

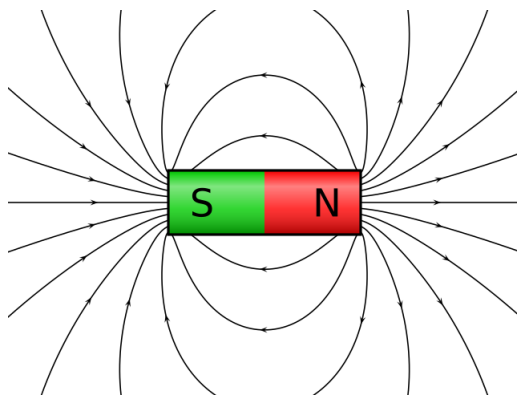
Zavirimo u magnete

Duje Jerić-Miloš

15. siječnja 2025.

1 Uvod

Uzmimo jedan trajni magnet (onakav kakav vjerojatno imate kod duće na hladnjaku) i prepolovimo ga napola - hoćemo li možda dobiti dva zasebna pola (dva monopola)? Ne! Magnetske monopole nitko još nije pronašao i u standardnoj teoriji se uzima da monopoli ne postoje¹. Dvije polovice prepolovljenog magneta će svaka opet imati sjeverni i južni pol. Ali zašto? Što to točno trajnom magnetu daje magnetska svojstva?



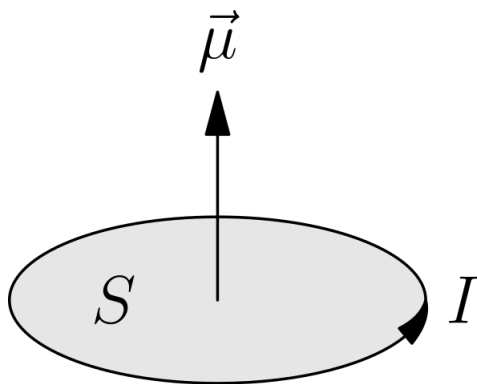
Slika 1: Magnetsko polje trajnog magneta. Linije magnetskog polja izlaze iz sjevernog pola, a ulaze u južni. Izvor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPT_cylindrical_magnet_big.svg.

¹Ipak, ima teorijskih razloga za njihovo postojanje; vidi 't Hooft - Polyakov monopol

2 Spin

Priča kreće od elektrona. Svaki elektron ima kvantnomehanički spin, odnosno u vanjskom magnetskom polju se ponaša slično (ali ne baš isto) kao mala nabijena kuglica koja se okreće oko svoje osi. Nabijena rotirajuća kuglica bi, primjerice, generirala svoje magnetsko polje jer bi svojim okretanjem stvorila male strujne petljice.

Strujna petljica će se pak u vanjskom magnetskom polju rotirati dok se ne poklope smjer vanjskog magnetskog polja i njenog **magnetskog momenta**. Precizno, magnetski moment μ male petljice struje je definiran tako da je moment sile na petljicu $M = \mu \times B$. Dakle, kada je magnetski moment μ u smjeru vanjskog magnetskog polja B , petljica se neće okretati. Inače će se okrenuti tako da magnetski moment pokazuje u istom smjeru kao i vanjsko magnetsko polje.



Slika 2: Izvor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetic_moment.svg.

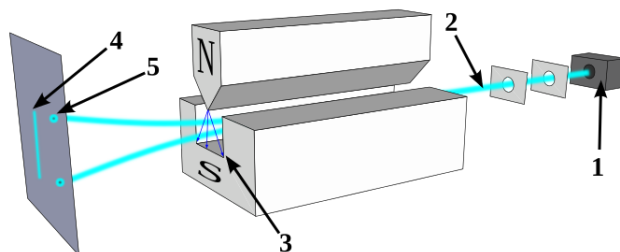
Slično tome, i spin elektronu daje magnetski moment. U atomima nekih elemenata svi elektroni dolaze spareni sa elektronima suprotnog spina. Tako se magnetski momenti svih elektrona ponište i čitav atom je magnetski neutralan. Atomi nekih drugih elemenata (npr. željezo ili srebro) pak imaju nesparene elektrone i tako čitav atom ima neki ukupni spinski magnetski moment.

