

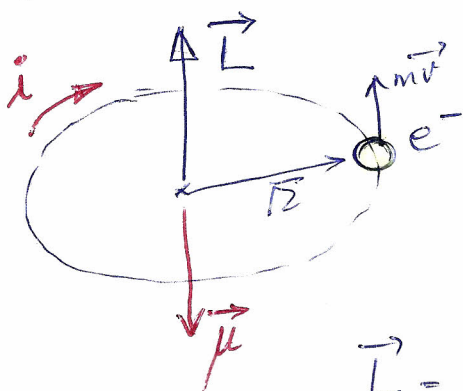
MATERIALE MAGNETICE

Când am analizat în cursul anterior modul în care curenții electrice produc câmp magnetic am presupus că conductorii sunt în vid. În practică bobinajele din transformatoare, motoare, generatoare, electromagreti întotdeauna folosesc miezuri de fier pentru a crește valoarea câmpului magnetic produs și de a-l localiza în regiunea dorită.

Pe de altă parte magnetii permanenți, buporturile de înregistrare magnetică (benzi, hard-disk-uri) depind direct de proprietățile magnetice ale materialelor. Materialele magnetice au o importanță deosebită în tehnică și tehnologiile avansate de la senzori până la dispozitive de stocare a informației (copete de lectură în hard-disk-uri, senzori ABS, hard-disk-uri, ...). În acest capitol se propune să descriem câteva aspecte fundamentale privind proprietățile materialelor magnetice. Mai întâi vom pune bazele originii atomice și proprietăților magnetice. Apoi, vom descrie câteva clase particulare de materiale și comportamente magnetice ale materialelor: diamagnetismul, paramagnetismul, feromagnetismul, antiferomagnetismul. Se va ilustra și posibilitatea de control a proprietăților magnetice ale unui material prin dimensionalitate.

Magnetism atomic. Magnetronul Bohr.

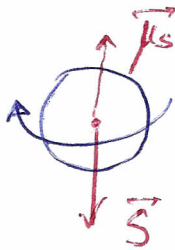
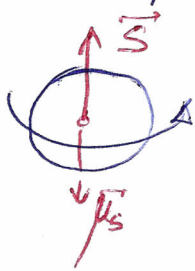
Atomul este constituit din nucleu și înveliș electronic în care electronii descriu miscări orbitale în jurul nucleului.



Miscarea orbitală a electronului poate fi asimilată cu o buclă de curent i care, după cum am văzut va produce un câmp magnetic.

$$\vec{L} = r \times m\vec{v} = \text{moment cinetic orbital.}$$

De asemenea, electronii pot avea de asemenea și un moment cinetic de SPIN, orientat invers momentului magnetic dipolar de spin \vec{S}



2 stări de spin $\left\{ \begin{array}{l} \text{SPIN up } \uparrow \\ \text{SPIN down } \downarrow \end{array} \right.$

Pentru o buclă de curent am definit momentul magnetic dipolar: $\mu = IA$; $A = \text{aria sucliei}$.

Pt. un electron pe o orbită circulară:

curentul asociat: $I = \frac{e}{T} = \frac{e}{\frac{2\pi r}{v}} = \frac{ev}{2\pi r}$ \Rightarrow

\downarrow
perioada orbitala

$A = \pi r^2$

$$\Rightarrow \mu = \frac{ev}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{evr}{2}$$

Dacă folosim definiția momentului cinetic orbital:

$$L = r m v \Rightarrow v r = \frac{L}{m}$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{\mu}_L = \frac{e}{2m} \vec{L}}$$

O să vedem la mecanica cuantică faptul că momentul cinetic orbital al electronului este întotdeauna un multiplu întreg de $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ unde $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ este o

constantă fundamentală numită CONSTANTA LUI PLANCK

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ reprezintă unitatea elementară de moment cinetic la fel cum e reprezintă sarcina electrică elementară

$$\Leftrightarrow L = n\hbar = n \frac{h}{2\pi}$$

-3-

$$\Rightarrow \boxed{\mu_L = \frac{e\hbar}{2m} n = n\mu_B} \quad n=1 \Rightarrow \boxed{\mu_L = \mu_B = \frac{e\hbar}{2m}}$$

$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} =$ magnetonul Bohr (Procopiu)

$$\mu_B = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2 \quad (\text{J/T})$$

momentul magnetic al electronului

Obs:

$$\boxed{\vec{\mu}_L = \frac{e}{2m} \vec{L}}$$

$e \leftarrow -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \Rightarrow \vec{L}$ și $\vec{\mu}_L$ sunt antiparaleli ca și vectori

În mod analog, pt momentul cinetic de spin \vec{S} se poate scrie

$$\boxed{\vec{\mu}_S = \frac{e}{2m} \vec{S}}$$

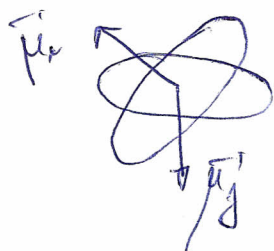
$$; \quad \mu_S = \frac{e\hbar}{2m} m_S = \underline{m_S \mu_B}$$

Relația de wanțificare a momentului cinetic de spin, într-un câmp magnetic extern $\vec{B} = (0, 0, B_z)$

este:

$S_z = m_S \hbar$	$m_S = +\frac{1}{2}$	SPIN UP \uparrow
	$m_S = -\frac{1}{2}$	SPIN DOWN \downarrow

Pentru atomii cu N electroni fiecare mișcându-se pe proprie orbită cu orientare aleatorie, suma vectorială



$$\vec{\mu} = \sum_i \vec{\mu}_i = 0$$

a momentelor magnetice orbitale va fi zero

Momentul magnetic atomic în acest caz poate proveni doar de la suma momentelor magnetice de spin ale electronilor. Intuitiv μ_s poate lua doar două valori UP (\uparrow) și DOWN (\downarrow).

\Rightarrow dacă atomul are un număr par de electroni

$$\uparrow = \downarrow \Rightarrow \vec{\mu}_s = 0$$

un număr impar de electroni $\Rightarrow \vec{\mu}_s \neq 0$

Plecând de la aceste considerații atomice, putem să vedem că un atom poate avea sau nu un moment magnetic individual. Când atomii fac parte dintr-un material, la rândul lor momentele magnetice atomice pot interacționa între ele și conduce la un anumit tip de proprietăți magnetice ale materialului.

