

Wstęp

Zjawiska magnetyczne są znane od co najmniej trzech tysięcy lat i przyciągają uwagę ze względu na obserwowane oddziaływanie na odległość jak i możliwości zastosowań. Obecnie wiadomo, że istotą magnetyzmu są oddziaływania pomiędzy poruszającymi się ładunkami elektrycznymi, a do opisu stosuje się pojęcia momentu magnetycznego i pola magnetycznego.

Magnetyzm bierze swoją nazwę od greckiego miasta Magnezja w Azji Mniejszej, obecnie w południowo-zachodniej Turcji, gdzie występowały złoża magnetytu. Już w starożytności kilka ówczesnych miast o nazwie Magnezja przypisywało sobie zaszczyt odkrycia magnezu. Prawdopodobnie złoża rudy znajdowały się w Magnezji nad rzeką Meander koło Efezu (turecki Selczuk) lub w Magnezji nad rzeką Sipylos koło Smyrny (turecki Izmir). Najstarsze wzmianki pochodzą od Talesa z pobliskiego Miletu (ok. 620–540 p.n.e.) i od Arystotelesa (384–322 p.n.e.). Do pierwszych praktycznych zastosowań należały kompasy znane dwunastowiecznym Europejczykom, a Chińczykom być może wcześniej. Kompas wyposażony w celownik do określania azymutu nazywa się busolą. Nazwa busoli pochodzi od łacińskiej nazwy buku (*buxus*), ponieważ średniowieczne kompasy morskie miały obudowę z odpornego drewna bukowego. Rozprzestrzenienie się kompasu przyczyniło się do wielkich odkryć geograficznych dokonanych od XV wieku. Aż do XVII wieku panowało przekonanie, że magnesy trwałe przestają przyciągać żelazo, jeżeli zetkną się z czosnkiem lub zbliżą do diamentu. I dlatego sterników okrętowych narażonych na szkorbut obowiązywał zakaz spożywania czosnku i cebuli!

Rozkwit magnetyzmu rozpoczął się w przełomowym roku 1820, gdy w lipcu Hans Christian Oersted w Kopenhadze zaobserwował oddziaływanie prądu elektrycznego na igłę magnetyczną, a we wrześniu André Marie Ampère w Paryżu wykazał równoważność pól magnetycznych wytwarzanych przez magnesy i obwody prądu elektrycznego i tym samym zapoczątkował elektromagnetyzm. W roku 1825 William Sturgeon zbudował pierwszy elektromagnes, który 4 lata później został ulepszony przez Josepha Henry'ego stosującego po raz pierwszy izolowany bawełną drut metalowy.

W romantycznym XIX wieku oddziaływania na odległość właściwe dla magnetyzmu intrygowały ówczesnie żyjących, pewnie podobnie jak w XX wieku słynny wzór Einsteina $E = mc^2$ i pewnie na podobnym poziomie rozumienia. Śladem tego są choćby „Śluby panieńskie, czyli magnetyzm serc” Aleksandra Fredry (rok 1833). W sferze uczuć oddziaływania na odległość chyba nie straciły aktualności. Dwanaście lat wcześniej bardzo aktualne magnetyczne wątki znalazły się w wierszu Adama Mickiewicza:

Toasty

(pewnego chemika na cześć istot promienistych)

Co by było śród zakresu,
Na który ludzie rzuceni,
Bez światła, ciepła, magnesu
I elektrycznych promieni?

Co by było? zgadnąć łatwo:
Ciemno, zimno, chaos czyste.
Witaj więc, słoneczna dziatwo,
WIWAT światło promieniste!

Lecz cóż po światła iskierce,
Gdy wszystko dokoła skrzepło?
Zimny świat i zimne serce.
Ciepła trzeba. WIWAT ciepło!

Pełnych światła i zapachu
Często silny wiatr rozniesie.
By ciało zbliżyć ku ciału,
Jest magnes. WIWAT magnesie!