To da elektron ima spin možemo vidjeti pomoću sljedećeg eksperimenta (Stern-Gerlach). Kroz magnetsko polje (čija jakost slabi npr. u smjeru gore-

dolje) ispaljujemo atome srebra². Rezultat eksperimenta je da neki atomi srebra zakreću prema gore, a neki prema dolje, no ne (!) kako bismo očekivali da su elektroni male kuglice. Da su elektroni male kuglice koje se okreću oko svoje osi, očekivali bismo da atomi srebra gađaju čitavu neprekidnu liniju (koja prati smjer u kojem magnetsko polje slabi/jača) ovisno o tome koliko se brzo elektroni okreću, odnosno o smjeru oko kojeg se okreću.

Kada sprovedemo eksperiment dobijemo da atomi srebra gađaju točno dvije točke - jednu gornju i jednu donju. Ovo je kao da se kuglice samo smiju rotirati samo jednom brzinom u smjeru kazaljke na satu (pa ako su negativnog naboja, magnetski moment im je prema gore) ili istom brzinom suprotno od kazaljke na satu (pa im je magnetski moment prema dolje). Zaključujemo da elektron ne možemo shvatiti kao malu kuglicu koja se okreće i da elektronski spin (tj. njegova gore-dolje komponenta) poprima samo dvije moguće vrijednosti: spin-gore i spin-dolje.

²Koristimo atome, a ne "gole" (slobodne) elektrone jer su atomi električno neutralni pa ih u magnetskom polju zakreće samo spin. Da smo direktno koristili slobodne elektrone, imali bismo otežavajuću okolnost: elektron je nabijena čestica i zbog toga dodatno zakreće u magnetskom polju, što maskira spinski efekt. Novija istraživanja su pokazala da se taj problem može riješiti <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/13/6/065018/pdf>



Slika 3: 1: izvor koji ispaljuje atome srebra. 2: zraka atoma. 3: magnetsko polje koje zakreće atome srebra. 4: rezultat koji očekujemo za malu nabijenu kuglicu koja se okreće. 5: dobiveni rezultat. Izvor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stern-Gerlach_experiment_svg.svg.

Napomenimo još jednom: spin elektrona ne predstavlja "okretanje elektrona oko svoje osi" (što god to značilo), već samo nekakvu unutrašnju kutnu količinu gibanja. Usporedimo ovo s gibanjem Zemlje oko Sunca - Zemlja ima orbitalnu kutnu količinu gibanja (jer kruži oko Sunca) i spinsku kutnu količinu gibanja (jer se okreće oko svoje osi). Za vrlo dalekog promatrača su Zemlja, Sunce i Mjesec za svaku praktičnu svrhu točke. Dakle, taj promatrač ne vidi rotaciju Zemlje oko svoje osi, no može je naslutiti kroz neke eksperimente. Primjerice, ako asteroid udari u Zemlju, orbita Mjeseca se može malo promijeniti. Zašto? Promatrač koji je blizu svjedoči tome da okretanje Zemlje oko svoje osi usporilo pa (zbog očuvanja kutne količine gibanja) i Mjesec mora kružiti oko Zemlje na malo većoj udaljenosti. Daleki promatrač samo vidi da se orbita Mjeseca malo promijenila i iz toga može zaključiti da Zemlja ima neku dodatnu "unutrašnju" kutnu količinu gibanja. Slično tome i elektron ima orbitalnu kutnu količinu gibanja jer se giba oko jezgre atoma, ali ima i neku dodatnu "unutrašnju" kutnu količinu gibanja. Elektron, doduše, ne možemo opisati kao kuglicu: elektron ne kruži oko jezgre kao planet (kako bi se možda naivno dalo shvatiti), niti je kuglica koja se okreće dobra slika elektronskog spina. Izvor elektronske unutrašnje kutne količine gibanja je

stoga puno teže shvatiti.

3 Atomi na okupu

Pretpostavimo da sada imamo više atoma na okupu. U tom slučaju se oni elektroni koji su udaljeniji od jezgre "dijele" među atomima (provode vrijeme oko više različitih jezgara). Ovako se tvore kemijske veze. Ti vanjski (u jeziku kemičara "valentni") elektroni će se obično spariti, zato molekule generalno nemaju magnetski moment. Iznimka bi bila npr. molekula kisika koja ima jedan nespareni elektron. U komadu metala imamo veći broj atoma koji svaki donira svoje vanjske elektrone u zajedničko delokalizirano "more" elektrona. Ti vanjski elektroni obično ne doprinose (ili slabo doprinose) magnetskim svojstvima jer im se uglavnom ponište magnetski momenti. Glavni doprinos kod metala daju unutrašnji elektroni koji su lokalizirani na pojedine atome (tj. koji nisu dio zajedničkog mora nego se drže blizu neke konkretne jezgre). Ako ti unutrašnji elektroni nisu spareni materijal će imati značajna magnetska svojstva. Primjerice, elektroni u pojedinačnom atomu srebra i bakra nisu spareni, no komad bakra ili srebra ne privlači magnet jer su nespareni elektroni bakra i srebra oni vanjski. Željezo, s druge strane, ima unutrašnje nesparene elektrone i komad željeza će privlačiti magnet.

