sól A (ryc.5 b), połączona termicznie ze zbiornikiem ciekłego helu i zbiornikiem cieplnym R przy użyciu dwóch drutów ołowianych  $W_1$  i  $W_2$ . Próbkę tę magnesuje się za pomocą magnesu M. „Przełączniki termiczne” obsługiwane są ponadto przez dwa małe magnesy  $m_1$  i  $m_2$ . W cyklu działania najpierw magnesuje się próbkę A, a wydzielone ciepło odprowadza się przez drut  $W_1$ , który znajduje się w stanie normalnym (nie w stanie nadprzewodnictwa). Następnie drut  $W_1$  wprowadza się w stan nadprzewodnictwa (złe przewodnictwo cieplne) przez wyłączenie pola magnetycznego magnesu  $m_1$ , a próbka A przez rozmagnesowanie zostaje ochłodzona. Wówczas drut  $W_2$  doprowadza się do stanu normalnego (dobre przewodnictwo cieplne) przez włączenie pola magnetycznego magnesu  $m_2$ ; wtedy zbiornik cieplny R zostaje termicznie izolowany przez doprowadzenie drutu  $W_2$  do stanu nadprzewodnictwa, a drut  $W_1$  znowu do stanu normalnego, na wskutek włączenia pola magnetycznego magnesu  $m_1$  oraz pola magnetycznego magnesu M próbki A.

W ten sposób zbiornik R zostaje stopniowo ochładzany do chwili, gdy dopływ ciepła zostanie skompensowany przez cykliczne odbieranie ciepła poprzez próbkę A. W rezultacie w zbiorniku uzyskuje się stałą temperaturę ok. 0,2 K [11].

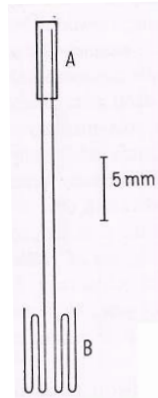
Niezależnie od siebie Gorter, Kurti i Simon [12] zaproponowali, aby drugi stopień schematu rozmagnesowania przedstawionego na rys. 5a spełnił zadanie chłodzenia jądrowego. Dolną granicę, jaką można uzyskać za pomocą rozmagnesowania spinów elektronów, jest temperatura rzędu  $10^{-3}$  K, a skoro magnetyczny moment spinów jąder jest ok. tysiąc razy mniejszy od magnetycznych momentów elektronów, to możnaby rozmagnesowując jądra uzyskać temperaturę rzędu  $10^{-6}$  K. Z drugiej jednak strony mała wartość magnetycznego momentu jądra wymagałaby pola rozmagnesowującego rzędu  $10^7$  Oe, co oznacza że temperatura początkowa rozmagnesowania jąder powinna wynosić 0,01 K. Taka temperatura może być osiągnięta bez większych trudności przez jednostopniowe paramagnetyczne chłodzenie, jednakże w tym obszarze temperatur równowaga termiczna soli, jak również termiczny kontakt pomiędzy próbką A i B przedstawia poważny problem. Doświadczenie wykonane przez Kurtiego, Robinsona, Simona i Spohra [6] w Oxfordzie po raz pierwszy dały w rezultacie chłodzenie jądrowe i chociaż szybkość, z jaką zmniejszała się podatność jądrowa była duża, to jednak uzyskano temperatury spinowe rzędu  $10^{-5}$  K.



Rys. 5. a) Dwustopniowe chłodzenie magnetyczne (wg Darby'ego, Hattona i Rollina), b) oziębiacz magnetyczny (wg Daunta i Heera) [11].

Aby zmniejszyć prądy wirowe, użyto dla niższego stopnia miedź w postaci 1500 bardzo cienkich drucików. Druciki złożono w sposób pokazany na rys. 6 w grubą wiązkę B, a ich górne końce wprasowano w próbkę soli A, tworząc w ten sposób dużą powierzchnię termicznego kontaktu. Duża szybkość, z jaką w tych pierwszych doświadczeniach ogrzewał się układ spinów jądrowych, była spowodowana wymianą ciepła między tymi spinami a

wolnymi elektronami i siecią. Kittel podał myśl zastosowania chłodzenia i metody dynamicznej orientacji jader za pomocą nasycenia energią mikrofalową [13]. W magnetycznych metodach chłodzenia użycie płynnego  $\text{He}^3$  pełni rolę bezpośredniego czynnika chłodzącego, albo osłony przed promieniowaniem cieplnym w niskich temperaturach.



Rys. 6. Urządzenie do chłodzenia jądrowego (wg Kurtiego, Robinsona, Simona i Spohra) [6].

Temperaturę poniżej 1 K można osiągnąć przez adiabatyczne magnesowanie metalu nadprzewodzącego. Z rys. 7 wynika, że izoentropowe przejście ze stanu nadprzewodnictwa do stanu normalnego musi dać w wyniku ochłodzenie, które jest tym większe, im niższa jest temperatura początkowa. Jednakże entropia metalu w stanie normalnym zwiększa się liniowo wraz z temperaturą, co oznacza, że jego pojemność cieplna staje się bardzo mała poniżej 0,1 K. W celu zmniejszenia ilości wydzielonego ciepła w skutek powstawania prądów wirowych, wskazane jest wprowadzenie nieznacznej domieszki indu (0,5 do 1%) do próbki. Fakt, że czas potrzebny do ogrzania 35 moli metalu od 0,35 do 0,75 K wynosi 7 godzin, wskazuje że metoda ta ma praktyczne znaczenie.

