PONAŠANJE MATERIJALA U MAGNETSKOM POLJU - PARAMAGNETI I DIJAMAGNETI

Bakoška, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:527652

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-26**

Repository / Repozitorij:

Repository of Department of Physics in Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU

IVANA BAKOŠKA

PONAŠANJE MATERIJALA U MAGNETSKOM POLJU – PARAMAGNETI I DIJAMAGNETI

Diplomski rad

Osijek, 2020.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU

IVANA BAKOŠKA

PONAŠANJE MATERIJALA U MAGNETSKOM POLJU – PARAMAGNETI I DIJAMAGNETI

Diplomski rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

radi stjecanja akademskog naziva MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I INFORMATIKE

Osijek, 2020.

"Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom komentora Igora Miklavčića, pred., i mentora doc. dr. sc. Denisa Stanića u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija Fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku".

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Denisu Staniću i predavaču Igoru Miklavčiću na pomoći oko aparature, traženju materijala te predlaganju ideja koje su pomogle u pisanju ovog diplomskog rada.

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Povijest magnetizma 2
3. Magnetska svojstva materijala 6
3.1. Dijamagnetizam 11
3.2. Paramagnetizam 14
3.3. Feromagnetizam 17
3.4. Antiferomagnetizam 20
3.5. Ferimagnetizam 21
4. Demonstracijski pokusi 23
4.1. Ponašanje materijala u magnetskom polju – dijamagneti i paramagneti 25
4.2. Levitacija grafita – prikaz ponašanja dijamagneta u magnetskom polju 37
5. Metodička jedinica 42
6. Zaključak 56
7. Literatura 57
Životopis 59

Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku
Odjel za fiziku

Diplomski rad

PONAŠANJE MATERIJALA U MAGNETSKOM POLJU – PARAMAGNETI I DIJAMAGNETI

IVANA BAKOŠKA

Sažetak

Početni dio rada obuhvaća povijesni razvoj magnetizma, teoriju kojom se objašnjava podrijetlo magnetizma u tvarima i objašnjenje magnetizacije, a zatim su opisana svojstva pojedinih skupina tvari koje dijelimo prema ponašanju u vanjskom magnetskom polju, odnosno dijamagneta, paramagneta, feromagneta, antiferomagneta te ferimagneta. Središnji dio rada posvećen je jednostavnim demonstracijskim pokusima koji prikazuju ponašanje dijamagneta i paramagneta u prisustvu magnetsko polja. Nakon toga, u završnom dijelu, priložena je metodička jedinica u kojoj su uklopljeni slični demonstracijski pokusi kojima bi učenici mogli nadopuniti znanje o dijamagnetima i paramagnetima koji se rijetko detaljnije obrađuju u nastavi fizike.

(65 stranice, 47 slika, 26 literaturna navoda)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: dijamagnetizam / demonstracijski pokus / magnetizam / paramagnetizam

Mentor: doc. dr. sc. Denis Stanić

Komentor: Igor Miklavčić, pred.

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Maja Varga Pajtler; mr. sc. Slavko Petrinšak; doc. dr. sc. Denis Stanić

Rad prihvaćen:.

J. J. Strossmayer University in Osijek
Department of Physics

Bachelor of Science Thesis

BEHAVIOR OF MATERIALS IN MAGNETIC FIELD – DIAMAGNETS AND PARAMAGNETS

IVANA BAKOŠKA

Abstract

The first part of master thesis includes historical development of magnetism, theory that describes origin of magnetism and explanation of properties in individual groups of substances that can be divided according to their behaviour in the external magnetic field, which are diamagnets, paramagnets, ferromagnets, antiferromagnets and ferrimagnets. Simple demonstration experiments that are showing behaviour of diamagnets and paramagnets in the presence of magnetic field are contained in main part. After that, in the final part of master thesis, we have methodical unit that contains similar demonstration experiments in which students could supplement their knowledge of diamagnets and paramagnets, which are rarely discussed details in physics class.

(65 pages, 47 figures, 26 references)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: diamagnetism / demonstration experiment / magnetism / paramagnetism

Supervisor: Denis Stanić, PhD

Co-mentor: Igor Miklavčić, pred.

Reviewers: Maja Varga Pajtler, PhD; Slavko Petrinšak, MSc; Denis Stanić, PhD

Thesis accepted:

1. Uvod

Pojam magnetizma pojavio se još u doba drevnih civilizacija. Usprkos tome, kroz povijest se susrećemo s različitim neuspješnim pokušajima istraživanja i shvaćanja što bi magnetizam zapravo mogao biti. Uspoređujući koliko je pojam star, možemo reći da je potpuno razumijevanje ovoga svojstva ugledalo svijetlo tek nedavno, s pojavom kvantne mehanike.

Riječ magnet ili magnetizam nije toliko stran pojam većini čovječanstva. Osim najjednostavnije upotrebe kao ukras na hladnjacima, većina moderne tehnologije i uređaja, poput računala, radija, televizije ili električnih motora, skriva u sebi neki magnetski materijal.

Nepoznata strana ovog fenomena je da se tvari, prema ponašanju u magnetskom polju, zapravo dijele na pet skupina: dijamagnetizam, paramagnetizam, feromagnetizam, antiferomagnetizam i ferimagnetizam, a svaka od njih ima svoja specifična svojstva.

Tijekom osnovnoškolskog i srednjoškolskog obrazovanja, učenici se upoznaju najviše s feromagnetima, a paramagnete i dijamagnete, u pravilu, samo zapišu kao podjelu, ne znajući njihova ponašanja.

Cilj, a ujedno i motivacija, ovog diplomskog rada je ukazati na jednostavnost i mogućnost izvedbe demonstracijskih pokusa koji prikazuju ponašanje dijamagneta i paramagneta u magnetskom polju. Efekt dijamagnetizma i paramagnetizma može se vrlo lijepo uočiti čime bi učenici napokon mogli shvatiti razlike između materijala.

2. Povijest magnetizma

Kada pričamo o povijesti magnetizma zapravo posežemo daleko u prošlost, prije početka naše ere. Tijekom vladavine Han dinastije, Kinezi su prvi počeli upotrebljavati uređaj nalik kompasu. Taj uređaj sastojao se od magnetske rude koja je bila izrezbarena u oblik žlice, a nazivali su ga „Pokazatelj Sjevera“. Način na koji je „kompas“ radio bio je vrlo jednostavan, žlica je bila postavljena na kamenu ili brončanu ploču s oznakama, a njezina drška okretala bi se pod utjecajem Zemljina magnetskog polja. Bitno je naglasiti kako ovaj uređaj u početku nisu upotrebljavali za orijentaciju već za geomantiju, odnosno drevnu vještinu proricanja budućnosti, a zatim i kao pomoć pri izgradnji ulica nekih kineskih gradova. [1] Oko 1088. godine Shen Kua, kineski astronom i matematičar, daje nam opis upotrebe magnetske igle kao kompasa za navigaciju te definira razliku između „pravog“ Sjevera i magnetskog sjevera. [2]

Slika 1: Prvi uređaj nalik kompasu [3]

Osim kod Kineske civilizacije, magnetske pojave uočene su i u antičkoj Grčkoj. Većini poznata legenda otkrića magnetizma je ona o pastiru Magnesu s otoka Krete, stara gotovo 4000 godina. Čuvajući svoje stado, pastir je primijetio kako su se njegove sandale, popločene čavlićima, čvrsto privile uz veliki crni kamen na kojemu je stajao te se pastir jedva uspio pomaknuti. Uzrok tome bio je upravo taj veliki crni kamen koji je zapravo prirodni mineral zvan magnetit (Fe_3O_4). Grci su, dakle, svakako bili upoznati s prirodnom magnetnom rudom, znali su da privlači željezo, ali nisu opazili uzajamno privlačenje i odbijanje. Razlog tome bio je svakako taj što se u to vrijeme pokusi nisu izvodili kako bi se došlo do zaključaka ili kako bi

se nešto pomoću njih dokazalo, već je sve bilo usmjereno na razmišljanje i kao takvo se jedino i cijenilo.

Tales iz Mileta (624.-547. pr.n.e.), jedan od sedam starogrčkih mudraca, postavio je najstariji opis vezan za privlačenje magneta. Njegovo objašnjenje imalo je poveznicu s čovjekom, odnosno smatrao je kako magnet ima dušu jer privlači željezo, a ostale tvari ju nemaju jer ga ne privlače. Grčki filozof Empedoklo (490.-435. pr.n.e.) tumačio je privlačenje željeza magnetu kao istjecanje tvarnih čestica neke određene veličine. Svoje zaključke dao je i poznati atomist Demokrit (460.-370. pr.n.e.) pretpostavljajući kako su magnet i željezo zapravo izgrađeni od sličnih atoma stoga se sve giba prema sebi istima, a time je došao i do objašnjenja zašto dolazi do privlačenja magneta i željeza. Spjev *De rerum natura (O prirodi)* prvi je sačuvani rad u kojemu se objašnjava privlačenje magneta opisano pomoću Empedoklovog mišljenja, a njegov autor Tit Lukrecije Kar (98.-55. pr.n.e. ili 94.-54. pr.n.e.) prvi spominje i odbijanje magneta, međutim bez ikakvih dodatnih objašnjenja. Prva značajna rasprava o magnetizmu bio je rukopis Pierra de Maricourta (Petrusa Peregrinusa) pod nazivom *Epistola de magnete* iz 1269. Iako je rad ostao nezapažen gotovo više od 300 godina, u njemu se nalazi niz opažanja i zaključaka o magnetizmu. Maricourt prvi opisuje pravac magnetske sile, uvodi termin „magnetski pol“, uočava privlačenje i odbijanje polova pomoću pokusa, uviđa kako magnet i nakon dijeljenja ima oba pola, primjećuje okretanje magnetske igle prema sjeveru te da se ona može namagnetizirati.

Unatoč tome, pravi početak učenja o magnetizmu te zajedno s njim i elektricitetu smatramo 1600. godinom. Nesumnjivo najveći doprinos magnetizmu dao je William Gilbert. William Gilbert (1544.-1603.), engleski znanstvenik i liječnik, često se naziva „ocem elektriciteta i magnetizma“. 1600. godine objavljuje svoje djelo *De magnete (O magnetu, magnetskim tijelima i velikom magnetu Zemlji)* koje je sadržavalo opise i objašnjenja oko 600 izvedenih pokusa. Gilbert je iznio velike zaključke između kojih se našao i onaj da je Zemlja zapravo veliki magnet te objašnjenje kako na magnetsku iglu djeluju magnetski polovi Zemlje, a svoje je tvrdnje potkrijepio pokusom. Ponovio je pokuse iz 13.stoljeća koje je Maricourt opisivao u svojemu radu, pokazao je kako se željezo i čelik mogu namagnetizirati, iznio da je magnet dipol te da se raznoimeni polovi magneta privlače, a istoimeni odbijaju. Veliki doprinos donosi i istraživanju električnih pojava što mu daje temelj iz kojih zaključuje da su elektricitet i magnetizam dvije uvelike različite pojave stoga se od tog trenutka pa sve do 19.stoljeće one proučavaju odvojeno. Kako su godine odmicale znanstvenici su ponovno počeli primjećivati poveznice između elektriciteta i magnetizma pa tako dolazimo do 1759. godine kada imamo

prvi pokušaj njihova objedinjavanja. Franz Aepinus (1724.-1802.), njemački fizičar, prihvaća teoriju električnog fluida, uvodi magnetski fluid te počinje tražiti sličnosti i vezu između te dvije pojave. Tako na koncu dolazi do zaključaka da se magnetski i električni fluidi ponašaju prema istim zakonima te pretpostavlja da se sila odbijanja magnetskih ili električkih tijela smanjuje s kvadratom udaljenosti.