1) PARAMAGNETISMUL

Într-un atom suma vectorială a momentelor magnetice orbitale și de spin este adesea zero. Totuși, în unele cazuri (ex. există electroni nepereche), momentul magnetic resultant este diferit de zero și are o valoare de ordinul de mărime al magnetonului Bohr μ_B . Când un material constituit din astfel de atomi este plasat într-un câmp magnetic extern \vec{B}_0 , acest câmp va exercita din cuplu $\vec{\tau}$ asupra fiecărui moment magnetic individual

$$\vec{\tau}_i = \vec{\mu}_i \times \vec{B}_0$$

astfel încât să încerce să alinieze momentul magnetic $\vec{\mu}_i$ pe direcția câmpului \vec{B}_0 . Această configurație paralelă corespunde alinierii buclelor de curent astfel încât câmpul magnetic creat să se adauge câmpului extern \vec{B}_0 .

Câmpul magnetic suplimentar \vec{B} produs de către curenții microscopici este proportional cu momentul magnetic total pe unitatea de volum V a materialului, mărime fizică numită și magnetizare \vec{M} a materialului

$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}_{\text{total}}}{V} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{V}$$

Câmpul magnetic suplimentar va fi $\vec{B} = \mu_0 \vec{M}$

Când un astfel de material se află în jurul unui conductor care transportă curent electric, câmpul magnetic total în acest material va fi:

$$\vec{B}' = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

↑
câmpul cauzat de către curentul din conductor.

Materialele care prezintă o astfel de proprietate se numesc materiale PARAMAGNETICE. Ca și rezultat al orientării paralele cu câmpul extern \vec{B}_0 a momentelor magnetice individuale $\vec{\mu}_i$ dintr-un material paramagnetic, câmpul magnetic în orice punct din acest material va fi mai mare decât B_0 printr-un factor μ_r numit PERMEABILITATE RELATIVĂ a materialului

- ① μ_r este o constantă de material;
tipic: $\mu_r \in 1,00001 - 1,003$
- ② Toate ecuațiile care descriu câmpul magnetic produs de o sursă (T. Ampère, Biot-Savart...) pot fi adaptate în cazul în care conductorul purtător de curent este înconjurat de un material cu μ_r înlocuind μ_0 cu $\mu_{\text{total}} = \mu$
permeabilitatea magnetică a materialului

Susceptibilitatea magnetică

-6-

$$\boxed{\chi_m = \mu_r - 1}$$

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} = \frac{B_0 + \mu_0 M}{B_0} = 1 + \frac{\mu_0 M}{B_0}$$

$$\chi_m = \mu_r - 1 = \frac{\mu_0 M}{B_0}$$

$$\boxed{\chi_m = \frac{\mu_0 M}{B_0}}$$

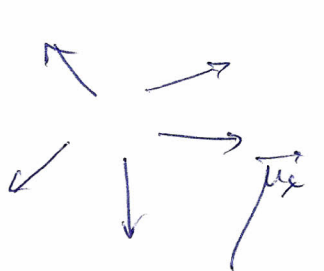
efectul = magnetizarea

cauza = câmpul aplicat

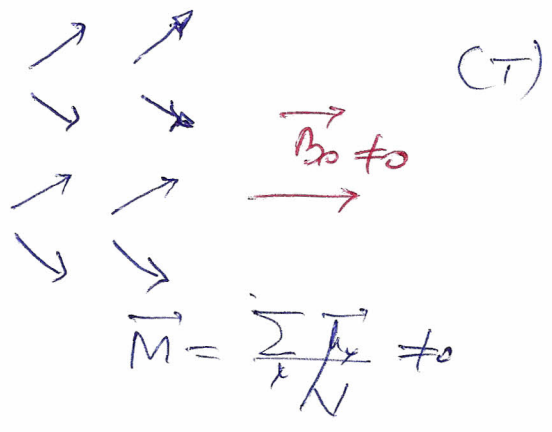
susceptibilitatea magnetică descrie răspunsul materialului (magnetizarea) la aplicarea unui câmp magnetic B_0 (cauza).

Analiză fenomenologică

Intr-o situație în care nu avem câmp extern aplicat, într-un material paramagnetic $\sum \vec{\mu}_x = 0$ datorită ~~la~~ temperatură T finită dezordinii termice.


$$\Rightarrow \vec{M} = \sum_x \vec{\mu}_x = 0$$

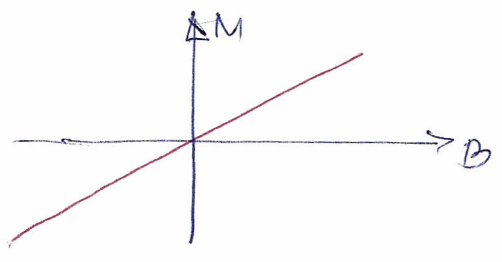
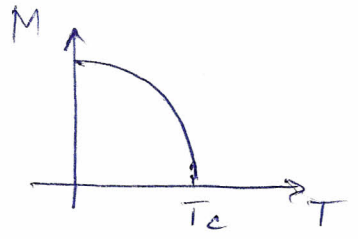
Intr-un câmp magnetic extern \vec{B}_0 care tinde să alinieze momentele pe direcția acestuia (pt. a minimiza energia potențială de interacțiune), energia termică va încerca în permanență să mențină dezordinea în orientarea $\vec{\mu}_x$. Din acest motiv magnetizarea \vec{M} și susceptibilitatea χ_m paramagnetică întotdeauna DESCREȘC cu creșterea temperaturii.



$$M = C \frac{B}{T}$$

Legea lui Curie temperatura absolută

Constanta Curie (constantă de material)
Pierre Curie (1859-1906)



ciclu de magnetizare $M(B)$
a unui material paramagnetic

Obz : Un material paramagnetic constituit din dipoli magnetici atomici $\vec{\mu}$ este atras de cota poli unui magnet. In majoritatea materialelor paramagnetice aceasta atractie este foarte slabă datorită dezordonării termice a momentelor magnetice atomice. Totuși, la temperaturi foarte joase, când efectele termice sunt reduse, magnetizarea crește (vezi legea Curie) și astfel forțele atractive devin încă puternice.