Stopień zorientowania magnesów jonowych, wyrażający się makroskopowo namagnesowaniem  $M$ , dany jest przez prawo Curie. Równość

$$M = C \frac{M}{H} T \quad (1)$$

można zapisać w postaci:

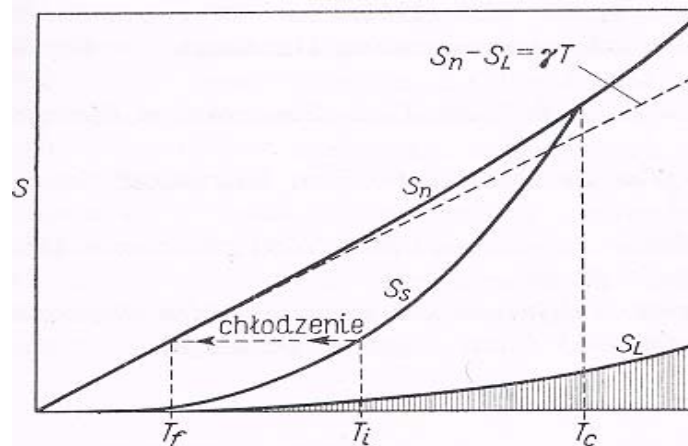
$$C = \frac{M}{H} T. \quad (2)$$

Początkowo, gdy  $T=T_{max}$  (około 1 K), wielkość  $H$  jest wybrana tak, aby zachowane było prawo Curie. Wielkość  $M$  mierzona jest wtedy za pomocą uzwojeń pokazanych na rys. 2 i odpowiedniego obwodu pomiarowego. Znając  $M$ ,  $H$  i  $T$  można wyznaczyć stałą Curie [7].

Na zakończenie procesu adiabatycznego rozmagnesowania przykładane jest niewielkie pole magnetyczne (wywołując zauważany wzrost temperatury) i w tym polu mierzy się namagnesowanie  $M$ . Znając  $M$ ,  $H$  i  $C$  wyznacza się wielkość  $T^*$ , zwana temperaturą magnetyczną, która z definicji równa jest:

$$T^* = C \frac{H}{M}. \quad (3)$$

Wielkość  $T^*$  może się istotnie różnić od rzeczywistej temperatury, dlatego tak ważne jest zdanie sobie sprawy, w jaki sposób wyznacza się temperaturę na podstawie temperatury magnetycznej [7].



Rys. 7. Wykres entropii nadprzewodnika ilustrujący chłodzenie przy użyciu adiabatycznego namagnesowania (wg Mendelsohna i Yaquba).  $S_s$  i  $S_n$  - entropie nadprzewodzącego i normalnego metalu.  $S_L$  - entropia sieci [11].

### Podsumowanie

Duże obniżenie temperatury i zbliżenie się jej do zera absolutnego jest następstwem specyficznej zależności entropii od temperatury. Oczywiście zależność ta jest związana z ciepłem właściwym, które jest większe w

niskich temperaturach. Odpowiednimi solami paramagnetycznymi do wywarzania bardzo niskich temperatur są roztwory soli, w których jony paramagnetyczne są ułożone na przemian z niemagnetycznymi atomami tak, że istnieje słabe oddziaływanie pomiędzy sąsiadującymi jonami magnetycznymi.

### Literatura

1. Scott, R.B., Technika niskich temperatur, WNT, Warszawa, 1959.
2. De Klerk, D., Steenland, M.J., Gorter, C.J., Leiden Comm., 1950, nr 282a, *Physica*, 16, p. 571.
3. De Klerk, D., Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Reinhold Publishing Corp., N.Y., 1955, 2, p. 251.
4. De Klerk, D., Adiabatic demagnetization, *Handbuch der Physik*, 1956, Vol. 15, 209.
5. Darby, J., Hatton, J.V., Rollin, B.V., Seymour, E.F.W., Silsbee, *Proc. Phys. Soc.*, 1951, A64, p. 861.
6. Kurti, N., Robinson, F.N.H., Sir Francis Simon, D.A., Spohr, *Nature*, 1956, 178, p. 450.
7. Zemansky, M.W., Temperatury bardzo niskie i bardzo wysokie PWN, Warszawa, 1964.
8. Giaque, W.F., *J.Amer. Chem. Soc.*, 1927, 49, p. 1870.
9. Debye, P., *Ann. Physik*, 1926, 81, p. 1154.
10. Giaque, W.F., MacDougall, D.P., *Phys. Rev.*, 1933, 43, p. 768.
11. Mendelsohn, K., Fizyka niskich temperatur, PWN, Warszawa, 1966.
12. White, G.K., Technika doświadczalna w fizyce niskich temperatur, PWN, Warszawa, 1965.
13. Kittel, Ch., Wstęp do fizyki ciała stałego, PWN, Warszawa, 1999.