Charles Augustin Coulomb (1736.-1806.) 1785. godine potvrđuje pretpostavku Aepinusa, a svoj dobro poznati Coulombov zakon proširuje i na uzajamno djelovanje, odnosno privlačenje i odbijanje, točkastih polova magneta tri godine kasnije. Kao veliku prekretnicu pamtimo 1820. godinu kada se prvi puta spajaju elektricitet i magnetizam pokusom Hansa Christiana Oersteda (1777.-1851.). Uočen je magnetski učinak električne struje otklonom magnetske igle u blizini strujnoga kruga koji je Oersted proučavao. Ovim otkrićem ušli smo u eru elektromagnetizma. Nadopunu ovom otkriću daju francuski fizičari Jean-Baptiste Biot (1774.-1862.) i Felix Savart (1791.-1841.) koji postavljaju zakon za jakost magnetskog polja električne struje za ravan vodič, a Pierre-Simon Laplace (1749.-1827.) isti taj zakon opisuje matematički. Istraživanju elektromagnetizma pridružio se i Andre Marie Ampere (1775.-1836.) koji dolazi do zaključka da ne postoji magnetski fluid te da se zavojnica kojom teče struja ponaša kao magnet pa time Ampere postavlja molekularnu teoriju magnetizma na osnovu protoka kružnih struja u molekulama željeza koje se zbog toga ponašaju poput malenih magneta. Michael Faraday (1791.-1867.), engleski fizičar i kemičar, već u ranim danima svoje bogate karijere pokazuje zanimanje za magnetizam i elektricitet, a 1831. godine ostvaruje ono što je želio pokazati, došao je do otkrića elektromagnetske indukcije koju i opisuje pokusima. Također se zanimao za svojstva paramagnetizma i dijamagnetizma, istraživao ih je, radio eksperimente kako bi shvatio njihovo ponašanje te im je dao nazive koji su ostali i danas. Zadnja stavka razvoja bila je objedinjenje svega što je do sada otkriveno, a to uspijeva takozvani „otac elektromagnetizma“, veliki škotski znanstvenik James Clerk Maxwell (1831.-1879.) koji je u svom radu izložio teorije električnih i magnetskih pojava na temelju percepcije elektromagnetskog polja. Sumirajući veličine koje je upotrebljavao došao je do poznatih Maxwellovih jednadžbi. Razvoj magnetizma nadalje događa se u sklopu kvantne mehanike. [4]

Pierre Curie (1859.-1906.), u sklopu pisanja svoje doktorske teze, odlučuje otkriti postoje li prijelazi između feromagnetizma, dijamagnetizma i paramagnetizma. Pomoću torzijske vage otkriva Curiev zakon, kako je magnetska susceptibilnost paramagnetičnih tvari obrnuto razmjerna termodinamičkoj temperaturi. Osim toga dolazi i do zaključaka vezanih za

dijamagnetizam koji je većinom neovisan o temperaturi te feromagnetizam kod kojeg uvodi pojam Curieve temperature.

Drugačije ponašanje dijamagnetizma i paramagnetizma teorijski objašnjava francuski fizičar Paul Langevin (1872.-1946.) 1905. godine pomoću dosadašnjih Curievih otkrića. Langevin uvodi teoriju sitnih, atomskih magnetskih momenata čak i prije poznavanja atomske strukture. Završavamo povijesni pregled s Pierrom Weissom (1865.-1940.) koji je nadopunio Langevinovu teoriju uvodeći koncept molekularnog polja nazvanu Weissova teorija feromagnetizma, a koristi se za objašnjavanje područja spontane magnetizacije. [5]

3. Magnetska svojstva materijala

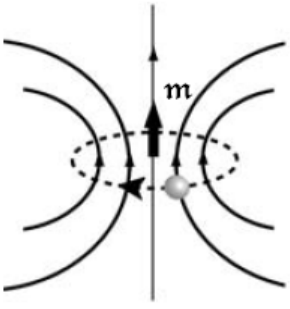
Magnetizam je sam po sebi poznat već tisućama godina, a njegov povijesni pregled seže izvan granica naše ere. Usprkos tome, njegovo objašnjenje, koncepti i razumijevanje postaju jasni tek kasnije, u doba moderne fizike.

Danas, magnetizam definiramo kao fenomen pojave sile koja može biti odbojna i privlačna, a nastaje zbog gibanja električnog naboja. [6] Ono što većini nije poznato jest činjenica da su svi materijali zapravo magnetični. Razlika je u tome što materijali mogu biti slabije ili jače magnetični, odnosno mogu imati različitu sposobnost reagiranja na vanjsko magnetsko polje. Magnetska svojstva materijala objašnjavamo na razini atoma. [7]

Na različite materijale, vanjsko magnetsko polje može utjecati zbog magnetskih momenata koje atom posjeduje, a oni se ponašaju poput malenih magneta. Kada pričamo o magnetskim svojstvima materijala bazirat ćemo se na dva načina gibanja elektrona, orbitalno i rotacijsko. Uzimajući to u obzir možemo izdvojiti izvore magnetskog momenta atoma kao:

1. Orbitalni magnetski dipolni moment koji nastaje zbog orbitalnog gibnja elektrona oko jezgre u atomu
2. Spinski magnetski moment elektrona koji nastaje zbog rotacije elektrona oko svoje vlastite osi
3. Spinski magnetski moment jezgre koji nastaje zbog rotacije jezgre oko svoje vlastite osi. [8]

Najjednostavniji prikaz atoma možemo zamisliti kao gibanje elektrona oko jezgre po orbitalama. [7]



Slika 2: Magnetski moment povezan orbitalnim kutnim momentom elektrona [9]

Elektron, mase m_e, negativno je nabijena čestica, a njegov naboj možemo označiti sa slovom *e*. Neka nadalje orbitala bude kružna petlja polumjera *r*. Sada ovaj prikaz možemo poistovjetiti sa strujnom petljom.

Struja *I*, koja se stvara kruženjem elektrona oko jezgre, dana je izrazom

$$I = \frac{-e}{T}, \tag{3.1}$$

gdje je *T* orbitalni period, a zapisujemo ga kao

$$T = \frac{2\pi r}{v}. \tag{3.2}$$

Magnetski dipolni moment elektrona dobivamo izrazom

$$\mu_l = IA. \tag{3.3}$$

Zatim uvrštavamo u izraz poznate veličine

$$\mu_l = IA = Ir^2\pi \tag{3.4}$$

$$\mu_l = \frac{-ev}{2\pi r} r^2\pi \tag{3.5}$$

$$\mu_l = \frac{-evm_e}{2m_e} r. \tag{3.6}$$

U izrazu možemo primijetiti kutnu količinu gibanja, $L = m_e rv$ ($\vec{L} = m_e\, \vec{r} \times \vec{v}$) pa (3.6) postaje

$$\mu_l = \frac{-e}{2m_e} L, \tag{3.7}$$

a vektorski [7]

$$\overrightarrow{\mu_l} = \frac{-e}{2m_e} \vec{L}. \tag{3.8}$$

Iz Bohrovog kvantnog uvjeta i 3. Bohrovog postulata koji iskazuje da su stacionarna stanja elektrona u atomu kvantitizirana i dana određenim uvjetom [10]

$$L = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar, \tag{3.9}$$

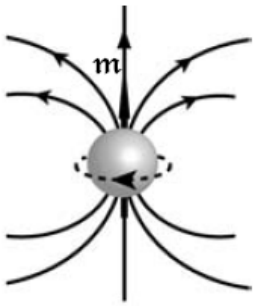
gdje je $h = 6{,}62606896 \cdot 10^{-34}$ Js Planckova konstanta, $\hbar = 1{,}054571628 \cdot 10^{-34}$Js reducirana Planckova konstanta, a *n* cjelobrojni višekratnik za koji ćemo uzeti da je *n*=1,

izraz (3.8) postaje

$$\mu_l = \frac{-e}{2m_e}\hbar = -\mu_B. \tag{3.10}$$

Veličinu μ_B nazivamo Bohrov magneton, označava jedinicu za opisivanje atomskog magnetnog momenta, a iznosi $\mu_B = 9{,}274 \cdot 10^{-24}$J/T. [11]

Magnetskom momentu pridonosi i spin $\vec{s}$ koji elektron posjeduje.



Slika 3: Magnetski moment povezan spinskim kutnim momentom elektrona [10]

Spinski magnetski dipolni moment elektrona dan je izrazom

$$\mu_s = \frac{-e}{m_e}s, \tag{3.11}$$

odnosno vektorski

$$\overrightarrow{\mu_s} = \frac{-e}{m_e}\vec{s}. \tag{3.12}$$

I orbitalni magnetski dipolni moment (3.10) i spinski magnetski dipolni moment (3.12) imaju jednaku strukturu svojih relacija, a razlika je u tome što je spinski magnetski dipolni moment dvostruko učinkovitiji zbog spinskog kvantnog broja. Spinski moment elektrona iznosit će $1{,}00116\mu_B$. [9]

Atomska jezgra posjeduje spinski magnetski moment te također doprinosi ukupnom magnetskom momentu. Ako pogledamo relaciju (3.12) vidimo da se u nazivniku razlomka nalazi masa elektrona pa će i spinski magnetski moment jezgre biti obrnuto proporcionalan s

masom. Znamo da je masa elektrona puno manja od mase jezgre pa je samim time spinski magnetski moment jezgre puno manji od spinskog momenta elektrona pa ga vrlo često zanemarujemo. [7]

Možemo zaključiti da pri opisu atomskog podrijetla magnetizma uzimamo u obzir zbrajanje doprinosa svih elektrona čime dobivamo vektorski zbroj ukupnog magnetskog i spinskog momenta elektrona te malim dijelom spinskog momenta jezgre.