Tak gdy zrośniem w okrąg wielki
Przez magnesowaną styczość,
Wówczas z lejdejskiej butelki
Palniem: WIWAT elektryczność!

Przynajmniej ogólne poznanie magnetyzmu jest ważne, skoro żyjemy w polu magnetycznym Ziemi, które choć stosunkowo słabe, skutecznie chroni nas przed niszczącym życie promieniowaniem kosmicznym. Słońce emituje strumień naładowanych cząstek (protonów i elektronów) tworzących wiatr słoneczny docierający w pobliże Ziemi. Dzięki działaniu siły Lorentza ziemskie pole magnetyczne odchyła tory tych cząstek. Cząstki schwyte (pułapowane) w tzw. pasach van Allena (odkrytych w roku 1958 za pomocą licznika Geigera–Müllera umieszczonego w satelicie) poruszają

się po liniach spiralnych wzdłuż linii pola magnetycznego łączących bieguny magnetyczne Ziemi. W wyniku rozbłysków Słońca wysokoenergetyczny wiatr słoneczny częściowo dociera do atmosfery ziemskiej. Zderzenia z cząstkami powietrza wywołują zorze polarne nad słabo zaludnionymi obszarami podbiegunowymi.

Położenie biegunów magnetycznych Ziemi jest zmienne i oddalają się one nawet na 2 tys. km od bieguna geograficznego. Ostatnie odwrócenie magnetycznych biegunów Ziemi nastąpiło przed 780 tysiącami lat.

Naturalne pola magnetyczne występują w szerokim zakresie przekraczającym 20 rzędów wielkości (tabl. 1) od 10^{-13} tesli w przestrzeni międzygalaktycznej aż do 10^{11} tesli w gwiazdach magnetycznych. Współczesne możliwości techniczne pozwalają wytwarzać krótkotrwałe (impulsowe) pola magnetyczne o indukcji magnetycznej **B** bliskiej 3000 tesli.

Należy pamiętać o konieczności zachowania ostrożności względem urządzeń magnetycznych, np. przez osoby używające rozrusznika serca. Wpływ silnych pól magnetycznych, pól wysokiej częstotliwości i pól impulsowych na organizm człowieka został poznany zaledwie fragmentarycznie. Z tego powodu ogólnym przewencyjnym zaleceniem jest ograniczenie ekspozycji organizmu na działanie silnych pól elektromagnetycznych, szczególnie wysokiej częstotliwości.

Magnetyzm jest zjawiskiem kolektywnym związanym z wzajemnym oddziaływaniem ogromnej liczby atomów i dlatego właściwości magnetyczne tak dużych zespołów/struktur są wyraźnie różne od właściwości magnetycznych pojedynczych atomów lub cząsteczek. Szerokie widmo badań magnetycznych rozciąga się od atomów aż do obiektów kosmicznych. W miarę rozwoju metod eksperymentalnych i koncepcji teoretycznych coraz więcej uwagi poświęca się badaniom struktur magnetycznych o malejącej liczbie atomów i malejącej wymiarowości (układy dwu-, jedno- i zerowymiarowe). Magnetochemia koncentruje się na badaniu relacji między budową chemiczną a właściwościami magnetycznymi substancji o różnym stopniu uporządkowania strukturalnego. Dostarcza cennych informacji o strukturze elektronowej atomów, cząsteczek i ciał stałych oraz o oddziaływaniach międzyatomowych.

Poznanie i wyjaśnienie zjawisk magnetycznych jest podstawą rozwoju technologii różnych klas magnetyków o właściwościach fizykochemicznych wymaganych do zastosowań praktycznych w technice (technologii, elektrotechnice, elektronice...) i medycynie. Obserwowana często silna współzależność zjawisk i właściwości magnetycznych z jednej strony oraz właściwości niemagnetycznych (np. elektrycznych, optycznych, mechanicznych) z drugiej pozwala stosować metody magnetyczne jako sondę do badania mikrostruktury materii. Doświadczalne metody badań umożliwiają charakteryzowanie różnych nowych klas materiałów magnetycznych wykorzystywanych m.in. w nanourządzeniach i w elektronice spinowej (spintronice).