② DIAMAGNETISM

În unele materiale (care au electronii în număr pereche), momentul magnetic atomic total este zero în absența unui câmp extern. Când astfel de materiale vor fi plasate în câmp magnetic ele vor doborânda o magnetizare de sens opus orientării câmpului magnetic extern \vec{B}_0 . (susceptibilitatea lor χ_d va fi negativă). Acest comportament este o consecință directă a legii lui Lenz. La aplicarea unui câmp magnetic extern mișcarea orbitată a electronilor se va modifica astfel încât să se inducă un câmp magnetic rezultat care să se opună câmpului magnetic extern și să încerce să îl anuleze. (legea Faraday a inducției) astfel de materiale se numesc DIAMAGNETICE. Ele vor avea susceptibilitate negativă și permeabilitate magnetică $\mu_r < 1$

(0.99990 - 0.99999)
în cazul lichidelor și
solidelor

Obs: Comportamentul diamagnetic este analog fenomenului de polarizare electrică a dielectricilor.

Susceptibilitatea diamagnetică este aproape independentă de temperatură

Material	$\chi_m = \mu_r - 1$ (10^{-5})
Paramagnetic	
Pt	2.6
Al	2.2
Na	0.72
oxygen gaz	0.19

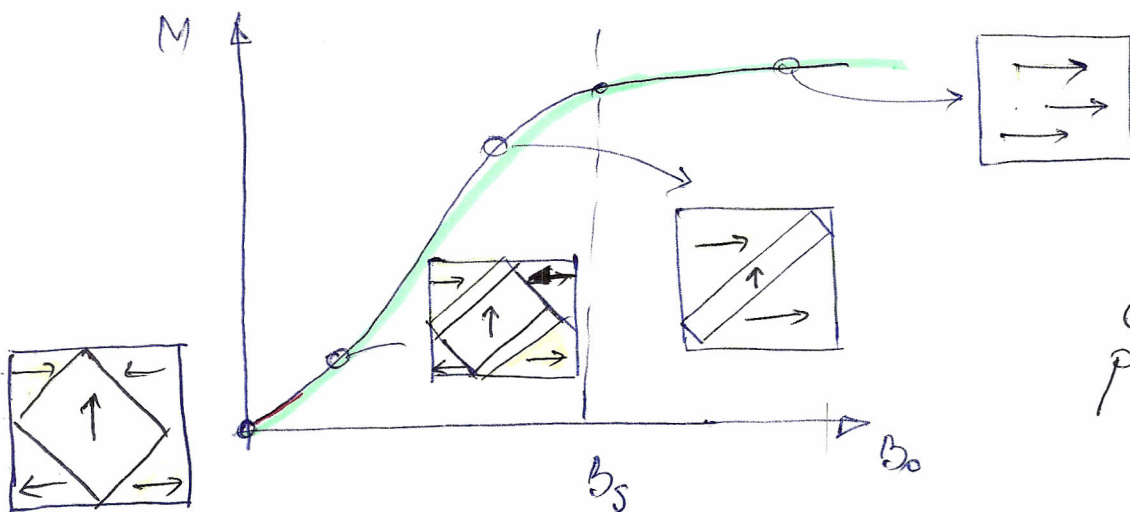
Material	χ_m (10^{-5})
Diamagnetic	
Bi	-16.6
Hg	-2.9
Ag	-2.6
(diamond) C	-2.1
NaCl	-1.4
Cu	-1

② La aplicarea unui câmp magnetic extern \vec{B}_0 domeniile tind să se orienteze pe direcția câmpului. Peretele de domeniu se deplasează astfel încât domeniile cu $\vec{B}_0 \parallel \vec{M}$ cresc, și celelalte se diminuează.

Obs: Magnetizarea totală a unui domeniu este mare (mii de μ_B)
 \Rightarrow cuplul exercitat asupra acestuia de către un câmp extern este mare. Permeabilitatea magnetică relativă μ_r este mult mai mare decât 1 (1000-100000). ~~Așa și rezultat,~~
 un astfel de corp este puternic magnetizat de către câmpul magnetic al unui magnet permanent și atras de către acesta din urmă. (Un material paramagnetic este de asemenea atras (Al) de către un magnet dar μ_r este foarte mic deci atracția va fi foarte slabă).
 \Rightarrow un magnet permanent poate atrage fierul dar nu putem obține atracția Al.

③ Odată cu creșterea câmpului magnetic extern, peste o valoare critică, toți domeniile devin aliniați cu câmpul extern. Această condiție se numește SATURATIE a magnetizării. Peste valoarea de saturație B_S , magnetizarea rămâne constantă orcat de mult or crește B_0 .

Curba de magnetizare a unui material feromagnetic

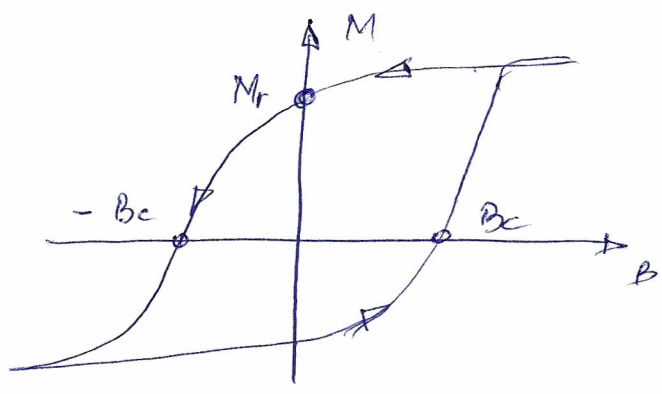


Curba de prima magnetizare

Curba de hysteresis magnetica

Pentru materialele magnetice, in general, dependenta magnetizarii M de campul aplicat B este diferita daca campul B creste sau scade. (irreversibilitate pr. evolutiei domeniilor), dupa ce materialul a fost adus la saturatie, daca aducem campul extern la zero vom patra o anumita valoare a magnetizarii numita MAGNETIZARE REMANENTA. (M_r). Acest comportament este specific MAGNETILOR PERMANENTI, care pastreaza o valoare M_r mare in camp extern nul. Pt a aduce la zero magnetizarea, va trebui aplicat in acest caz un camp extern magnetic de orientare opusa campului care a saturat materialul. Valoarea lui B care anuleaza magnetizarea se numeste camp coercitiv si este o caracteristica importanta a materialului magnetic.