Magnetizaciju, koju označavamo vektorom $\vec{M}$, možemo definirati kao rezultantni dipolni moment jediničnog volumena, a nastaje djelovanjem elementarnih magnetskih dipola. [7] U vakuumu magnetsko polje opisat ćemo vektorima polja $\vec{B}$ i $\vec{H}$ koje možemo povezati jednostavnim izrazom

$$\vec{B} = \mu_0 \overrightarrow{H}, \tag{3.13}$$

gdje je $\vec{B}$ magnetska indukcija, $\vec{H}$ jakost magnetskog polja, a koeficijent proporcionalnosti $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\mathrm{Hm}^{-1}$ označava magnetsku permeabilnost vakuuma.

Ukoliko sagledavamo magnetski materijal, u obzir uzimamo i magnetizaciju te se izraz (3.13) komplicira zbog moguće razlike u iznosu i orijentaciji vektora $\vec{B}$ i $\vec{H}$ zbog prisustva $\vec{M}$ te postaje

$$\vec{B} = \mu_0\left(\vec{H} + \vec{M}\right), \tag{3.14}$$

gdje je s $\vec{M}$ označen vektor magnetizacije.

U nekim slučajevima $\vec{M}$ i $\vec{H}$ su međusobno paralelni pa je veza između jakosti magnetskog polja $\vec{H}$ i magnetizacije $\vec{M}$ linearna stoga izraz pišemo kao

$$\vec{M} = \chi \vec{H}, \tag{3.15}$$

gdje koeficijent proporcionalnosti χ nazivamo magnetskom susceptibilnošću.

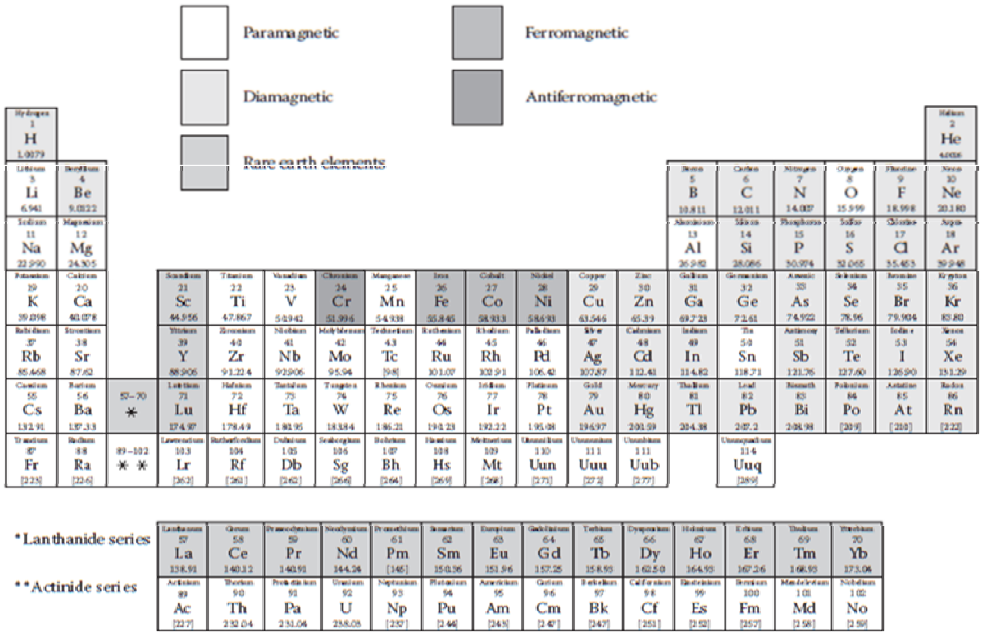
Ako izraz (3.15) ubacimo u izraz (3.14), linearna veza između $\vec{B}$ i $\vec{H}$ će opstati te dobivamo kako je

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\overrightarrow{H}, \tag{3.16}$$

gdje $(1 + \chi)$ prepoznajemo kao relativnu permeabilnost, odnosno pišemo $\mu_r = (1 + \chi)$, a izraz (3.16) postaje [12]

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \overrightarrow{H}. \tag{3.17}$$

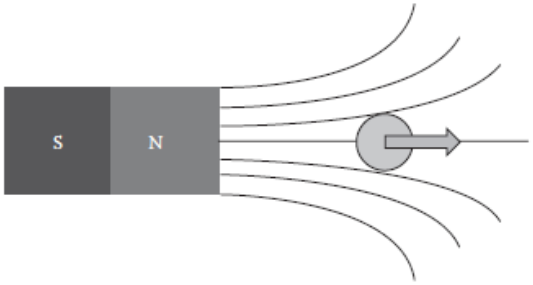
Materijale i tvari možemo podijeliti na pet skupina sagledavajući njihovo ponašanje u magnetskom polju: dijamagnete, paramagnete, feromagnete, antiferomagnete te ferimagnete. Svojstva pojedinih tvari određivat će upravo iznos i predznak već spomenute magnetske susceptibilnosti te njezina ovisnost o temperaturi. Svaku od pojedinih kategorija objasnit ćemo nadalje u radu, a slika 4 prikazuje kojim skupinama pripadaju pojedini elementi periodnog sustava elemenata.



Slika 4: Periodni sustav elemenata [13]

3.1. Dijamagnetizam

Postavimo li materijal unutar vanjskog magnetskog polja postoji mogućnost da će se on ili privući ili odbiti od primijenjenog polja, a odgovor na pitanje što će se točno dogoditi leži u magnetskoj susceptibilnosti. Ukoliko nam je smjer vanjskog magnetskog polja suprotan od smjera inducirane magnetizacije tada pričamo o dijamagnetizmu, a materijal takvih svojstava odbijat će se prema području gdje je magnetsko polje što slabije. [13] Dijamagnetni materijali posjeduju magnetsku susceptibilnost negativne vrijednosti, veličine reda 10^{-5}. [14]



Slika 5: Ilustracija ponašanja dijamagneta u magnetskom polju [13]

Općenito gledajući, dijamagnetizam je svojstvo svih tvari, atoma i molekula, ali je efekt dosta slab stoga ga često nadmašuju jača magnetska djelovanja poput paramagnetizma ili feromagnetizma. S druge strane, dijamagnetizam se često zamjenjuje i s riječi „nemagnetičan“ zbog nepoznavanja njegovih osnovnih svojstava. Dijamagnetizam zapravo je slabi oblik magnetizma. Također je bitno naglasiti da dijamagnetizam može doći do izražaja samo ako atomi u osnovnom stanju nemaju permanentan magnetski dipolni moment.

Podrijetlo dijamagnetizma pronalazimo unutar atoma, kod orbitalnog kretanja elektrona, u potpuno popunjenim atomskim energijskim podljuskama gdje se magnetsko djelovanje poništava. Nadalje, primijenimo li vanjsko magnetsko polje na taj atom uzrokovat ćemo promjenu elektronskog gibanja oko jezgre. Gibanje elektrona oko jezgre poistovjećujemo sa strujnom petljom (Poglavlje 3). Kada tome pridodamo magnetsko polje, nastat će dodatna električna struja koja će inducirati magnetske momente suprotne orijentacije od smjera vanjskog magnetskog polja. Uzročnik takve orijentacije je Lenzovo pravilo, a magnetski momenti nastali primjenom vanjskog magnetsko polja eliminiraju razlog svog nastanka. [13]

Kutna brzina rotiranja elektrona u slobodnom atomu dana je izrazom

$$w_0 = \frac{v}{r}, \tag{3.18}$$

gdje je v iznos brzine gibanja, a r polumjer kružnice.

Ako zatim atom postavimo u vanjsko magnetsko polje, moramo upotrijebiti tako zvani Larmorov teorem koji nam kaže da u magnetskom polju orbitalni moment impulsa $\vec{I}$ kreće rotirati oko smjera magnetskog polja takozvanom Larmorovom frekvencijom

$$w_L = \frac{eB}{2m}, \tag{3.19}$$

gdje je B oznaka za magnetsku indukciju.

Inducirana struja koja nastaje kao posljedica primjene vanjskog magnetskog polja dana je izrazom

$$I = \frac{-e}{T_L} = -\frac{e^2 B}{4\pi m}, \tag{3.20}$$

gdje $T_L = \frac{2\pi}{w_L}$ označava period Larmorova gibanja.

Magnetski momenti proizvedeni strujom dani su izrazom

$$\mu = IP, \tag{3.21}$$

gdje je s $P = \pi\rho^2$ označena površina dobivene projekcije elektronske staze na ravninu okomitu na magnetsko polje.

Služeći se nadalje koordinatnim sustavima i ravnopravnošću osi kao konačno rješenje prosječnog induciranog magnetskog momenata dobivamo

$$\bar{\mu} = -\frac{e^2 B}{6m}\,\overline{r^2}, \tag{3.22}$$

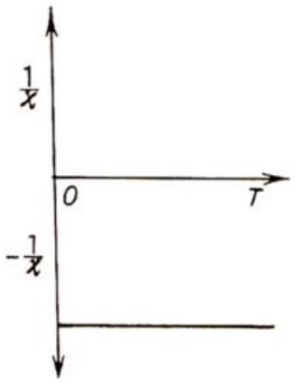
gdje $\overline{r^2}$ označava prosječnu vrijednost kvadrata udaljenosti težišta elektronskog oblaka od jezgre.

Sljedeći korak je zbrojiti sve prosječne vrijednosti tih magnetskih momenata elektrona te ih pomnožiti s koncentracijom atoma kako bi dobili magnetizaciju. Nakon toga prisjetit ćemo se izraza (3.13) iz kojeg izvlačimo magnetsku indukciju B, a zatim i izraza (3.15), iz kojeg ćemo

izvući magnetsku susceptibilnost χ gdje ćemo umjesto M uvrstiti prethodno spomenutu magnetizaciju. Izraz koji slijedi označava magnetsku susceptibilnost dijamagneta:

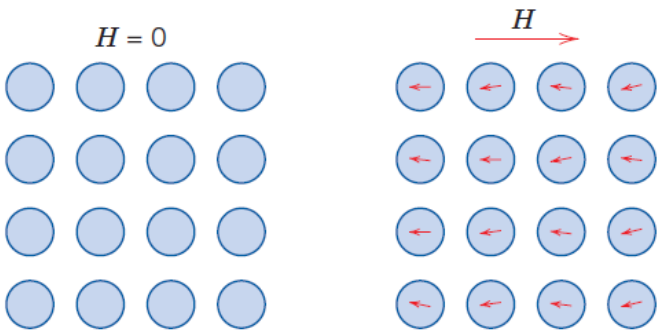
$$\chi_d = \frac{M}{H} = -\frac{e^2\mu_0}{6m}\sum_i \overline{r^2}. \tag{3.23}$$

Ono što dobivamo, dokaz je da je magnetska susceptibilnost dijamagnetnih materijala negativna te objašnjava nastanak njihovih svojstava [7]. Za razliku od ostalih skupina koje ćemo spomenuti, dijamagnetizam gotovo uopće neće ovisiti o temperaturi.