Recimo da u komadu materijala svaki atom ima neki magnetski moment (zbog, npr. nesparenih unutrašnjih elektrona), tj. da se svaki atom ponaša kao mali magnetić. Ako se puno takvih atoma okrene u istom smjeru, tj. ako im se magnetski momenti međusobno poslože i pojačaju, onda će i sami materijal imati magnetsko ponašanje. Ovo će se dogoditi kada izložimo materijal nekom vanjskom magnetskom polju - onda se atomi poslože u smjeru vanjskog polja i takav materijal to vanjsko polje privlači.

4 Paramagnetizam i dijamagnetizam

Često, kada pomaknemo vanjsko polje, atomi više neće biti poredani u istom smjeru i materijal gubi magnetska svojstva. Takve materijale onda zovemo **paramagnetima** ("domagneti"). Ovako se ponaša npr. aluminij - njega slabo privlači magnet, ali ga ne možemo namagnetizirati (tako da trajno ostane magnet).

Neke materijale, npr. živu, magneti uopće ne privlače jer su elektroni atoma žive u potpunosti spareni pa se sami atomi bakra ne ponašaju kao mali magneti. Pojedinačni atom bakra ili srebra ima nesparene elektrone, no to su vanjski elektroni koji se spare kada imamo čitav komad bakra ili željeza. Magnet ovakve materijale ne privlači, već vrlo vrlo slabo odbija. Kažemo da su to **dijamagneti**. Dijamagnetsko odbijanje je zapravo prisutno u svim tvarima, no vrlo je slabo, stoga ako je materijal paramagnetičan (ili pak feromagnetičan), dijamagnetizam neće biti uočljiv. Većina tvari oko nas (voda, drvo, razne organske tvari) su dijamagneti pa njih uopće ne privlači vanjsko magnetsko polje. U vrlo jakom magnetskom polju dijamagnetske tvari možemo održavati u lebdećem stanju - pogledajte npr. žabe: <https://www.youtube.com/watch?v=K1JsVqc0ywM>

Odbijanje dijamagneta se javlja ne zbog spina elektrona, već zbog njihovog orbitalnog gibanja oko jezgre. Preciznije, javlja se zbog učinka koji vanjsko polje ima na gibanje elektrona oko jezgre - zbog elektromagnetske indukcije.

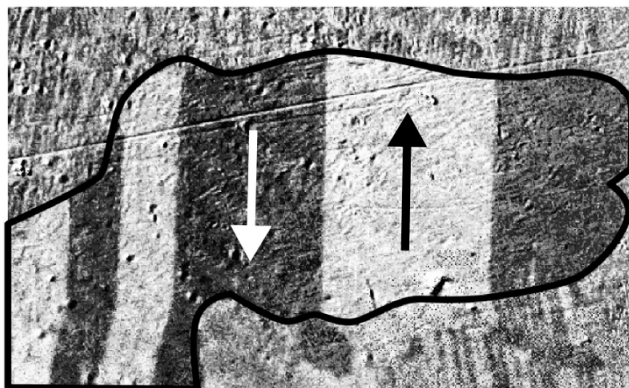
Naime, kada uključimo vanjsko polje (dok se ono još mijenja), elektroni će ubrzati svoje gibanje tako da se novonastala struja odupire promjeni vanjskog polja (Lenzovo pravilo). Kada vanjsko polje dođe do svoje stalne vrijednosti (kada se više ne mijenja), elektroni će još uvijek imati svoje nove brzine³. Ovo pak mijenja magnetski moment orbitalnog gibanja elektrona, što znači da će svaki atom dobiti malo ekstra dipolnog momenta koji se odupire vanjskom polju (odbojno je).