Szeroki i stale rosnący wachlarz zastosowań metod i urządzeń magnetycznych rozciąga się od przedmiotów codziennego użytku aż do magnetycznych nośników informacji i tzw. wysokiej technologii (np. elektronika spinowa). Wartość produkowanych materiałów i nośników magnetycznych przewyższa obecnie wartość materiałów i elementów półprzewodnikowych stosowanych głównie w elektronice. Dlatego znaczenia nabierają społeczne, kulturowe, gospodarcze i ekonomiczne aspekty związane z technologiami magnetycznymi.

Tablica 1.1. Naturalne i sztuczne źródła pola magnetycznego

Naturalne pola magnetyczne	Indukcja magnetyczna (tesla)	Sztuczne pola magnetyczne
Gwiazdy magnetyczne	10^{11}	Wybuchowe zgęszczanie strumienia magnetycznego
Gwiazdy neutronowe	10^8	
Białe karły	10^4	
	2800	
Pole nadsubtelne Ho (4 K)	737	Elektromagnetyczne zgęszczanie strumienia magnetycznego
	600	
	300	
	100,7	
Pole nadsubtelne Fe (4 K)	45	Magnesy impulsowe (marzec 2012)
	33,7	Magnesy hybrydowe
	33	Magnesy Bittera
	20	
	2	
	1	
Ruda magnetytu	0,4	Trwałe magnesy: 1,6 T — Nd-Fe-B; 1,1 T — Fe-Pt
Pole magnetyczne plam na Słońcu	0,25	
	10^{-2}	Na powierzchni magnezu sztabkowego
Pole magnetyczne Słońca	10^{-4}	Wokół przewodów elektrycznych
Pole magnetyczne Ziemi	10^{-5}	
Przestrzeń międzyplanetarna	10^{-9}	W obszarze ekranowanym magnetycznie
Przestrzeń międzygwiazdowa	10^{-10}	
Serce ludzkie	10^{-12}	
Przestrzeń międzygalaktyczna	10^{-13}	
	10^{-14}	
	10^{-15}	
Mózg ludzki	10^{-15}	

Skrypt powstawał w ciągu kilku lat na bazie wykładów i zajęć laboratoryjnych, jako praktyczny przewodnik dla studentów wykonujących ćwiczenia laboratoryjne z magnetochemii, którzy zmuszeni są do korzystania z rozszaniach źródeł informacji w czasach, gdy nauczanie staje fragmentaryczne i chaotyczne. Celem skryptu jest zaznajomienie Czytelnika z podstawowymi współczesnymi metodami makroskopowego charakteryzowania magnetyków. Jest przeznaczony dla szerokiego grona studentów i doktorantów (choć nie tylko) chemii, fizyki, inżynierii materiałowej, elektroniki,

elektrotechniki, informatyki uniwersytetów i politechnik, rozpoczynających poznawanie podstaw magnetochemii lub ogólniej magnetyzmu. Może być także materiałem pomocniczym dla studentów przygotowujących prace licencjackie i magisterskie dotyczące magnetyzmu i zastosowania spektroskopii rezonansu magnetycznego. Może też inspirować do przygotowania pokazów wykładowych i ćwiczeń laboratoryjnych dla studentów i uczniów liceum.

Skrypt stosuje do zjawisk i materiałów magnetycznych opisowe podejście raczej od strony eksperymentalnej niż teoretycznej. Z ogromnie szerokiego zakresu wybrane zostały (z niemałym trudem) tylko najbardziej podstawowe zagadnienia istotne dla zrozumienia i opanowania podstawowych metod doświadczalnych i bezpośrednio związane z interpretacją wyników. Nie próbuję nawet ukrywać, że wybór zagadnień jest raczej „subiektywny”, bo wynika z własnych doświadczeń i upodobań naukowych i dydaktycznych. Pominęto między innymi magnetyzm pasmowy, zjawiska magnetosprężyste, magnetyzm jądrowy, biologiczne aspekty magnetyzmu oraz magnetyczne zjawiska rezonansowe przedstawione w dostępnej literaturze. Ograniczony zakres wybranego materiału powinien zostać doceniony przynajmniej przez studentów, którzy są zmuszeni do pracy zarobkowej podczas studiów.