Slika 6: Ovisnost magnetske susceptibilnosti dijamagneta o temperaturi [14]

Prikaz ponašanja magnetskih momenata u dijamagnetima sa i bez primijene magnetskog polja prikazano je na slici 7.



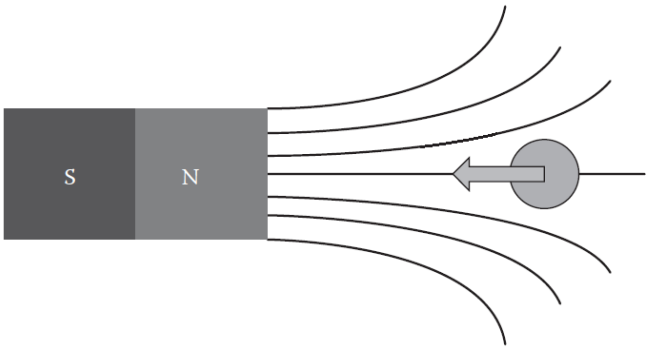
Slika 7: Ilustracija magnetskih momenata kod dijamagneta [6]

Primjera dijamagneta ima mnogo, većina nemetala, organskih spojeva i podosta metala nalaze se u ovoj skupini. Najjači efekt dijamagnetizma posjeduju pirolitički ugljik i bizmut, a osim njih možemo nabrojati još i neke najpoznatije kao vodu, dijamant te mnoge metale poput zlata, cinka i žive. [13]

Najzanimljivija primjena dijamagneta je svakako magnetska levitacija. Magnetsku levitaciju najljepše i najjednostavnije možemo uočiti koristeći jaki dijamagnet i neodimijske magnete. Budući da se živo tkivo također ubraja u dijamagnete, moguće je izvesti i levitaciju živog organizma, ali s primjenom mnogo jačeg magnetskog polja. Na sveučilištu u Nizozemskoj 2010. godine demonstrirana je magnetska levitacija žabe primjenjujući magnetsko polje iznosa 16 T [13].

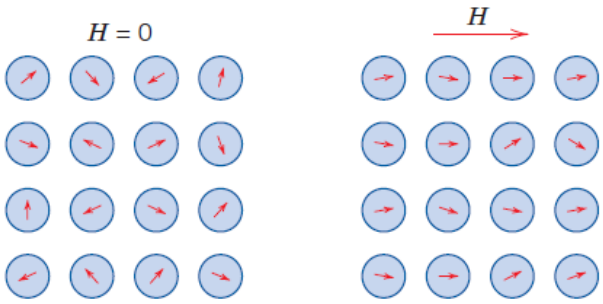
3.2. Paramagnetizam

Općenito gledajući, paramagnetizam je svojstvo koje je vrlo rašireno te se mnogi elementi na sobnoj temperaturi mogu nazvati paramagnetnim materijalima. Prisjetimo li se ranijih objašnjenja magnetizma, odnosno da unutar atoma gibanje elektrona oko jezgre stvara električnu struju, a zatim da ona inducira magnetsko polje, možemo zaključiti da elektroni djeluju poput permanentnih magnetskih dipola. [7] Ako na paramagnet primijenimo jače vanjsko magnetsko polje uočit ćemo da će smjer inducirane magnetizacije paramagneta i smjer primijenjenog magnetskog polja biti jednako orijentiran. Zbog toga će paramagnet biti privučen u područje gdje je magnetsko polje jače. [13]



Slika 8: Ilustracija ponašanja paramagneta u magnetskom polju [13]

Podrijetlo nastanka paramagnetizma objašnjava se različitim teorijama za različite materijale. Prvo ćemo promatrati Langevinov model paramagnetizma, odnosno atomski paramagnetizam. Ova teorija objašnjava nam kako paramagnetizam nastaje kod nesparenih elektrona. Većina elektrona u atomima sparena je s elektronom suprotno orijentiranog spina prema Paulijevom principu. Na taj način magnetski dipolni moment jednak je nuli. Međutim, postoje također i oni elektroni koji nisu spareni s drugima te zbog njih nastaje magnetski dipolni moment različit od nule. Ukoliko nemamo prisutnost vanjskog magnetskog polja, svi magnetski momenti biti će nasumično orijentirani i ukupna magnetizacija na kraju biti će jednaka nuli. Ako zatim primijenimo magnetsko polje na paramagnetni materijal, svi magnetski momenti unutar materijala okreću se u smjeru polja. Nakon što polje prestane djelovati na materijal, paramagneti ne mogu zadržati magnetizaciju, odnosno njihovi se magnetski momenti počnu nasumično okretati sve dok materijal ne postigne termodinamičku ravnotežu kojoj naginju sve tvari.



Slika 9: Ilustracija magnetskih momenata kod paramagneta [6]

Magnetska susceptibilnost paramagneta je mala i pozitivna, reda veličine 10^{-5} do 10^{-3}, a dokaz koji nam to pokazuje jest izraz za magnetizaciju paramagneta koji glasi

$$M = \frac{N\mu_B^2}{k_B T} B, \tag{3.24}$$

gdje je μ_B Bohrov magneton (Poglavlje 3), a $k_B = 1{,}3806 \cdot 10^{-23}\mathrm{JK}^{-1}$ Boltzmannova konstanta uz uvjet da je $k_B T \gg \mu_B B$, odnosno da je termička energija mnogo veća od magnetske energije. Ovaj uvjet ispunjen je pri visokim temperaturama koje su pogodne za proučavanje zbog činjenice da što je viša temperatura, to je otklon magnetskih dipola od smjera

vanjskog magnetskog polja veći, magnetizacija je manja te postaje proporcionalna s magnetskom indukcijom što znači da je veza linearna i lakša za objasniti. [7]

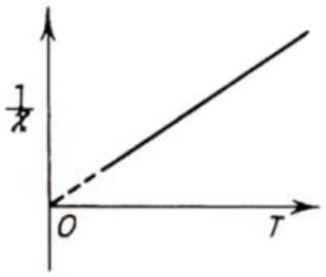
Prisjetimo li se zatim izraza (3.13) kojeg uvrštavamo u izraz (3.24), dobivamo konačan izraz za magnetizaciju paramagneta

$$M = \frac{N\mu_0\mu_B^2}{k_B T} H, \tag{3.25}$$

gdje za magnetsku susceptibilnost paramagnetnog materijala dobivamo

$$\chi_p = \frac{N\mu_0\mu_B^2}{k_B T}. \tag{3.26}$$

Ono što prvo uočavamo jest da je magnetska susceptibilnost paramagneta zaista pozitivna, a zatim možemo primijetiti da je obrnuto proporcionalna s temperaturom, odnosno da će o njoj i ovisiti. [7]



Slika 10: Ovisnost magnetske susceptibilnosti paramagneta o temperaturi [14]

Obrnuta proporcionalnost magnetske susceptibilnosti s temperaturom nazivamo Curieov zakon za paramagnetizam koji nam prikazuje kako će se s povećanjem temperature magnetska susceptibilnost paramagneta smanjivati:

$$\chi_p = \frac{C}{T}, \tag{3.27}$$

gdje je C Curieova konstanta, a T termodinamička temperatura. [7]

Za objašnjenje paramagnetizma postoji i Paulijev model. Najjednostavnije rečeno, ovaj model upotrebljava se kod materijala koji posjeduju i slobodne elektrone, odnosno metala. Slobodni elektroni nazivaju se još i vodljivim elektronima u kojima se pod utjecajem vanjskog

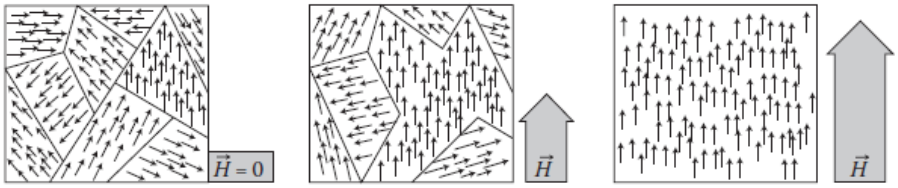
magnetskog polja stvara neuravnoteženost spinova orijentiranih prema gore i dolje što će naposljetku dati slabu magnetizaciju u smjeru magnetskog polja. Kod ovakvih materijala magnetska susceptibilnost neće ovisiti o temperaturi. [8]

Budući da paramagneti nemaju stalnu magnetizaciju koja je različita od nule, njihova primjena nije baš široka. Unatoč tome, zanimljiva primjena je ona za postizanje ekstremno niskih temperatura pomoću adijabatske demagnetizacije. Ako paramagnet ohladimo na temperaturu oko 4 K, u prisustvu jakog magnetskog polja, skoro svi spinovi elektrona orijentirat će se u smjeru magnetskog polja. Ako je paramagnet toplinski izoliran te počnemo postupno smanjivati magnetsko polje, spinovi se počinju orijentirati nasumično, a temperatura paramagneta će nastaviti padati što nas dovodit do postizanja ekstremno niskih temperatura. [13]

Neke najpoznatije tvari koje se smatraju paramagnetima su soli metala, alkani metala, aluminij, magnezij, platina, tantal, volfram, ali i mnogi plinovi poput zraka, kisika i drugih. [14]

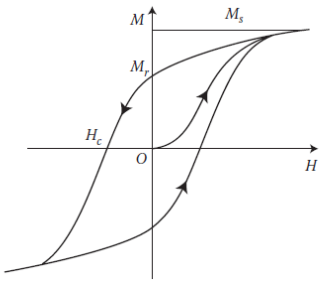
3.3. Feromagnetizam

Većini najpoznatija skupina na koje možemo podijeliti tvari i materijale su feromagneti. Univerzalno svojstvo feromagnetskih materijala je velika spontana magnetizacija koja ostaje prisutna čak i kod odsustva vanjskog magnetskog polja. [7] Unutrašnjost feromagneta sastoji se od malih područja, veličine reda 10^{-9} m, koje nazivamo domenama, a sastoje se od niza atoma koji posjeduju magnetske momente. Svaka od tih domena orijentacijski je uređena, a rezultat te uređenosti dovodi do spontane magnetizacije materijala. Domene su međusobno odvojene takozvanim zidovima, gdje vektor magnetizacije može promijeniti svoj smjer prelazeći iz jedne domene u drugu, onu susjednu. [13] To znači da će svi magnetski momenti unutar jedne domene prije primijene nekog vanjskog magnetskog polja biti isto orijentirani, ali će biti različite orijentacije od na primjer susjedne domene pa će ukupan magnetski moment biti jednak nuli. Formiranje domena nastaje zbog težnje sustava za smanjenjem energije koja će biti sve manja ako je sustav podijeljen na više podsustava. [7]



Slika 11: Ilustracija domena bez polja, s malim poljem te jakim poljem [13]

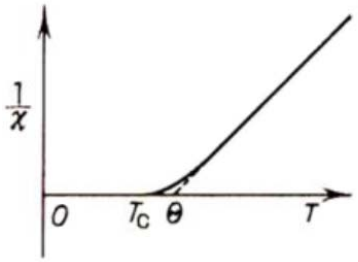
Objašnjenje magnetiziranja makroskopskog uzorka feromagnetnog materijala opisujemo krivuljom histereze.



