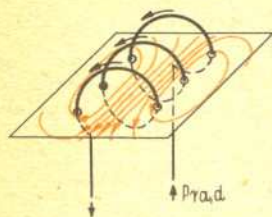
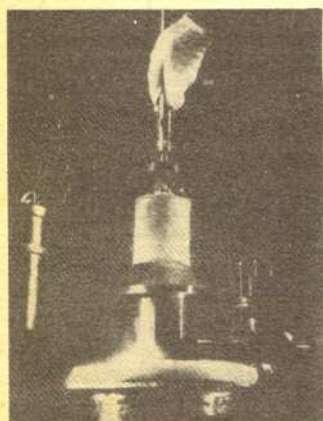


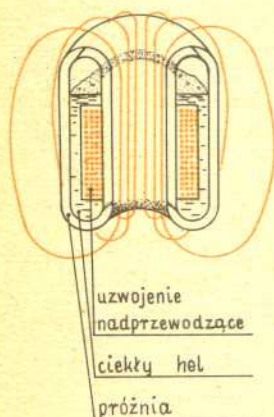
Dr Zbigniew PŁOCHOCKI



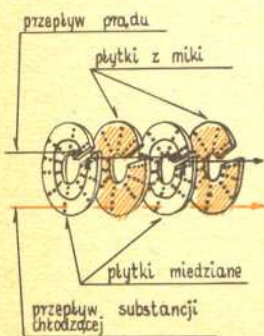
Rys. 1. Obraz pola magnetycznego nadprzewodnikowego wytwarzającego solenoidu (zwojnicy)



Rys. 2. Widok elektromagnesu nadprzewodnikowego wytwarzającego pole w kąpieli helowej



Rys. 3. Idea budowy elektromagnesu nadprzewodnikowego wytwarzającego pole w obszarze o temperaturze pokojowej



Rys. 4. Zasada budowy cewki typu Bittera. Rysunek pokazuje rozcięcie i rozsunięte dwa zwoje cewki

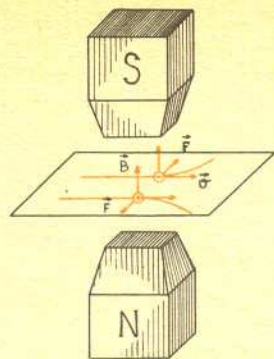
Od dawna fizyka bada własności materiałów i budowę materii obserwując między innymi różne efekty oddziaływania ciał i cząstek z polem magnetycznym. Do tych celów musi dysponować przede wszystkim źródłami pola magnetycznego o kontrolowanej indukcji. Pole magnetyczne Ziemi jest do tych celów za słabe — jego indukcja waha się od około $17 \mu\text{T}$ do niespełna $60 \mu\text{T}$ (mikrotesla to jedna milionowa tesla, a z kolei tesla to jednostka miary indukcji magnetycznej w układzie SI, równa 10 tysiącom gaussów). Także niezadowalające są magnesy trwałe, bo choć są one źródłami pola silniejszego niż ziemskie pole magnetyczne, to jednak praktycznie nie można ich regulować; stosowane są tylko sporadycznie. Wytwarzanie silniejszych pól w sposób kontrolowany wykorzystuje magnetyczny efekt prądu elektrycznego. Polega na tym, że wokół przewodnika z prądem pojawia się pole magnetyczne o liniach obejmujących przewodnik i indukcji proporcjonalnej (w danym punkcie przestrzeni) do natężenia prądu w przewodniku. Zwojnice z prądem wytwarzają więc pole magnetyczne (rys. 1) proporcjonalne do natężenia prądu płynącego przez uzwojenia i do liczby zwojów na jednostkę długości solenoidu.

Efekt można wzmocnić stosując rdzeń z miękkiego materiału ferromagnetycznego, najczęściej z żelaza. Materiał taki silnie magnesuje się w zewnętrznym polu magnetycznym, a po usunięciu pola rozmagnesowuje się praktycznie całkowicie (w przeciwieństwie do tzw. twardych materiałów ferromagnetycznych, które zachowują częściowo stan namagnesowania po usunięciu pola). Wypadkowe pole — zwojnicy i namagnesowanego rdzenia — jest dzięki temu silniejsze od pola samej zwojnicy. W praktyce rdzeń w postaci pierścienia lub ramy ze szczeliną owija się wielokrotnie przewodem; (dodatkowo stosuje się specjalne nabiegunniki, które kształtują odpowiednio pole w szczelinie). Doświadczenia przeprowadza się właśnie w obszarze między nabiegunnikami elektromagnesu.

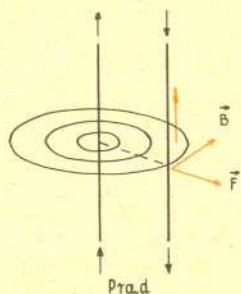
Elektromagnesy z rdzeniem ferromagnetycznym pozwalają bez trudu osiągać pole magnetyczne o indukcji do kilku tesli (kilkadziesiąt tysięcy gaussów). W zakresie silniejszych pól rdzenie ferromagnetyczne przestają spełniać swoją rolę. Przyczyną tego jest istnienie maksymalnego namagnesowania ferromagnetyków, zwanego namagnesowaniem nasycenia. Rdzeń niewiele już wtedy pomaga, a znacznie komplikuje budowę elektromagnesu. Dalsze zwiększenie indukcji wymaga więc przepuszczenia przez uzwojenia silniejszego prądu elektrycznego.