5 Feromagnetizam

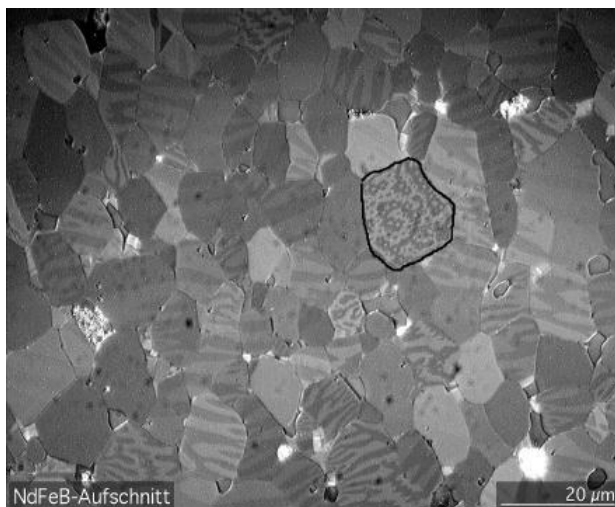
Materijali od kojih možemo dobiti trajne magnete, odnosno oni koji zadržavaju magnetska svojstva čak i kada pomaknemo vanjsko polje se zovu **ferromagneti** ("željezoliki magneti"). Ovo su obično tvari za koje u svakodnevnom životu kažemo da su "magnetične" - željezo, neodimij, nikal, kobalt... Unutar ovakvih materijala imamo tzv. *magnetske domene* čiji su atomi (tj. njihovi magnetski momenti) posloženi u istom smjeru. Dakle, sama domena se ponaša kao mali magnetić (sa nekim svojim ukupnim magnetskim momentom).

³Naravno, kada isključimo polje, tj. kada se ono počne smanjivati, onda ponovno djeluje indukcija (no sada u suprotnom smjeru) i brzine elektrona će se tako vratiti na staro.

Metali su sastavljeni od mnoštva sitnih grumena u kojima su atomi poredani u pravilnu kristalnu rešetku. Unutar svakog grumena možemo imati magnetske domene kao na sljedećoj slici:



Slika 4: Svijetle i tamne pruge predstavljaju magnetske domene. Strelice pokazuju smjer magnetskog momenta. Izvor: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetic_domain_with_arrows_by_Zureks.png.



Slika 5: Mnoštvo grumena u neodimijskom magnetu. Pruge predstavljaju magnetske domene. Izvor: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NdFeB-Domains.jpg>.

Razlog za formiranje domena je smanjenje energije - sustavi će težiti da

održe konfiguraciju niže energije. Kod magneta dva efekta smanjuju energiju. S jedne strane, susjedni atomi će tjerati jedni druge u istom smjeru (energetski im je povoljnije da su im spinovi, tj. magnetski momenti u istom smjeru). S druge strane, energetski je povoljnije da van materijala imamo što manje polje. Dakle, povoljnije je da se magnetska polja tih domena ponište, stoga će se domene orijentirati u suprotnim smjerovima tako da to omoguće. Prvi efekt će htjeti stvoriti što veću domenu, a drugi će domenu htjeti razbiti na manje komadiće koji se onda mogu poništiti.

Domene mogu postojati i u neoptimalnim konfiguracijama - gdje ipak stvaraju neko slabije (ili jače) polje van materijala. Konkretno, ako materijal ubacimo u neko snažno vanjsko magnetsko polje, onda će se domene okrenuti u smjeru tog polja. Vidi snimku magnetizacije jednog grumena željeza https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moving_magnetic_domains_by_Zureks.gif. Kada maknemo vanjsko polje, neke domene mogu ostati u tom smjeru bez da se vrate u početnu konfiguraciju. Naime, da bi domena promijenila smjer treba uložiti neku energiju jer na granici domene susjedni atomi nemaju momente u istom smjeru, što za njih nije optimalno. Dakle, potrebno je povisiti (uložiti) prvo energiju da bi domena promijenila smjer i da bi se tako pronašla sveukupno optimalna energetska konfiguracija.

Konačno, ako magnet zagrijemo (uložimo energiju), onda će se zbog nasumičnog termalnog gibanja spinovi poremetiti i neke domene će moći promijeniti smjer tako da se umanji energija. Ovako će magnetsko polje feromagneta oslabiti. Nakon određene temperature (Curiejeve temperature) će nasumično termalno gibanje postati toliko veliko da će nadvladati kratkodometna međudjelovanja spinova (koji se međusobno pokušavaju usmjeriti u istom pravcu) pa materijal gubi domene i postaje paramagnet. Neki paramagneti isto tako postanu feromagneti ako ih dovoljno ohladimo (ali neki materijali ostaju paramagneti čak i na apsolutnoj nuli). Matematički, ponašanje spinova u magnetskoj domeni je opisano tzv. Isingovim modelom https://en.wikipedia.org/wiki/Ising_model.