Slika 12: Krivulja histereze [13]

Kod opisivanja krivulje histereze krećemo s povećanjem magnetskog polja (H) čime dobivamo krivulju prvog magnetiziranja te dolazimo do saturacije magnetskog polja gdje su sve domene usmjerene u smjeru vanjskog magnetskog polja kojeg smo primijenili na uzorak. Daljnje povećanje polja neće povećati magnetizaciju (M) materijala, odnosno nalazimo se u točki zasićenja. Ako zatim smanjujemo magnetsko polje na nulu dolazimo do točke koja se naziva remanentnom magnetizacijom (M_r). Iako je polje jednako nuli, magnetizacija materijala ostaje te se samo neke domene orijentiraju nasumično. Nakon toga polje povećavamo u suprotnom smjeru te dolazimo do točke gdje je magnetizacija jednaka nuli, a nazivamo ju koercitivno polje (H_c). Sve domene ovdje se orijentiraju nasumično što objašnjava ukupnu magnetizaciju koja je nula. Nastavimo li povećavati polje u istom smjeru opet ćemo doći do saturacije, odnosno zasićenja, ovoga puta u suprotnom smjeru. Proces se, nadalje, nastavlja istim tokom. Krivulja magnetske histereze objašnjava jedinstveno ponašanje feromagnetnih materijala koja će za različite feromagnete imati različit oblik i veličinu. [15]

Magnetska susceptibilnost za feromagnete je pozitivna, reda veličine od 10^0 do 10^6, a ovisit će o temperaturi te jakosti i frekvenciji primijenjenog magnetskog polja. [14]



Slika 13: Ovisnost magnetske susceptibilnosti feromagneta o temperaturi [14]

Magnetizacija feromagnetnog materijala maksimalnog je iznosa pri temperaturi apsolutne nule. [7] Zagrijavanjem materijala, magnetizacija se smanjuje sve dok ne dođemo do temperature koja se naziva Curieova temperatura. Pri Curieovoj temperaturi, struktura domena unutar feromagneta se uništava te uzorak postaje paramagnet. Vrijednost Curieove temperature različita je za različite materijale.

Ispod vrijednosti Curieove temperature, magnetsku susceptibilnost određujemo prema Curie-Weissovom zakonu

$$\chi = \frac{C}{T - T_C}, \tag{3.28}$$

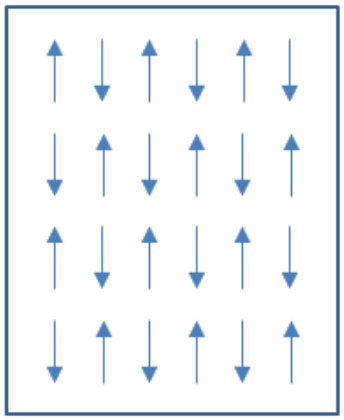
gdje s C označena Curieova temperatura. Promatrajući izraz (3.28) možemo uočiti sličnost s izrazom (3.27), odnosno Curieovom zakonom za određivanje magnetske susceptibilnosti paramagneta. [7]

Pod feromagnetne tvari ubrajamo željezo, kobalt, nikal, gadolinij, većinu njihovih legura te neke legure mangana, bizmuta, bakra, aluminija i kositara. [14]

Upotreba feromagneta je vrlo velika u području elektronike i elektroničkih uređaja. Upotrebljavaju se za izradu elektromagneta, transformatora, električnih motora, generatora i slično. [16]

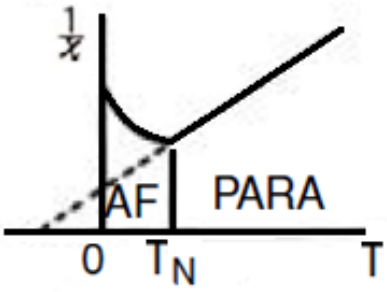
3.4. Antiferomagnetizam

Antiferomagnetni materijali zanimljivi su jer posjeduju uređene magnetske momente unutar domena i bez prisustva magnetskog polja stoga možemo reći da su poseban slučaj feromagnetizma. Pri temperaturi apsolutne nule magnetski momenti u domenama orijentirani su antiparalelno te su međusobno jednakih iznosa stoga je njihova ukupna magnetizacija jednaka nula. [17]



Slika 14: Ilustracija magnetskih momenata kod antiferomagneta [18]

Magnetska susceptibilnost antiferomagnetnih materijala uvijek je pozitivna, ali malog iznosa, reda veličine 10^{-2}, te će ovisit o temperaturi, a na koji način prikazano je na slici 15. [14]



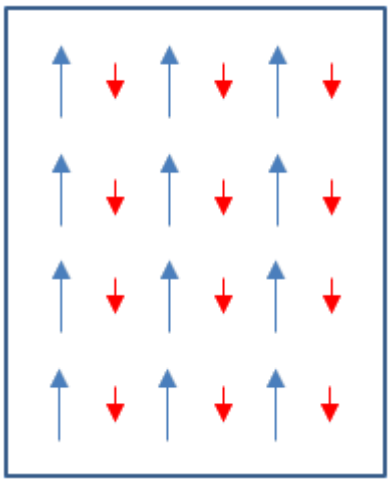
Slika 15: Ovisnost magnetske susceptibilnosti antiferomagneta o temperaturi [9]

Temperatura pri kojoj poznato uređenje antiferomagnetnih materijala nestaje, naziva se Neelova temperatura, a naziv je dobila prema Louisu Neelu, francuskom fizičaru, koji je otkrio antiferomagnetizam te je za svoj rad dobio priznanje u obliku Nobelove nagrade. [19] Povećanjem temperature, magnetska susceptibilnost raste te dolazi do svoga maksimuma pri Neelovoj temperaturi, a smanjuje se iznad i ispod nje. Kada temperatura prijeđe specifičnu Neelovu temperaturu za određeni materijal, taj materijal postaje paramagnetni te će njegova magnetska svojstva bit postojana samo u prisustvu vanjskog magnetskog polja. [13]

Antiferomagnetski materijali su općenito najrjeđi između ovih pet skupina na koje smo podijelili tvari. Kao primjere možemo nabrojati krom, mangan, hematit, odnosno željezni oksid te kemijski spojevi kisika s manganom, kobaltom te niklom. [20] Jedini materijal koji je pri sobnoj temperaturi antiferomagnet jest krom, a njegova pripadajuća Neelova temperatura iznosi 37 °. [13]

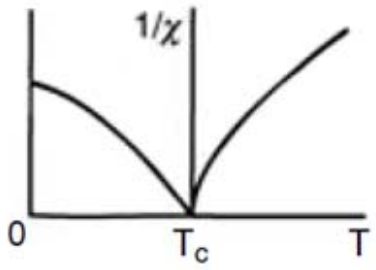
3.5. Ferimagnetizam

Ferimagnetni materijali također posjeduju magnetizaciju te su poseban slučaj spoja antiferomagnetizma i feromagnetizma. Ono što je specifično za ferimagnetne materijale jest da kao i kod antiferomagneta njihovi magnetski momenti su antiparalelni jedni s drugim, ali u ovom slučaju imaju različite iznose pa poput feromagnetičnih materijala, ferimagneti posjeduju spontanu magnetizaciju, ali puno manjeg iznosa od one koja se javlja kod feromagneta. [13]



Slika 16: Ilustracija magnetskih momenata kod ferimagneta [18]

Magnetska susceptibilnost ferimagnetinih materijala je pozitivna i velika, reda veličine od 10^0 do 10^4, te ovisi o temperaturi. Ovisnost o temperaturi prikazana je na slici 17. [14]



Slika 17: Ovisnost magnetske susceptibilnosti ferimagneta o temperaturi [9]

Ferimagneti, kao i feromagneti, prelaze u paramagnetno stanje ukoliko im temperatura prijeđe kritičnu, Curievu temperaturu. [8]

Magnetit je jedan od primjera ovakve vrste materijala iako se prije otkrića ferimagnetizma i antiferomagnetizma smatrao feromagnetom. Nadalje, primjere ferimagnetnih tvari možemo pronaći kod željezovih oksida formule nalik MFe_2O_4, gdje umjesto M pišemo dvovalentne ione nikla, cinka, kadmija, mangana ili magnezija. [21] Materijale ovakvih svojstava najviše upotrebljavamo u tehnici i inženjerstvu, kao jezgre zavojnica unutar memorije računala te izolatore u strujnim krugovima. [22]

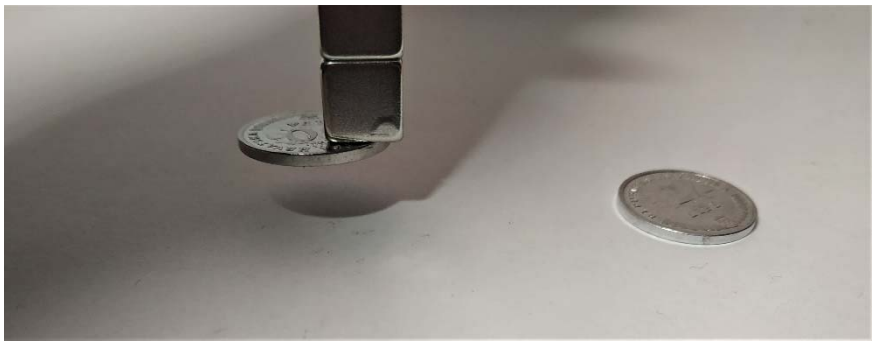
4. Demonstracijski pokusi

Potaknuta iskustvom u školstvu te saznanjima ostalih kolega nastavnika, dijamagnetizam i paramagnetizam rijetka su pojava demonstracija u školama. Najčešći pokusi uvijek se rade s feromagnetima jer je njih najlakše pokazati i objasniti. Međutim to ne mora biti tako. U ovom dijelu diplomskog rada prikazani su vrlo jednostavni demonstracijski pokusi koji uključuju prikaz ponašanja dijamagneta i paramagneta u vanjskom magnetskom polju. Ovi pokusi još se mogu i pojednostaviti, u smislu opreme, te iskoristiti tijekom metodičke jedinice vezane za magnetizam. Rezultati pokusa potkrijepljeni su teorijom navedenom kroz poglavlje 3.

Pogledajmo prvo općenito ponašanje feromagneta i paramagneta kada ih približimo magnetu čije magnetsko polje je relativno jako. Kao pribor upotrijebit ćemo neodimijske magnete, kovanicu od dvije lipe te kovanicu od 50 lipa. Kovanica od dvije lipe služit će nam kao paramagnet jer je načinjena većinski od aluminija, a kovanica od 50 lipa poslužit će nam kao feromagnet jer je iskovana od čelika, nikla i željeza. Kada magnete približimo paramagnetu (kovanici od dvije lipe), vidnog međusobnog privlačenja neće biti.