Stosowany w niniejszym opracowaniu aparat matematyczny jest ograniczony do niezbędnego minimum, tym bardziej, że do zrozumienia podstaw magnetyzmu wystarczy znajomość matematyki na poziomie pierwszych lat studiów wyższych. Ścisłe wyprowadzenia podstawowych zależności magnetycznych można znaleźć w dostępnej literaturze. Spis literatury kieruje bardziej dociekliwych Czytelników do podstawowych podręczników odnoszących się nie tylko do klasycznych zagadnień, ale także pokazujących aktualne kierunki badań.

Metody magnetyczne oferują możliwość wykonania wartościowej charakterystyki nowych materiałów magnetycznych, takich jak: m.in. ferromagnetyki miękkie i twarde, amorficzne, nanokrystaliczne, polikrystaliczne, manganity, metale, półprzewodniki i nadprzewodniki wysokotemperaturowe. Przedstawienie metod pomiarowych w niniejszym skrypcie koncentruje się raczej na ogólnych podstawach niż na szczegółowych rozwiązaniach.

Tekst nie jest też wolny od koniecznych powtórzeń. Wszak *repetitio est mater studiorum*.

Liczne studenckie pytania zmuszały mnie do ponownego przemyślenia zagadnień, które wcześniej zdawały się być zupełnie oczywiste. I czasem sprawiały przyjemność z dokonania małego odkrycia. Jestem za to wdzięczny studentom i doktorantom. Jeżeli to skrótkowe opracowanie pozostawi niedosyt lub zachęci do dalszych poszukiwań, spełni swoją rolę.

Pierwsza część opracowania (rozdziały 1–10) wprowadza w podstawowe zjawiska w materiałach magnetycznych, które w wykładach kursowych są zwykle wykładane w ograniczonym zakresie. W następnych rozdziałach (11–17) przedstawiono praktyczną analizę prostszych zagadnień szczegółowych, spotykanych w praktyce laboratoryjnej. W kolejnych rozdziałach (18–20) opisano metody wytwarzania pól magnetycznych, podstawowe makroskopowe metody pomiarowe i przykładowe zastosowania analizy magnetycznej. „Kamienie milowe magnetyzmu” (rozdział 21) po-

przez wybrane osiągnięcia pokazują historyczny rozwój magnetyzmu. W rozdziałach 22 i 23 podano wybraną podstawową literaturę i użyteczne stałe fizyczne. W literaturze magnetycznej panuje „pokojowe współistnienie” oficjalnego układu jednostek SI oraz tradycyjnego układu CGS. Taką dwutorowość jednostek stosuje się też w dalszym tekście, m.in. żeby ułatwić korzystanie ze starszej literatury magnetycznej. Relacje pomiędzy jednostkami obu układów są podane w rozdziale 24.

Pragnę serdecznie podziękować:

Profesorom Markowi Kisielewskiemu (Uniwersytet w Białymstoku), Andrzejowi Maziewskiemu (Uniwersytet w Białymstoku), Tomaszowi Stobieckiemu (AGH), Tadeuszowi Szumiacie (Politechnika Radomska), Andrzejowi Wiśniewskiemu (IF PAN) za przejrzanie rękopisu i cenne krytyczne uwagi.

Wydawnictwu UW za przygotowanie rysunków i „przetworzenie” manuskryptu.

Mojej Żonie Krystynie za wyrozumiałość, gdy „podkradałem czas” na pisanie.

Errare humanum est. Informacje o dostrzeżonych błędach proszę przysyłać do Wydawnictw UW.