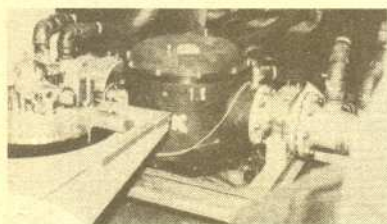
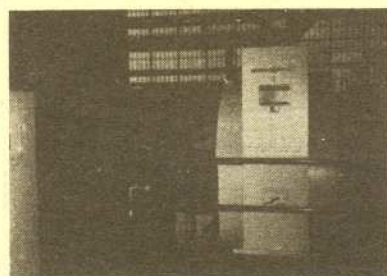


Wycieczka do najsilniejszego magnesu świata, czyli jak otrzymano pole magnetyczne o indukcji 33,6 tesli

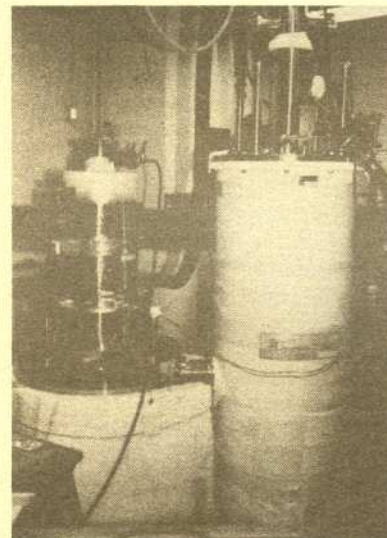
Dr Andrzej HENNEL



Fot. 1



Fot. 2



Fot. 3

Przebywając w Massachusetts Institute of Technology w Cambridge (stan Massachusetts, USA) w bezpośrednim sąsiedztwie najsilniejszego magnesu świata postanowiłem przekazać Czytelnikom *Delta* nieco informacji na jego temat. Wprawdzie zanotowany w słynnej księdze *Guinness Book of World Records* i należący do MIT rekord świata z 1981 roku, wynoszący 30,1 tesli, został w 1985 roku pobity przez magnes zbudowany w Japonii (30,7 tesli), jednakże już w 1986 roku MIT odzyskał światowy prymat rezultatem 33,6 tesli.

Zabrałem ze sobą aparat fotograficzny i poszedłem na małą wycieczkę zarówno do owego „rekordzisty”, jak i innych, mniej sławnych, magnesów zbudowanych w MIT. Wszystkie one znajdują się w Francis Bitter National Magnet Laboratory (Narodowe Laboratorium Magnetyczne imienia Francisca Bittera) należącym do MIT. Laboratorium to założone w 1960 roku pełni rolę międzynarodowego centrum badań bardzo wysokich i bardzo niskich pól magnetycznych. Każdy fizyk, którego projekt eksperymentu zostanie zaakceptowany przez kierownictwo naukowe laboratorium, może za darmo otrzymać prawo korzystania z wybranego magnesu i odpowiedniej aparatury naukowej.

Podstawowym typem magnesów, którymi dysponuje laboratorium, jest tzw. elektromagnes Bittera. Zasada konstrukcji takiego magnesu opisana została w artykule dr. K. Pastora omawiającym laboratorium pól magnetycznych w Grenoble (*Delta* 2/1984), dlatego też ograniczę się tu tylko do krótkiego przypomnienia. Jeden z elektromagnesów Bittera przedstawiony jest na fotografii 1. Stałe, jednorodne pole magnetyczne wytwarzane jest w centralnym otworze magnesu, widocznym u góry na środku, przez stały prąd elektryczny o natężeniu dochodzącym do 40 000 amperów, płynący przez miedziane dyski tworzące elektromagnes. Prąd ten dopływa do magnesu czterema grubymi kablami chłodzonymi wodą, z których jeden widoczny jest po przeciwnej stronie magnesu. Wnętrze magnesu chłodzone jest sześcioma tysiącami litrów wody na minutę, płynącej w poprzek dysków przez specjalne otwory. Woda ta, pod ciśnieniem 14 atmosfer doprowadzana jest rurami znajdującymi się po prawej i lewej stronie magnesu. Ponieważ sam brałem udział w pomiarach prowadzonych w magnesach Bittera, mogę dodać, iż przepływ wody pod takim ciśnieniem powoduje mnóstwo dość przykrego dla ucha hałasu i po trwającej trzy i pół godziny „wachcie” przy magnecie można być niezłe ogłuszonym na resztę dnia.

Magnesy Bittera przy maksymalnym poborze mocy dochodzącym do 10 MW wytwarzają pole magnetyczne o indukcji wynoszącej 24 tesle w otworze centralnym o średnicy 3 cm. Zwiększenie średnicy otworu, oczywiście, zmniejsza możliwe do osiągnięcia pole magnetyczne — przy średnicy 5,5 cm indukcja wynosi 20 T, a przy 15 cm około 10 T. Warto również uzmysłowić sobie, iż pole o indukcji 24 T jest pół miliona razy silniejsze od ziemskiego pola magnetycznego wynoszącego 0,00005 T.