Slika 18: Približavanje magneta kovanici od dvije lipe (paramagnet)

Međutim, čim ovakav magnet počnemo približavati feromagnetu (kovanici od 50 lipa), privlačenje je vidno i vrlo jako. Dakle, uočavamo veliku razliku u njihovim ponašanjima.



Slika 19: Približavanje magneta kovanici od 50 lipa (feomagnet)

Osim toga vrlo jednostavno možemo uočiti da kada feromagnet odmaknemo od magneta, on ostaje magnetiziran. Ukoliko uzmemo sedam čeličnih podložaka matica, oni će se približiti magnetu. Ako ih odmaknemo dalje od magneta možemo uočiti kako su prsteni ostali magnetizirani.

Slika 20: Prikaz prisutnosti magnetizacije feromagneta i nakon odmaka od magneta

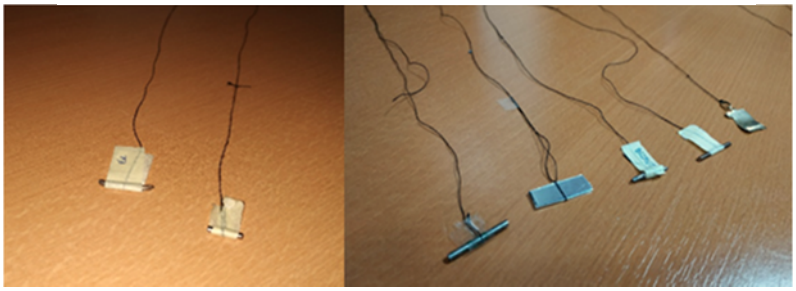
U sljedećem pokusu vidjeti ćemo kako će se paramagnetni materijal ponašati kada ih postavimo u jače magnetsko polje.

4.1. Ponašanje materijala u magnetskom polju – dijamagneti i paramagneti

Pribor korišten pri izvedbi demonstracijskog pokusa:

- stativ
- kukica, mufe
- šina, stativi
- neodimijski magneti
- teslametar
- sonda
- različiti materijali (volfram, bakar, aluminij, zlato, bizmut, željezo, magnet)

Slika 21: Pribor korišten pri izvedbi pokusa



Slika 22: Željezo, magnet, volfram, aluminij, bizmut, bakar, zlato

Demonstracijski pokus prvo smo postavili, složili stativ pomoću mufa i kukice te šinu pričvrstili za stol kako bismo imali stabilan postav. Nakon toga na svaki stativ na šini pričvrstili smo šest većih i dva manja neodimijska magneta koje smo osigurali plastičnom trakicom kako

bi ostali na svom mjestu. Ovakav postav ukazuje nam na vrlo jednostavnu pripremu demonstracijskog pokusa sa priborom koji većina školskih ustanova može osigurati. Na početku izmjerili smo magnetsko polje pomoću teslametra i sonde. Magnetsko polje bez magneta iznosilo je - 0,02 mT kao što je prikazano na slici 23.

Slika 23: Mjerenje magnetskog polja prije primijene polja

Zatim smo približili magnete na željenu udaljenost (otprilike 3 cm) te opet izmjerili magnetsko polje, a iznos koji smo dobili bio je 191 mT + 2 mT.

Slika 24: Mjerenje magnetskog polja između neodimijskih magneta

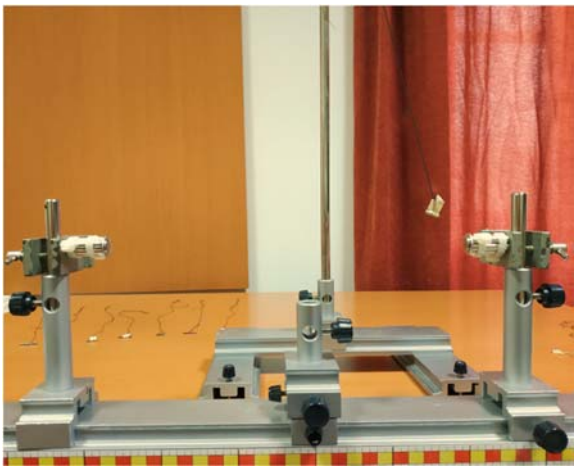
Budući da smo sada provjerili koje polje možemo dobiti i je li ono dovoljno za željeni efekt, možemo započeti s demonstracijskim pokusom.

Svaki od prethodno nabrojanih materijala privezat ćemo na konac koji neće imati utjecaja od strane magnetskog polja stoga neće smetati dobivenim rezultatima. Jedan po jedan materijal objesit ćemo na stalak za kukicu tako da slobodno visi. Stativ ćemo približiti šini na kojoj se nalazi postav neodimijskih magneta. Materijal postavimo paralelno sa šipkom te pričekamo da se smiri i prestane s gibanjem. Nakon toga jednomjerno pomičemo magnete i s jedne i s druge strane te promatramo što se događa s materijalom koji smo izložili magnetskom polju. Neke od materijala postavimo i okomito sa šipkom kako bismo i na taj način vidjeli utjecaj magnetskog polja.

Za početak je bitno znati kako se određeni materijali ponašaju u tom magnetskom polju. Počet ćemo s običnim komadićem magneta. Čim magnetić objesimo i približimo šipci vidno uočavamo djelovanje magnetskog polja na velikoj udaljenosti, odnosno komadić magneta počet će titrati.

Slika 25: Uzorak magneta

Kada približimo jedan stativ na kojemu se nalazi skupina magneta, komadić će se približiti. Zatim vratimo stalak u početni položaj te postupak ponovimo s drugim stativom. Rezultat koji dobivamo jest jednak kao i prije.



Slika 26: Ponašanje uzorka magneta u magnetskom polju

Slika 27: Ponašanje uzorka magneta u magnetskom polju

Osim primjera s magnetom, napravit ćemo pokus i s komadićem željeza. Željezo je materijal koji spada u feromagnete. Komadić željeza postavimo na stalak te stalak približimo šini. Uzorak zatim namještamo u ravninu i pričekamo da se smiri. Čim počnemo s jednomjernim približavanjem stativa s magnetima, željezo počne titrati.

Slika 28: Uzorak željeza

Rezultat demonstracije je isti kao i prethodni, ali učinak je slabiji. Približim li jedan stativ bliže željezu ono će se privući i „priljubiti“ uz magnete. Vratim li u početni položaj i približim drugi stativ dogodit će se ista situacija.

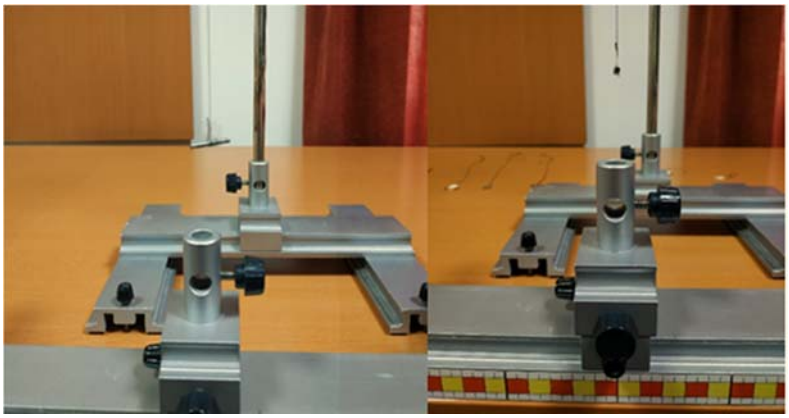
Slika 29: Ponašanje uzorka željeza u magnetskom polju

Slika 30: Ponašanje uzorka željeza u magnetskom polju

Iz gornjih primjera možemo zaključiti da se magnet i željezo ponašaju specifično u magnetskom polju. Budući da je karakteristika feromagneta da u prisustvu magnetskog polja te nakon njegovog djelovanja i sam postane magnetičan, komadić željeza ponaša se identično kao i komadić magneta.

Ovaj demonstracijski pokus bazira se na ponašanju paramagnetski i dijamagnetskih materijala u magnetskom polju stoga nam je bilo bitno provjeriti i feromagnetske materijale kako bismo znali kakve su razlike u njihovim ponašanjima i je li nam pokus uspio.

Prvi materijal koji ćemo promatrati je volfram. Volfram je metal sivkaste boje, velike tvrdoće i vrlo visokog tališta. Možemo ga pronaći u starim električnim žaruljama jer se od njega izrađivala žarna nit. Također se koristi kao legura za električne kontakte, elektroda za varenje i razno [23]. Komadić volframa objesimo za stalak te približimo šipci. Kako bi što bolje vidjeli utjecaj magnetskog polja na volfram, okrenuli smo ga paralelno sa šinom u prvom pokušaju, a zatim okomito na šinu (slika 31).



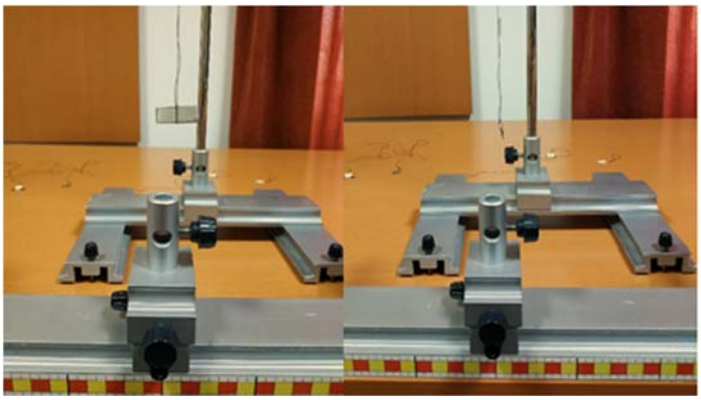
Slika 31: Uzorak volframa

Volfram je paramagnetni materijal što znači da bi se trebao usmjeriti u smjeru magnetskoga polja ukoliko ga tom polju izložimo. Jednoliko približavamo stative na kojima se nalaze magneti te promatramo što se događa. Uočavamo da je volfram u prvom pokušaju ostao paralelno sa šinom, odnosno ostao je u smjeru magnetskog polja. U drugom pokušaju, kada smo ga postavili okomito, volfram se počeo okretati sve dok nije došao u položaj prikazan na slici 32. I u prvom i u drugom pokušaju dobili smo isti rezultat. Volfram se usmjerio kao i magnetsko polje koje nastaje između magneta kada ih približimo jedno drugome.

Slika 32: Ponašanje uzorka volfama u magnetskom polju

Iz slike 32 možemo zaključiti da smo potvrdili činjenicu da je volfram paramagnetni materijal.