I tu pojawia się pierwsza trudność. Im bowiem silniejszy prąd, tym silniej grzeją się przewody. Trzeba je chłodzić. Wyjątek stanowią elektromagnesy o uzwojeniach wykonanych z nadprzewodników, czyli metali, które oziębione do kilku (niektóre kilkunastu, a ostatnio nawet do 23) kelwinów powyżej zera bezwzględnego przez zanurzenie ich w ciekłym helu — który pod normalnym ciśnieniem wrze w temperaturze nieco ponad 4 K, a pewne ostatnio odkryte nadprzewodniki w ciekłym wodorze, który normalnie wrze w temperaturze ok. 20 K — cechują się oporem elektrycznym dokładnie równym zeru. W nadprzewodniku nie wydzielają się więc ciepło (przy przepływie prądu). Elektromagnesy nadprzewodnikowe (rys. 2) pozwalają bez specjalnych trudności (rys. 3) wytwarzać pole o indukcji nieco ponad 10 T (sto kilogausów). Na drodze do uzyskania lepszych efektów stoją dwie przeszkody. Stan nadprzewodnictwa niszczy nie tylko podwyższona temperatura (ponad określony poziom, inny dla różnych nadprzewodników), ale też: 1° dostatecznie silny prąd i 2° dostatecznie silne pole magnetyczne. Nadprzewodnik staje się wtedy zwykłym przewodnikiem, w którym przepływowi prądu towarzyszy wydzielanie się ciepła.

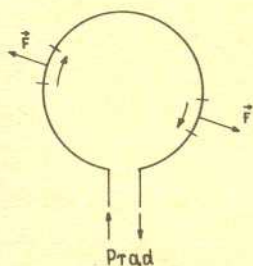
Być może w przyszłości zostaną odkryte materiały nadprzewodnikowe, z których będzie można wykonać uzwojenia elektromagnesów wytwarzających silniejsze pole magnetyczne. Do tego jednak czasu trzeba będzie stosować w tych celach zwykłe przewody i chłodzić je. Najprostszym wyjściem z sytuacji jest zastąpienie drutów po prostu rurkami miedzianymi, przez które podczas pracy elektromagnesu przepływa woda. Rurki miedziane chłodzone wodą nie stwarzają jednak zbyt wielkich perspektyw. Konieczna jest szczególna geometria cewki, tak by miała ona mały opór elektryczny i dopuszcziała intensywne chłodzenie. Najpopularniejszym rozwiązaniem stosowanym obecnie są tzw. cewki typu Bittera (rys. 4), które mają mniejszy opór elektryczny niż cewki nawijane z drutu (o tej samej objętości). Za ich pomocą wytwarza się pola o indukcji nawet do 20 tesli (200 kilogausów). Udoskonalone cewki Bittera pozwalają osiągnąć nawet 25 tesli.



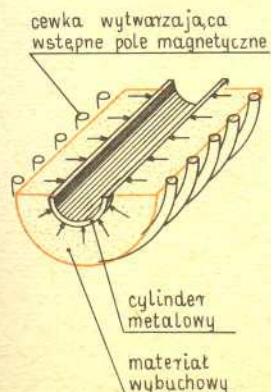
Rys. 6. Pole magnetyczne o indukcji B działa na cząstkę poruszającą się z prędkością v siłą Lorentza F , prostopadłą do wektora prędkości, i do wektora indukcji magnetycznej. Wartość tej siły jest proporcjonalna do wartości obydwu poprzednich wektorów, a zwrot zależy od znaku ładunku cząstki



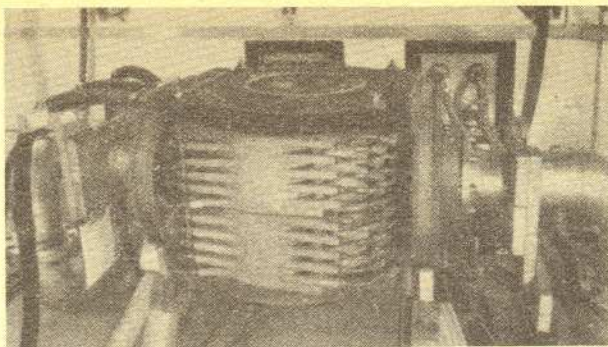
Rys. 7. Odpychanie prawego przewodu przez lewy to wynik działania siły Lorentza F na elektrony poruszające się w pewnym przewodzie (pionowa strzałka)



Rys. 8. Na każdy element obwodu kołowego z prądem działa skierowana od środka obwodu siła magnetodynamiczna



Rys. 9. Idea budowy głowicy elektromagnesu implozyjnego. Strzałki pokazują charakter implozji



Rys. 5. Ogólny widok elektromagnesu Montgomery'ego

I to wydaje się kresem tej metody. Jaka jest skala problemu, niech świadczą liczby. Najsilniejszy obecnie elektromagnes wytwarzający stałe pole magnetyczne (rys. 5), zbudowany przez D. B. Montgomery'ego w National Magnet Laboratory w USA, to zespół cewek miedzianych o masie ponad 4 tony, o średnicy zewnętrznej 90 cm i wewnętrznej niespełna 5 cm. W czasie pracy pobiera on moc 16 megawatów, a chłodzącą go wodę przepuszcza się przez cewki z szybkością 7,5 tysiąca litrów na minutę!