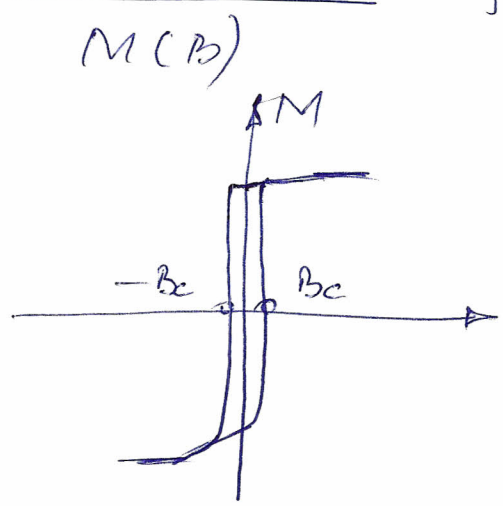
Daca reprezentam ciclul $M-B$ acesta va prezenta un caracter histeretic \Rightarrow ciclu de hysteresis magnetic



materiale magnetice dure (B_c mare)

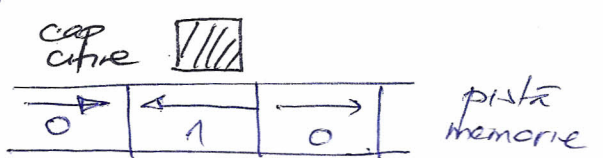
bune ca si magneti permanenti, este nevoie de campuri inverse mari pt a aduce magnetizarea la zero si a o inversa.

ex: AlNiCo, NdFeB, SmCo5
 $B_c \sim \frac{1}{\mu_0} M_s$, $M_s = \frac{B}{\mu_0} \sim 800000 \frac{A}{m}$

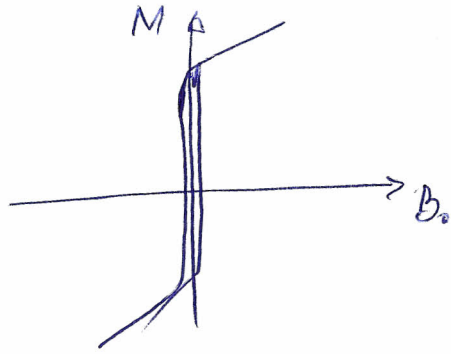


materiale magnetice moi (B_c mic)

utile cand dorim manipularea rapida a magnetizarii in campuri externe: senzori, stocarea informatiei



Materialle cu histerență magnetică $f.$ mică sau nula



utilizate în transformatoare și alte dispozitive de curent alternativ în care trebuie limitată disiparea (proporțională cu aria curții de histerență).

ex: Fier moale.

Alte aplicații ale materialelor magnetice

① efecte magnetocalorice, refrigerarea magnetică.

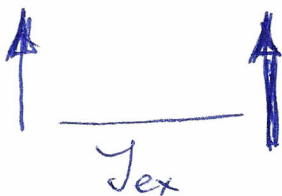
Magnetizarea și demagnetizarea unui material cu histerență magnetică implică disipare de energie \Rightarrow variația a temperaturii în timpul procesului.

② Hipertermia: particule magnetice de dimensiuni nanoscopice se folosesc în distrugerea tumorilor canceroase.

Nanoparticulele magnetice sunt atrase preferențial și fixate de către celulele canceroase. Apoi, fie acestea sunt extrase prin utilizarea de câmpuri magnetice externe fie, folosind efecte magnetocalorice, distruse prin creșterea locală a temperaturii peste valoarea critică. necesară

Interacțiunea de schimb

În materialele feromagnetice, spinurile magnetice de spin recinere tind să se alinieze paralel datorită unui efect cuantic numit interacțiune de schimb.



Aceasta afectează interacțiunea Coulombiană și este o consecință a principiului de exclusiune Pauli: energia de interacțiune a doi electroni care se resping este diminuată

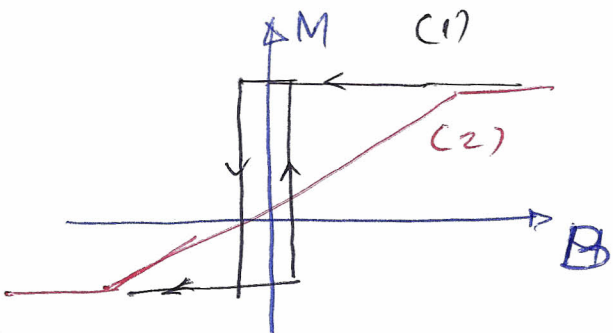
Intr-o configuratie in care momentul lor de spin este $-B$ paralel comparata cu situatia antiparalela. Diferenta in energie intre cele doua configuratii se numeste energie de schimb.

Anizotropia magnetica

Desi interactiunea de schimb mentine momentele magnetice de spin aliniate paralel, ea nu le impune insa o directie preferentiala. In absenta anizotropiei magnetice spinii intr-un material magnetic isi pot schimba orientarea in mod aleator, ca isi raspund la fluctuatiile termice, situatie in care un astfel de material devine SUPERPARAMAGNETIC.

Exista mai multe tipuri de anizotropie magnetica; cea mai comuna dintre ele fiind anizotropia magnetocristalina: in materiale care au o structura cristalina, anumite directii de orientare a magnetizarii sunt energetic favorabile (magnetizarea prefera sa se orienteze la camp zero pe aceste directii). Ele se numesc axe de usura magnetica (AUM).