Drugi materijal koji ćemo promatrati jest aluminij. Aluminij je lak, mekan i kovak metal. Sam po sebi ima vrlo široku primjenu zbog svoje praktičnosti, ali i izgleda. Upotrebljava se pri izradi limenki, bačvi, folija, kućanskih pomagala, a ugrađuje se i u avione, vozila, strojeve i slično. [23] Kao i volfram, aluminij je paramagnetni materijal koji bi se trebao usmjeriti u smjeru polja ukoliko ga postavimo u njega. Krećemo s pokusom isto kao i u prethodnim primjerima. Komadić aluminija objesimo na stalak koji približimo šini. Postavimo aluminij prvo paralelno sa šinom, a u drugom pokušaju okomito (slika 33).



Slika 33: Uzorak aluminija

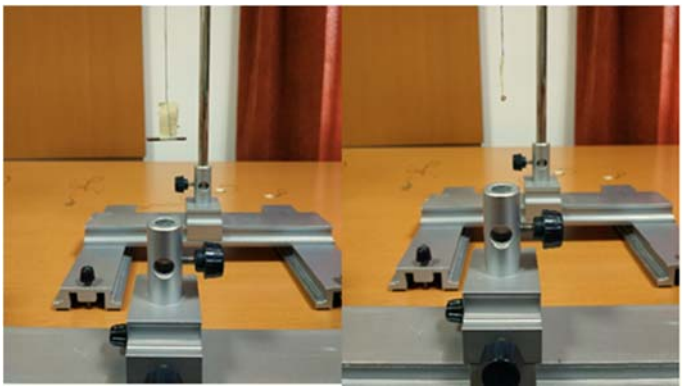
Kada aluminij postavimo u željene položaje približavamo jednoliko oba stativa na kojem se nalaze magneti. Kako približavamo stative uočavamo kako u prvom pokušaju aluminij ostaje u istom položaju, paralelno, a u drugom pokušaju se polagano okreće sve dok ne dođe u položaj kao na slici 34.

Slika 34: Ponašanje uzorka aluminija u magnetskom polju

Opet smo u oba slučaja dobili isti rezultat što nas dovodi do zaključka da je i aluminij zaista paramagnetni materijal.

Sljedeći materijal je bakar. Bakar je crvenkasti, lako obradiv metal velike električne vodljivosti zbog čega se gotovo uvijek upotrebljava kod električnih instalacija i elektronike pa mu je primjena vrlo široka [23]. Bakar je dosta zanimljiv materijal za ovakve demonstarcijske pokuse. Naime, različiti spojevi bakra imaju različita svojstva, odnosno neki su paramagnetni, a neki dijamagnetni materijali.

Komadić bakra postavili smo na stalak te stalak približili šini. Bakar smo postavili opet prvo paralelno sa šinom, a zatim okomito budući da za ovaj materijal ne možemo biti sigurno koji rezultat ćemo zapravo dobiti stoga je najbolje provjeriti u oba slučaja.



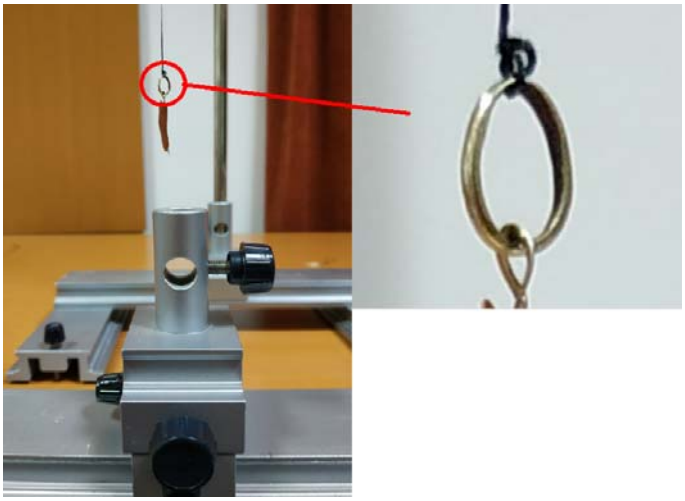
Slika 35: Uzorak bakra

Jednoliko približavamo stative s magnetima te promatramo što će se dogoditi. U prvom slučaju komadić bakra ostaje paralelan sa šipkom što znači da je usmjeren u smjeru magnetskoga polja. U drugom slučaju uočavamo kako se bakar lagano okreće te dobivamo isti rezultat kao i u prvom slučaju. Ono što možemo zaključiti jest da je naš uzorak bakra paramagnetni materijal. Rezultat pokusa vidimo na slici 36.

Slika 36: Ponašanje uzorka bakra u magnetskom polju

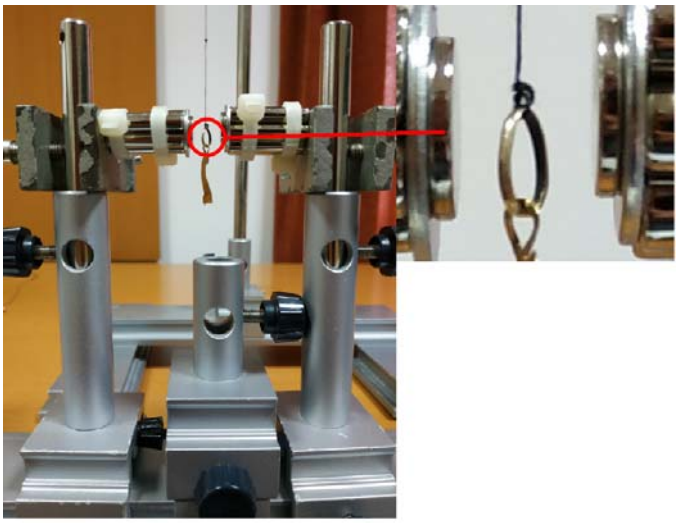
Materijal koji ćemo sada promatrati je zlato, metal žute boje, visokog sjaja, mekan i težak. Vrlo je otporan na utjecaje zraka, vode, lužina i kiselina. Najpoznatija upotreba zlata je svakako u svrhu izrađivanja različitog nakita i poluga, a koristi se i u elektronici, bojanju stakala te kao reflektor topline. [23] Uzorak zlata koji koristim je tipično 14 karatno zlato što označava da je udio zlata zapravo 58,5 posto, odnosno da je uzorak legura. Usprkos tome, postotak zlata je dovoljan da dobijemo željeni efekt. Postupak pokusa opet ponavljamo, postavimo zlatnu

pločicu, koja se nalazi okačena na karici, na stalak te ga privučemo šini. Uzorak nikako nije bio idealan, ali za potrebe demonstracije može poslužiti. Zlato smo postavili na način da se baziramo na kariku, a ne na pločicu jer se maleni utjecaj polja vidi bolje na taj način. Kariku smo postavili u početku paralelno sa šinom, odnosno tako da bude usmjerena u smjeru magnetskog polja.



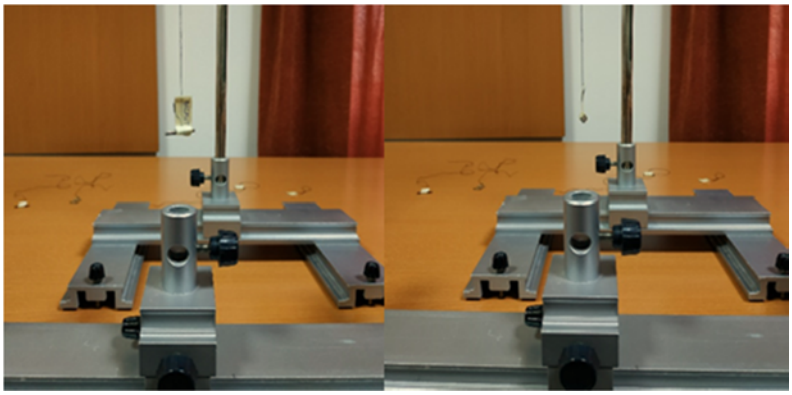
Slika 37: Uzorak zlata

Stative s magnetima jednoliko približavamo materijalu te opažamo što će se dogoditi. Uočavamo kako se zlatna karika blago otklanja od polja. Zlato je dijamagnetni materijal te je rezultat demonstracije to i pokazao. Kao što je napisano u poglavlju, dijamagnetni materijali odbijaju se od magnetskog polja, odnosno neće pokleknuti njegovu utjecaju. Kada bi uzorak bio čišće zlato te kada bi njegov oblik bio štapićast kao i ostali uzorci, demonstracija bi bila uspješnija.



Slika 38: Ponašanje uzorka zlata u magnetskom polju

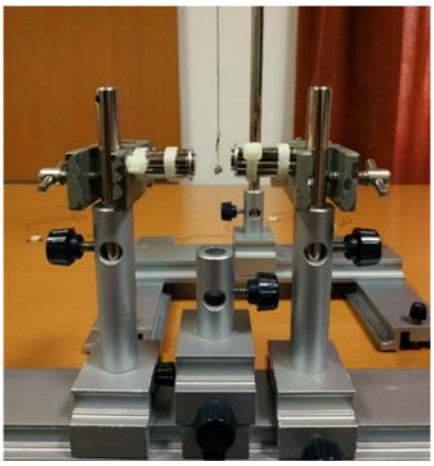
Zadnji materijal koji proučavamo na ovakav način je bizmut, krhak metal srebrnog sjaja. Sam po sebi vrlo se često upotrebljava, ali ne samostalan. Cijenjen je kao kovina zbog lakog taljenja, a koristi se u elektronici, tiskarstvu, farmaciji, kozmetici te pigmentima. [23] Komadić bizmuta objesili smo na stalak te stalak približili šini. Opet ćemo sagledati uzorak iz dva kuta. Prvo ćemo ga postaviti paralelno sa šinom, a zatim okomito na nju.



Slika 39: Uzorak bizmuta

U oba slučaja povlačimo stative na kojima se nalaze magneti jednoliko prema uzorku. U prvom pokušaju, kada je bizmut postavljen paralelno sa šinom, uočavamo kako se bizmut okreće od polja, odnosno usmjerio se u suprotnom smjeru od magnetsko polja kojeg smo primijenili. U drugom pokušaju, uzorak ostaje isto orijentiran odnosno ponovio se isti rezultat kao u prvom slučaju (slika 40). Zaključujemo da je bizmut također dijamagnetni materijal te da se na njemu

vrlo lijepo može vidjeti kako se dijamagneti ponašaju kada se na njih primijeni magnetsko polje. Razlog tome je taj što je bizmut jedan od materijala kod kojeg je dijamagnetno svojstvo dosta izraženo.



Slika 40: Ponašanje uzorka bizmuta u magnetskom polju

Iako je ovaj demonstracijski pokus vrlo lagan za izvesti, donosi nam očite zaključke. Paramagnetni materijali se u magnetskoga polja usmjeravaju u smjeru primijenjenog magnetskog polja, dok će se dijamagnetni materijali otklanjati od njega, odnosno usmjerit će se okomito na smjer magnetskog polja.