Trudności z szybkim chłodzeniem cewek można jednak ominąć, gdy przez cewki będzie się przepuszczać prąd wprawdzie niezwykle silny, ale krótkotrwały. W praktyce wykorzystuje się do tego dużą baterię kondensatorów, naładowaną do napięcia rzędu kilku lub nawet kilkunastu kilowoltów. W czasie rozładowania baterii przez zwarcie jej cewką elektromagnesu płynie przez cewkę prąd o natężeniu dochodzącym do setek kiloamperów. W ciągu ułamków milisekundy cewka wytwarza wtedy pole indukcji aż do 70 tesli (0,7 megagausa). Cewkom nie grozi stopienie się wskutek wydzielającego się z nich ciepła, gdyż w sumie wydziela się go stosunkowo niewiele.

Jednakże i elektromagnesy impulsowe stają w końcu przed naturalną barierą, jaką stanowią potężne siły magnetodynamiczne, rozsadzające cewki. Dwa równoległe przewody prostoliniowe, przez które płynie prąd w przeciwnych kierunkach, odpychają się. Przyczyną tego odpychania jest siła Lorentza (rys. 6), jaką pole magnetyczne jednego przewodu działa na elektrony płynące drugim przewodem (rys. 7). Siła magnetodynamiczna działa też na poszczególne odcinki kołowego przewodu z prądem (rys. 8). Obwód kołowy jest więc jakby rozsadzany od wewnątrz przez swego rodzaju ciśnienie magnetyczne. Im silniejszy prąd płynie przez cewkę, tym większe jest ciśnienie magnetyczne. Na przykład siły magnetodynamiczne działające od środka na cewkę w elektromagnesie impulsowym, wytwarzającym pole o indukcji 50 tesli, są równoważne ciśnieniu wynoszącemu aż około miliarda paskali, czyli niutonów na metr kwadratowy (tzn. ok. 10 tysięcy atmosfer). Ciśnienie magnetyczne wzrasta proporcjonalnie do kwadratu indukcji magnetycznej pola. Kiedy indukcja osiąga wartość ok. 75 tesli, ciśnienie magnetyczne przekracza już wytrzymałość mechaniczną cewki. Materiał zaczyna odkształcać się plastycznie. Przekroczenie tej granicy stało się możliwe dzięki opracowaniu techniki implozyjnej wytwarzania pola magnetycznego. Idea tej metody jest, w uproszczeniu, następująca: rurę cylindryczną wielkości mniej więcej półlitrowej butelki okłada się materiałem wybuchowym (rys. 9), całość owija się cewką z drutu. Przez cewkę przepuszcza się impulsowy prąd, który wewnątrz cewki wytwarza pole magnetyczne o indukcji kilku tesli (kilkadziesiąt kilogausów). Równocześnie odpala się materiał wybuchowy. Powstaje silna implozja, czyli zbieżna ku osi urządzenia fala uderzeniowa biegnąca z szybkością kilku kilometrów na sekundę; fala ta w ciągu kilkunastu mikrosekund zgniata cylinder wraz z „zawartym w nim” polem magnetycznym, wytworzonym przez cewkę. Cylinder metalowy przypomina bardziej sito niż szczelne naczynie na pole magnetyczne. Jednakże przy bardzo szybkim zgniataciu tego „sita” pole nie zdąży całkowicie zeń wypłynąć. Dzięki takiemu „sprasowaniu” pola jego indukcja osiąga wartość setek tesli (kilku megagausów)! W specjalnych elektromagnesach implozyjnych, pracujących w niewielu jeszcze laboratoriach na świecie, uzyskać można pole o indukcji nawet 2000 tesli! W Polsce elektromagnesy implozyjne zbudowano w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Oczywiście, metoda implozji jest skomplikowana i wymaga specjalnych warunków laboratoryjnych. Jest więc sens stosować ją tylko wówczas, gdy supersilne pole magnetyczne jest rzeczywiście niezbędne. A taka właśnie sytuacja powstaje w badaniach mających na celu przeprowadzenie kontrolowanej reakcji termojądrowej. Panuje obecnie pogląd, że brak elektromagnesów wytwarzających pole o indukcji co najmniej kilkuset tesli może znacznie opóźnić, a nawet wręcz uniemożliwić przeprowadzenie reakcji termojądrowej w sposób kontrolowany.