Zasilanie elektromagnesów prowadzone jest przez elektrownię MIT dostarczającą do laboratorium maksymalnie 10 MW. Umożliwia to albo pracę jednego elektromagnesu w zakresie około 20 T, albo dwóch do około 10 T. Układ czterech generatorów dających prąd stały o napięciu 240 V zaopatrzone jest w dwa 84-tonowe koła zamachowe (jedno widoczne jest na fotografii 2) i gwarantuje stabilność pola magnetycznego na poziomie 0,05%. Generatory te mogą być chwilowo przeciążone do 8 MW każdy, czyli impulsowy pobór mocy może wynieść nawet 32 MW. Chłodzenie elektromagnesów zapewnia przepływająca obok laboratorium rzeka Karola (Charles River), z której woda pobierana jest ujęciem o średnicy 120 cm. Konstrukcja elektromagnesów bitterowskich jest stale udoskonalana i jeśli w 1978 roku najlepszy z nich osiągnął 23,8 T zużywając 9,43 MW, co dawało wydajność 60 T²/MW, to sześć lat później zbudowano magnes, który osiągnął 23,1 T zużywając 7,45 MW (71,5 T²/MW). Poprawiana jest również żywotność elektromagnesów. Do roku 1980 „przeżywały” one kilkadziesiąt godzin pracy. Obecnie przekroczone granicę 100 godzin, a niektóre spośród magnesów „przeszły na zasłużoną emeryturę” po ponad 200 godzinach pracy. Jak potężne są siły dążące do zniszczenia elektromagnesu, może uzmysłowić fakt, iż miedziane dyski nie wytrzymują pól silniejszych niż 45–50 T. W budowanym obecnie magnecie impulsowym, który ma wytwarzać co 10 minut pole o indukcji 50 T na okres jednej sekundy, zastosowane zostały dyski stalowe.

Wróćmy jednak do pól stałych. Jak można przekroczyć granicę trzydziestu tesli? Nie mogą tego, jak dotąd, zrobić magnesy nadprzewodzące, z których jeden, przedstawiony na fotografii 3 po lewej, osiąga pole o indukcji 15 T. Ograniczenie wartości indukcji pola magnetycznego w magnesach nadprzewodzących nie wynika ani z braku mocy, ani z ograniczonych możliwości chłodzenia. Wprost przeciwnie — magnes nadprzewodzący wymaga stosunkowo niewielkiej mocy, a chłodzenie zapewnia mu ciekły hel. Kluczowym natomiast problemem jest istnienie tzw. pola krytycznego, po którego przekroczeniu znika nadprzewodnictwo. Dlatego też intensywnie prowadzone są poszukiwania nadprzewodników o możliwie wysokiej wartości pola krytycznego. Związki, takie jak Nb₃Sn, Nb₃Al i V₃Ga, charakteryzujące się wartością pola krytycznego powyżej 20 T, są obecnie najlepszymi materiałami do wyrobu magnesów nadprzewodzących, poszukiwania wciąż jednak trwają ...

Najlepszym, jak dotąd, pomysłem okazało się połączenie magnesu nadprzewodzącego i magnesu Bittera w tzw. magnes hybrydowy. Konstrukcja jego wygląda następująco — ogromny magnes nadprzewodzący o średnicy wewnętrznej 35 cm otacza magnes Bittera. Zestaw ten przedstawiony jest na fotografii 4. Magnes nadprzewodzący może zgromadzić energię 3,5 MJ i osiągnąć pole o indukcji około 7,5 T, natomiast magnes bitterowski przy mocy 9 MW osiąga około 22,5 T, co razem dało w 1981 roku rekord świata 30,1 T indukcji stałego pola magnetycznego w otworze o średnicy 3,3 cm. Przez kilka lat wynik ten figurował w księdze rekordów wraz z polem o najsłabszej indukcji 8 · 10⁻¹⁵ T, również otrzymanym w tym samym laboratorium.



Fot. 4

Wynik fizyków japońskich (30,7 T) zdopingował pracowników National Magnet Laboratory do poszukiwania nowych metod otrzymania wyższych wartości pola magnetycznego. Chodziło tu przy tym o osiągnięcie rezultatu wykraczającego w sposób zdecydowany poza granicę błędów pomiaru wartości indukcji pola magnetycznego, co przy tak wysokich polach jest problemem niebagatelnym. Japończycy w ogóle nie podali błędów swojego pomiaru — co jest złamaniem niepisanych reguł, które obowiązują eksperymentatorów.