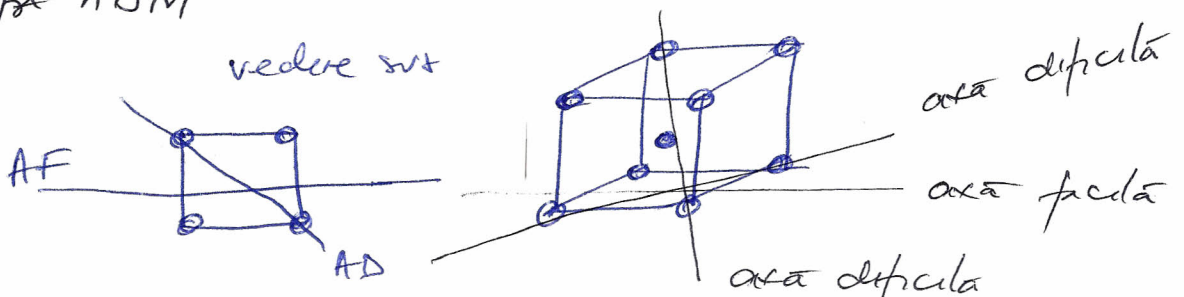
Alte directii au proprietati exact opuse \Rightarrow axe de dificultate magnetica (ADM).



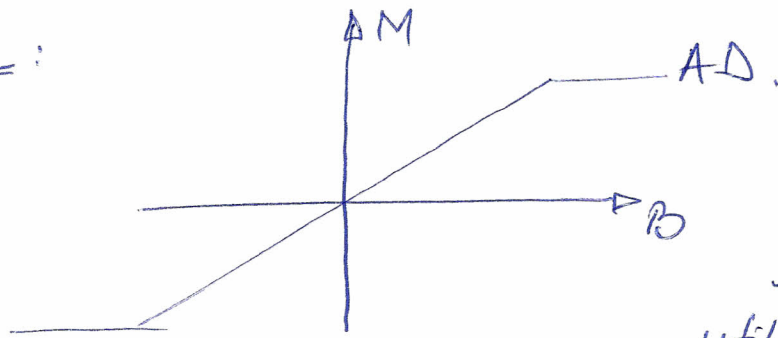
AUM: B_s - mic saturatie rapida.
ADM: B_s - mare :: saturatie dificila

(1) M-H pt AUM
(2) M-H pt ADM

ex: Fe-bcc (cvc)



Obs:



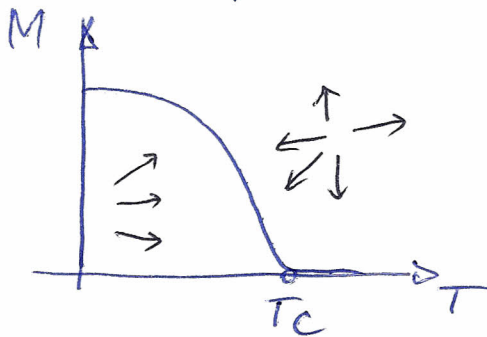
-14-

un răspuns liniar
M-B măsurat de-a
lungul axii depinde este
util în construcția unor
senzori de câmp magnetic

Răspuns
liniar $f = \text{funcție (câmp)}$

Temperatura Curie

Odată cu creșterea temperaturii, efectele termice (entropia) intră în competiție semnificativ cu interacțiunile de schimb care tind să alinieze momentele paralel. Peste o temperatură critică (Curie) un material feromagnetic va prezenta o tranziție de fază de ordinul 2^{u} într-o stare paramagnetică. Sub T_c se produce o tranziție spontană care duce la alinierea paralelă a momentelor magnetice vecine



Lege Curie-Weiss

$$\chi = \frac{\mu_0 M}{B} = \frac{C}{T - T_c}$$

C = constanta Curie

T_c = temperatura Curie \rightarrow măsură a
interacțiunilor de schimb
 \rightarrow caracteristică
de material.

Materialele magnetice cu T_c peste temperatura camerei sunt necesare pentru aplicații tehnologice curente în senzori și stocarea informației.

Obs: Stabilitatea termică a unui feromagnet depinde de materialul însuși dar și de dimensionalitatea acestuia prin energia de anizotropie (E_K). E_K mare implică T ridicată la care M rămâne stabilă. Când reducem dimensiunile unui obiect/material magnetic E_K , proporțională cu volumul V scade. Aceasta implică probleme în miniaturizarea extensivă a elementelor de memorie din hard-disk-uri; bitii devin instabili pentru utilizare la temperatura camerei

→ soluția: condiții criogenice ($T \downarrow$): nesatisfăcătoare dpr. tehnologic și aplicativ

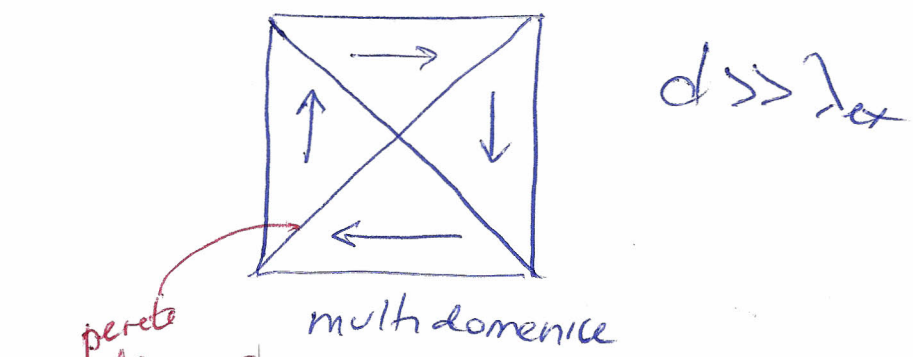
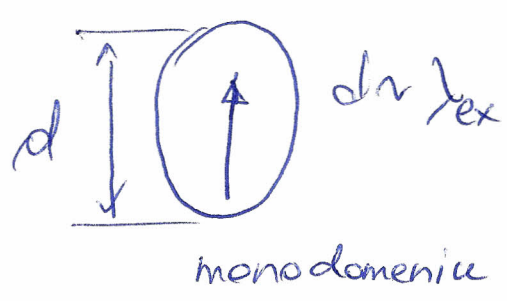
• fabricarea unor materiale inovative, noi (câmp de cercetare activ actual) sau controlul propr. magnetice prin dimensionalitate, formă, factor de aspect, Ceau?

Lungimea de schimb

lungime caracteristică în magnetism

Distanta medie la care 2 momente de spin pot să se orienteze paralel.

Ce determină ca o structură magnetică să fie constituită dintr-un singur domeniu sau mai multe domenii?



$$\lambda_{ex} = \sqrt{\frac{A}{K}} \approx \frac{\sqrt{A}}{M_s}$$

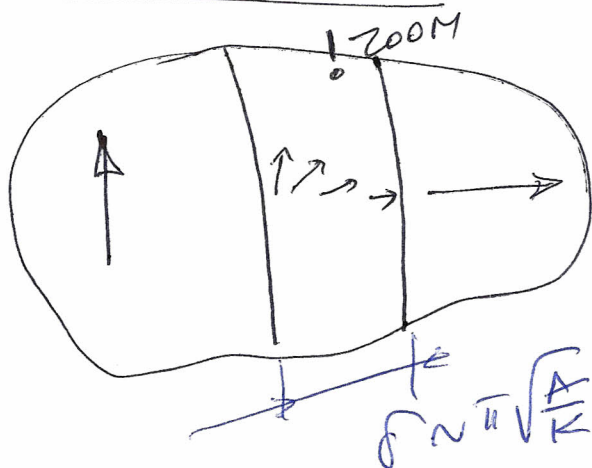
dimensiunea
(lungimea) tipică
a unui perete de
domenii

K = constantă de
anizotropie (erg/cm^2)

A = constantă de
schimb
($\approx 10^{-6} \text{ erg/cm}$)

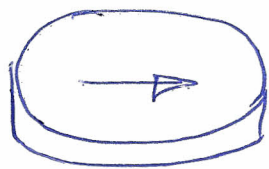
M_s = magnetizare la
saturație (emu/cm^3)

Perete de domenii



Concept

Când dimensionalitatea unui obiect magnetic devine comparabilă cu lungimea de schimb, proprietățile magnetice pot fi controlate prin formă, factor de aspect, dimensiuni, geometrie, etc. \Rightarrow versatilitate în controlul proprietăților magnetice în mod inovativ, combinat cu tehnici de micro/nano structurare.

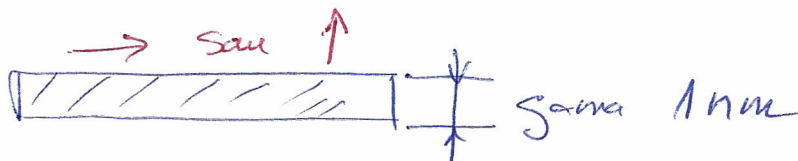


disk: magnetizare în
plan



fir: magnetizare longitudinală

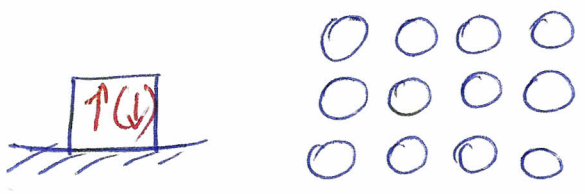
filme subțiri:



\vec{M} în plan sau \perp

Structuri magnetice paternate

(ex. aplicati in hard-disk-uri HDD)

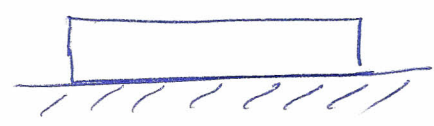


elemente magnetice nanometrice
cu magnetizare perpendiculară la
planul filmului ca și elemente
de stocare (1) și (0) în HDD

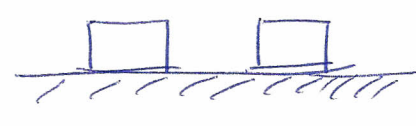
Obs : In vederea nano-structurării se folosesc tehnici de
litografie (optica, electronica, ...) pt a controla
forma și dimensiunile, factorul de aspect al nanostruct.

→ vezi prezentare PPT.
(link extern)

film subțire



LITHOGRAFIE

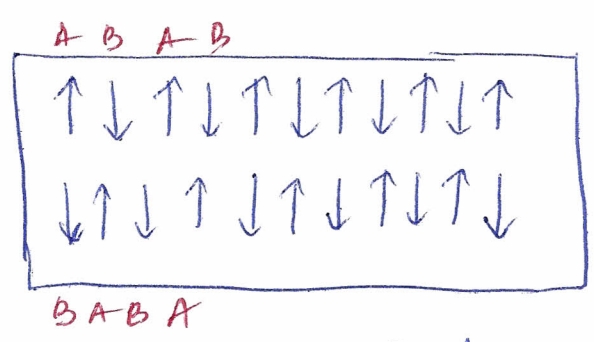


Micro-nano
structurare

tehnici specifice
microelectronicii

4 ANTIFEROMAGNETISM

In materiale care prezintă antiferomagnetism momentele
magnetice ale atomilor, moleculelor, ... se orientează sub
forma unor subrețele in care magnetizarea are
orientare antiparalela $\vec{M}_A = -\vec{M}_B$



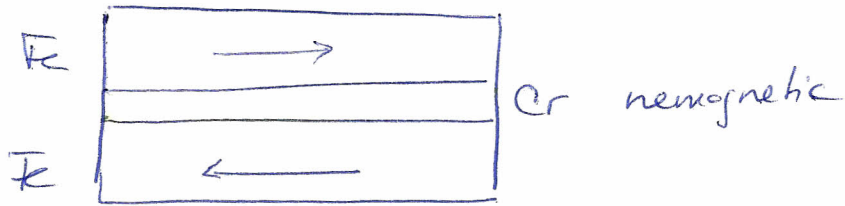
global: $\vec{M} = 0$
pt. că $\vec{M}_A = -\vec{M}_B$

Ordinea antiferomagnetică persistă până
la o temperatură T_N (Néel) (Louis Néel)
Peste T_N materialele devin paramagnetice.