Lawrence G. Rubin, naczelny inżynier laboratorium od czasów jego powstania, opowiedział mi potem, że szukając nowych koncepcji znalazł opublikowaną w 1984 roku pracę fizyków radzieckich. Otrzymali oni pole o indukcji 17,6 T w zrobionej z dysprozu szczelinie o szerokości 0,9 mm umieszczonej wewnątrz magnesu nadprzewodzącego. Dysproz, należący do pierwiastków grupy ziem rzadkich, jest ferromagnetykiem niemal pięciokrotnie silniejszym od żelaza, niestety, jedynie w temperaturach poniżej 85 K (tyle wynosi dla niego tzw. temperatura Curie określona dla ferromagnetyków, dla żelaza wynosi ona około 770°C). Umieszczenie odpowiednio wyciętych biegunów z dysprozu wewnątrz magnesu wytwarzającego pole o indukcji około 15 T spowodowało skupienie strumienia magnetycznego wewnątrz ferromagnetyka, jakim jest dysproz i w konsekwencji podwyższenie wartości indukcji pola magnetycznego w szczelinie między biegunami.

Rubin rozpoczął więc poszukiwania i wkrótce w National Bureau of Standards w Waszyngtonie udało mu się znaleźć dwa małe cylindry z innego ferromagnetyka — holmu. Holm należy również do ziem rzadkich i ma przenikalność magnetyczną niemal identyczną jak dysproz, jedynym problemem jest jego jeszcze niższa temperatura Curie (20 K). Należało więc wyprofilować z holmu parę biegunów o wymiarach 32 mm × 19 mm i końcówkach o średnicy 12 mm. Między nimi pozostawiono szczelinę o szerokości 2 mm utrzymywaną kołnierzem z brązu. Całość została umieszczona w kriostacie napełnionym ciekłym helem, który z kolei włożono do magnesu hybrydowego.

Następnie rozpoczęto bardzo staranne i wielokrotne pomiary indukcji pola magnetycznego przy użyciu sond półprzewodnikowych, tzw. hallotronów z InSb i InAs. Badano liniowość hallotronów, namagnesowanie holmu w niższych polach, prowadzono porównawcze pomiary zastępując holm przez aluminium, które nie jest ferromagnetykiem. Ostatecznie zmierzono, iż holm przy indukcji pola wynoszącej 30 T zwiększa pole w szczelinie o $3,5 \pm 0,03$ T. Uwzględniając więc wszystkie możliwe błędy pomiaru L. G. Rubin, B. L. Brandt, R. J. Weggel, S. Foner i E. J. McNiff, Jr. w dniu 20 marca 1986 roku stwierdzili, że osiągnęli stałe pole magnetyczne o indukcji $33,6 \pm 0,3$ T w szczelinie o szerokości 2 mm. I w ten sposób magnes hybrydowy z MIT powrócił do księgi rekordów.

Co będzie w przyszłości? National Magnet Laboratory ma wiele planów, wśród nich wspomniany magnes impulsowy o indukcji pola rzędu 50 T, do którego zakupiono baterię kondensatorów gromadzącą ćwierć miliona dżuli energii. Dalsze plany przewidują pole impulsowe o indukcji 75 T, a potem pole stałe o tej samej indukcji. Inne laboratoria też pracują nad nowymi magnesami ... Jeżeli więc w tej konkurencji padną nowe rekordy, Czytelnicy *Delta* będą o tym na pewno szybko poinformowani.



Zadania

Redaguje dr Rafał SZTENCEL

M 469. Rzucamy monetą aż do chwili otrzymania orła. Prawdopodobieństwo otrzymania orła w pojedynczym rzucie wynosi p ($p > 0$). Ile średnio rzutów trzeba wykonać?

Rozwiązanie na str. 3

M 470. Ile razy średnio trzeba rzucać kostką, aby otrzymać wszystkie możliwe liczby oczek?

Rozwiązanie na str. 3

M 471. Niech \mathcal{F} będzie ciałem podzbiorów zbioru skończonego A , czyli niepustą rodziną podzbiorów zamkniętą ze względu na działania na zbiorach (tj. suma, iloczyn i dopełnienie elementów \mathcal{F} są elementami \mathcal{F}). Ile elementów może mieć takie ciało?

Rozwiązanie na str. 15

Redaguje mgr Rafał STAROŃSKI

F 220. Zakładając, że cząsteczki powietrza są kulkami o średnicy $d = 3,7 \times 10^{-10}$ m ocenić średnią długość drogi między kolejnymi zderzeniami cząsteczki powietrza w warunkach normalnych ($P_0 = 10^5$ Pa, $T_0 = 273$ K).

Rozwiązanie na str. 14

F 221. Między ściankami bańki termosu o objętości $V = 1$ l panuje (w temperaturze pokojowej $T_0 \approx 20^\circ\text{C}$) ciśnienie $P = 1$ Pa. Jak długo będzie stygł 1 litr wody w tym termosie od temperatury $T_1 = 90^\circ\text{C}$ do $T_2 = 70^\circ\text{C}$? Pole powierzchni bańki wynosi $S = 600$ cm². Straty ciepła przez korek zaniedbujemy. Potrzebne dane wziąć z tablic.

Rozwiązanie na str. 2