Exemple de materiale AF

- Oxizi ai metalelor de tranzitie (NiO)
- anumite metale (Cr)
- anumite aliaje: (FeMn, IrMn)

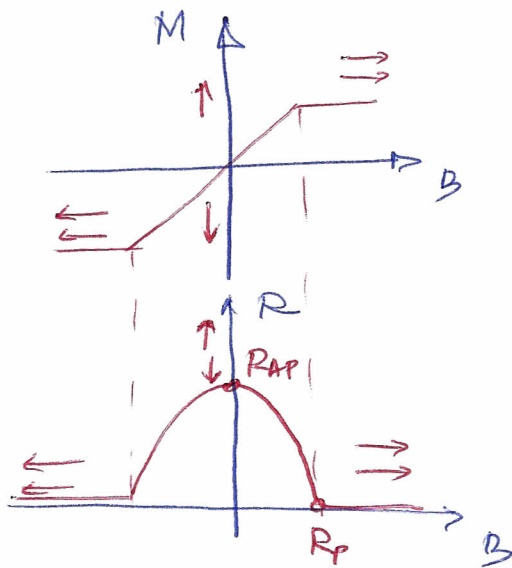
Antiferomagnetismul in filme subiri



Efect de magnetorezistență gigant (GMR)

=> Premiul Nobel pt Fizică 2007

A. Fert & P. Grünberg



$$GMR = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P}$$

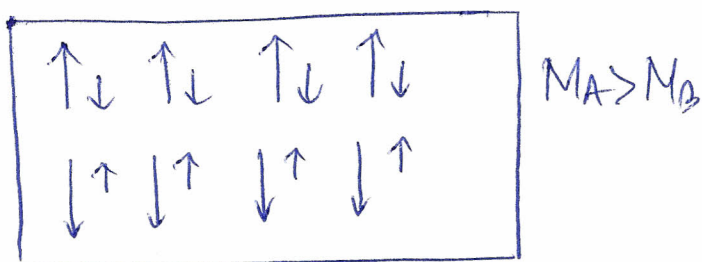
magnetorezistență gigant

⇓
efect utilizat în capetele de lectură HDD, senzori, etc...

(5) FERIMAGNETISM

= antiferomagnetism necompensat

$$\Rightarrow \bar{M}_A \neq -\bar{M}_B$$

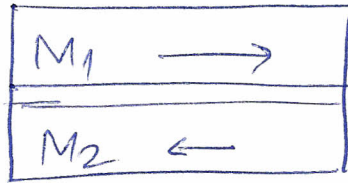


Ferimagnetismul apare în :

-19-

→ oxizi magnetici (ferti, magnetite)
 Fe_3O_4

→ sisteme de filme subțiri antiferromagnetice cuplate
⇒ ferimagnetism sintetic sau artificial



$$M_1 \neq M_2$$

sisteme extrem de folosite în aplicații spintronice (senzori), memorii nonvolatile, etc.

Efectul temperaturii

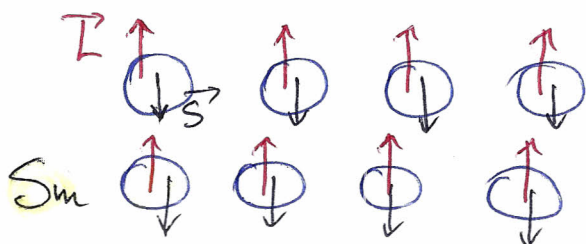
Asemeni feromagnetilor, peste temperatura Curie magnetizarea netă devine nulă datorită fluctuațiilor termice și materialele devin paramagnetice.

Totuși, în unele materiale, datorită variației diferite cu temperatura a magnetizării în cele două subsrețele A și B magnetizarea M_A poate deveni egală cu M_B la o anumită temperatură numită TEMPERATURA DE COMPENSARE

⑥ MATERIALE MAGNETICE cu moment magnetic orbital și de spin

Există anumite materiale magnetice la care momentul magnetic atomic provine atât de la Componenta orbitală \vec{L} a momentului cinetic cât și de la cea de spin \vec{S} .

Pt. anumite materiale din această categorie \vec{L} și \vec{S} sunt orientate antiparalel pt aceeași direcție

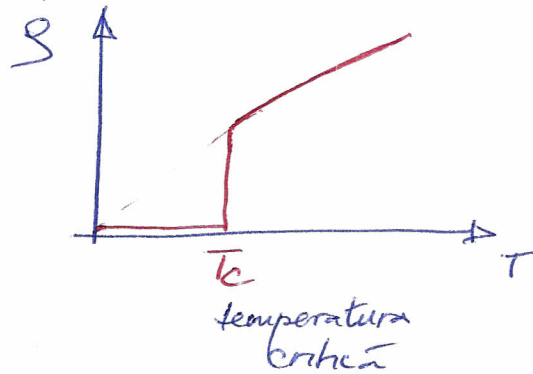


⇔ compus "self-ferimagnetic"
ex: $SrAl_2$

-2.-
Si aici, datorita varietatii cu temperatura diferenta
a magnetizarii orbitale si celei de spin se poate defini
o temperatura de compensatie la care nici \vec{J} nici \vec{S}
nu sunt zero dar magnetizarea totala este nulla.

SUPRA CONDUCTIBILITATEA

Există o clasă specială de materiale care răcite sub o anumită temperatură își pierd total rezistența electrică putând transporta curentul electric fără disipare. Aceste materiale se numesc supraconductoare.



Kamerlingh Onnes (1911)

Observa că Hg răcit sub 4,2K își pierde rezistența electrică

↓ Premie Nobel

Supraconductori au alte proprietăți interesante:

- (1) T_c se modifică dacă materialul este plasat în câmp magnetic extern B_0 (scade cu creșterea B_0). Valoarea minimă a câmpului extern B_0 necesar distrugerii stării supraconductoare se numește câmp critic B_c .

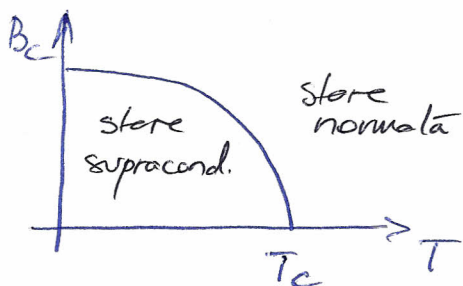
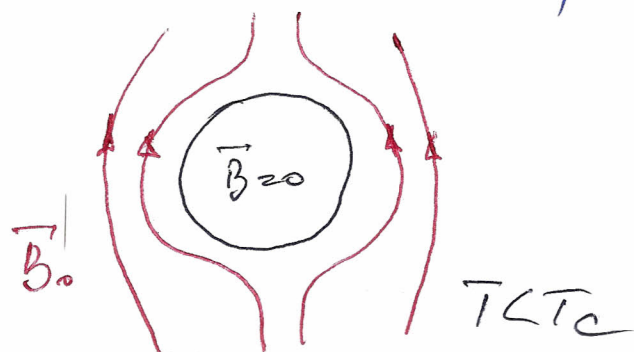
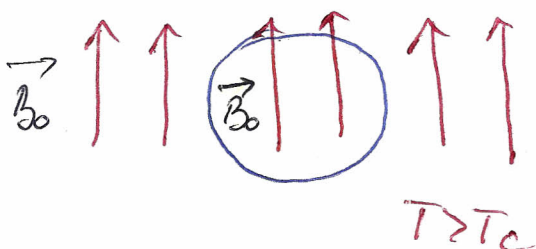


diagrama de fază:

$$B_c(T) = B_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

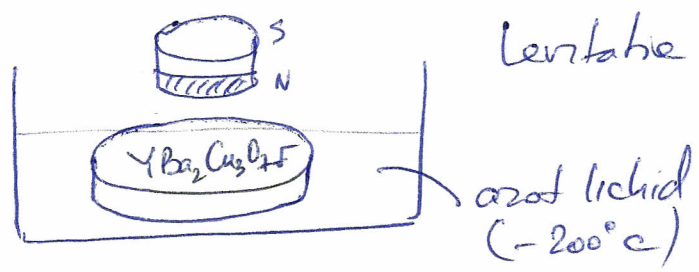
Efectul Meissner

Când un material supraconductor tranzitionează din stare normală în stare supraconductoare într-un câmp extern B_0 fluxul magnetic este în totalitate expulzat din supraconductor



Levitatia supraconductoare

Un supraconductor se comporta ca un diamagnet perfect. Aceasta prezinta consecinta mecanice importante. Pentru un material diamagnetic, magnetizarea are o orientare opusa fortei de campul magnetic extern. Aceasta implica o respingere de catre un magnet permanent. Conform principiului III al lui Newton, magnetul este de asemenea respins de catre supraconductor, astfel incat magnetul poate lanta deasupra supraconductorului.



Clasificarea supraconductorilor

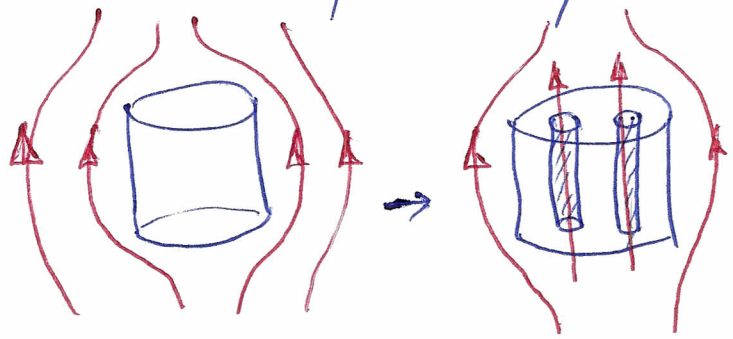
Tip I

au o tranzitie directa din stare normala (N) in stare supraconductoare (S) la T_c si B_c

ex: metale Hg, Al, ...

Tip II

: tranzitia $N \leftrightarrow S$ se face prin intermediul unei stari intermediare in care anumite zone normale apar in supraconductor, numite vortexuri



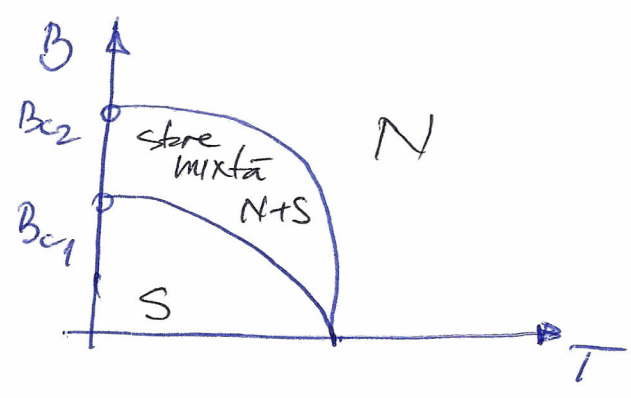
\vec{B} poate penetra prin vortexuri

In supraconductori de tip II se pot defini
2 campuri critice:

B_{c1} → campul de aparitie a vortexurilor

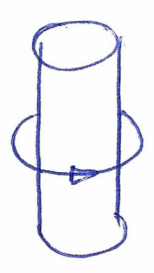
B_{c2} → camp furante totala in stare normala

⇒ Diagrama de
faza pt. supra
de tip II



exemple: anumite metale: V, Nb, MgB₂, ...
oxizi: YBa₂Cu₃O_{7-x}

vortex



in jurul vortexurilor circula supracurrenti
& fluxul magnetic poate penetra in
interior.

Ok!

① Supraconductori de tip II permit pastrarea starii
supraconductoare la valori ale campurilor externe
cu mult superioare supraconductorilor de tip I.

Aplicatii

⇒ electromagneti supraconductori. (permis generarea de
campuri magnetice intense (zeci de Tesla) care nu pot fi
obtinute cu ajutorul electromagnetilor clasici (datand de dispersia
in $R \propto I^2$). Un alt avantaj este ca odata transitionat
in stare supraconductoare electromagnetul nu mai consuma
energie, ($R \rightarrow 0$).

- transportul energiei de putere la distanțe mari, dispozitive de conversie a energiei (generatoare, motoare, transformatoare) în care diminuarea pierderilor ar crește randamentul de conversie, transport...
- echipamente pentru măsurarea sau sensibilitate mare a câmpului magnetic (SQUID = superconducting Quantum Interference Device) care poate detecta modificări ale fluxului magnetic mai mici de 10^{-4} Wb. Acestea au o importanță majoră în medicină, cercetări în domeniul magnetismului și a materialelor magnetice, etc..

Supraconductori de temperatură ridicată (HTC)

au temperatura critică $T_c > 77 K$ (azot lichid)

ex: supraconductori ceramici: $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($T_c \sim 90 K$)

generații noi de HTC supra cu $T_c > 110 K$.

Mecanismele de apariție a stării supraconductoare și fizica aferentă devine din ce în ce mai complexe \Rightarrow domenii de cercetare moderne cu înalt potențial aplicativ.