Ovakvi pokusi su vrlo efektni, zahvalni i zanimljivi, a dovoljno jednostavni i poučni da se primijene unutar nastave fizike. Učenici bi promatranjem pokusa lagano mogli doći do zaključaka kako se koji materijali ponašaju unutar magnetskog polja te bi dobili priliku da vizualno dožive što znači kada je materijal paramagnet ili dijamagnet.

4.2. Levitacija grafita – prikaz ponašanja dijamagneta u magnetskom polju

Još jedan demonstracijski pokus koji prikazuje ponašanje dijamagneta u magnetskom polju jest levitacija grafita. Ovakav pokus može se vrlo lagano napraviti tijekom nastave, a uz to vrlo je zanimljiv i poučan te će učenicima na jednostavan način prikazati svojstva dijamagnetnih materijala.

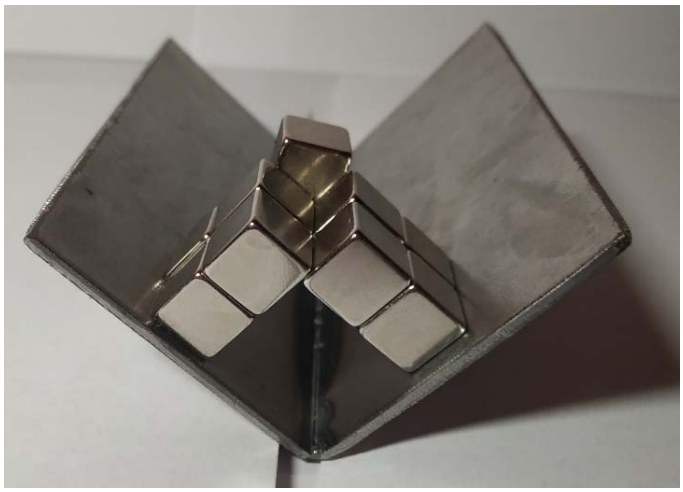
Pribor korišten pri demonstracijskom pokusu: [24]

- Željezni lim L-profila
- 9 kubičnih neodimijskih magneta
- uložak za tehničku olovku promjera 0,35 mm

Slika 41: Pribor korišten pri izvedbi pokusa

Bitna stavka demonstracijskog pokusa jest da se koriste ulošci za tehničku olovku što manjeg promjera budući da se oni izrađuju dodavanjem male količine željeza u grafit pa veći promjer uloška umanjuje dijamagnetska svojstva.

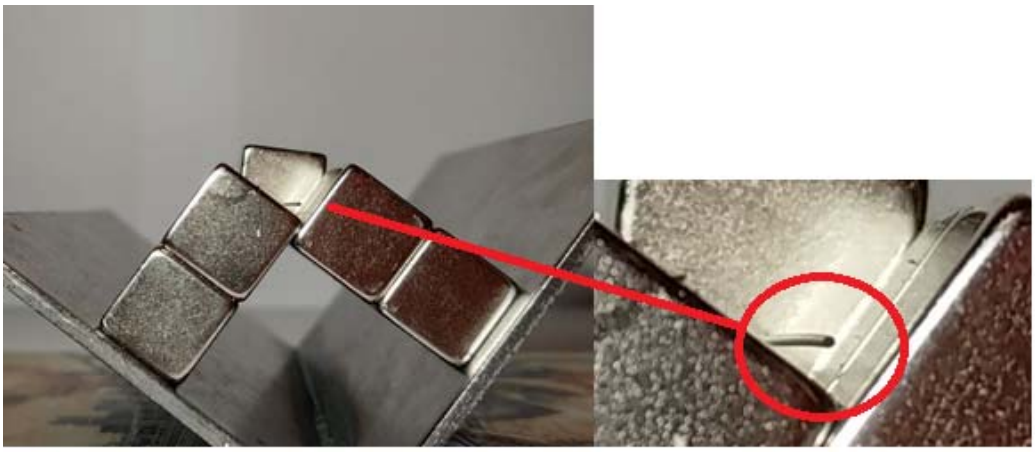
Pokus započinjemo postavljanjem neodimijskih magneta na željezni lim L-profila pazeći da polove magneta postavimo pravilno. Za određivanje polova možemo koristiti drugi magnet s čijom smo orijentacijom polova upoznati.



Slika 42: Postav neodimijskih magneta

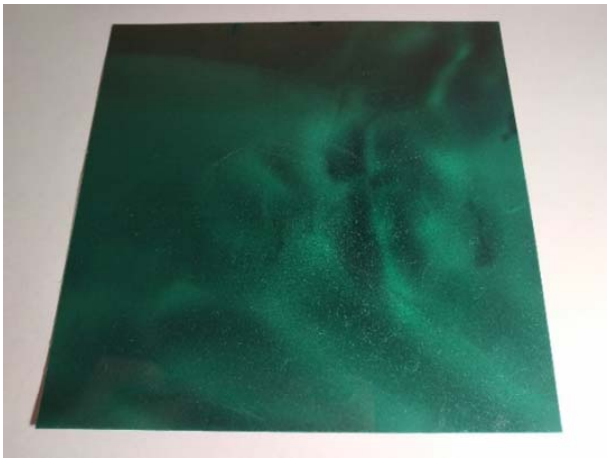
Uložak tehničke olovke postavimo na magnete te promatramo što će se dogoditi. Uočavamo da uložak levitira iznad magneta. Dijamagnetni grafit stvara magnetsko polje suprotnog usmjerenja magnetskog polja koji stvaraju neodimijski magneti te se odbija od njih i efekt koji vidimo jest levitacija. Na slici 43 i 44, vidimo rezultat demonstracijskog pokusa gdje se željeni efekt iznimno dobro može uočiti iz različitih kutova.

Slika 43: Levitacija grafita



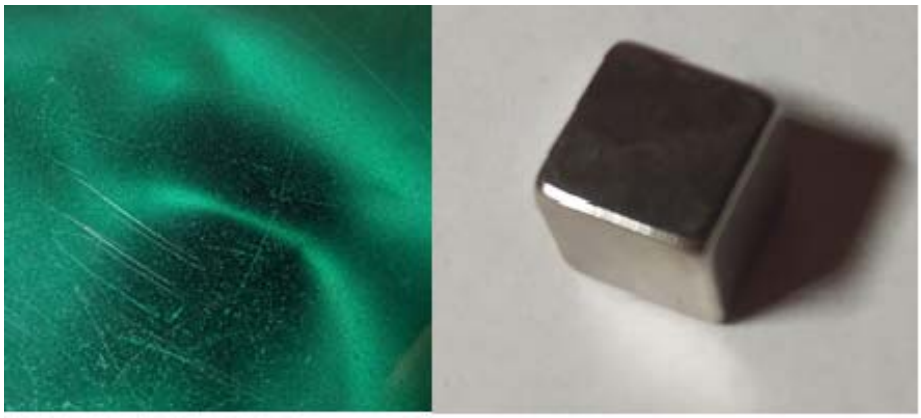
Slika 44: Uvećani prikaz levitacije grafita

Kako bi se uvjerili u postojanje magnetskog polja neodimijskih magneta koristit ćemo se magnetnim filmom. Magnetni film koristi se za prikaz stalnog magnetskog polja, općenito je to list zelene boje, pomalo proziran i fleksibilan. Sastoji se od mikro kapsula koje sadrže sitne komadiće nikla otopljenih u ulju. [25]



Slika 45: Magnetni film

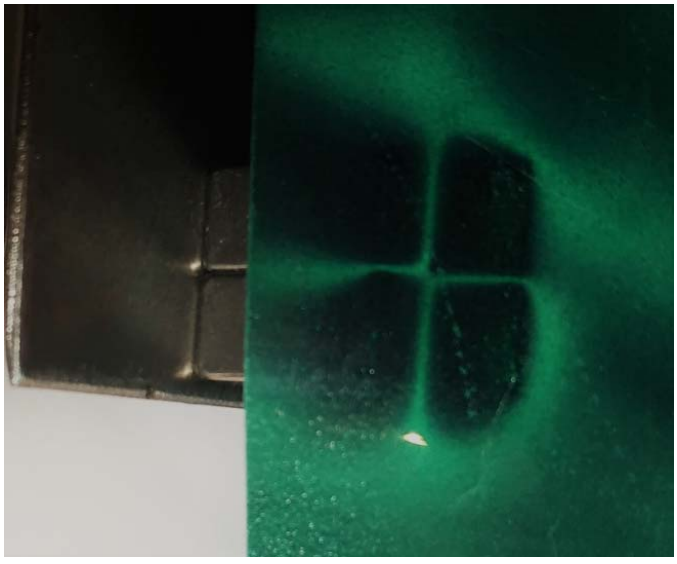
Kada se magnetni film postavi na magnet, pojavljuje se zatamnjenje. Ako su polovi magneta smješteni jedan do drugoga tada će se između zatamnjenog dijela pojaviti svijetla linija koja će ukazivati prostor gdje se polovi susreću. Primjer kako se magnetni film ponaša postavljen na samo jedan neodimijski magnet vidimo na slici 46. [25]



Slika 46: Magnetsko polje jednog neodimijskog magneta

Iako se magnetni film ne može koristiti za raspoznavanje magnetskih polova, dovoljan je sam prikaz postojanja magnetskog polja.

Postavili smo magnetski film na postav iz demonstracijskog pokus te dobili vrlo lijepi uvid u magnetsko polje koje dobivamo. Slika 47 prikazuje magnetsko polje koje nastaje upotrebom 9 neodimijskih magneta položenih kao u postavu. Tamna područja predstavljaju magnetsko polje čije su silnice okomite na magnetski film, a područja gdje su magnetske silnice paralelne s površinom magnetskog filma prikazat će se kao svijetle linije.



Slika 47: Magnetsko polje postava demonstracijskog pokusa

Obje vrste demonstracijskih pokusa daju nam uvid u ponašanje dijamagneta i paramagneta u vanjskom magnetskom polju. Ovi pokusi su dokaz kako se ponašanja takvih materijala mogu prikazati i objasniti na toliko jednostavan, a vrlo zanimljiv način te da bi se svakako trebali početi upotrebljavati u školstvu. Učenici će zasigurno ovakvim vizualnim načinom napokon shvatiti kako se dijamagneti i paramagneti razlikuju od tipičnih feromagneta koji su općenito jedini materijali iz tih kategorija, a da se zapravo pokazuju učenicima. Kao što sam napomenula već u uvodu, motivacija za ovaj diplomski rad bila je pokazati upravo tu jednostavnost i mogućnost uvođenja u metodičke jedinice demonstracijski prikaz ponašanja dijamagneta i paramagneta u magnetskom polju.

5. Metodička jedinica

Škola:	Srednja škola, smjer: gimnazija	***Razred:***	3. (treći)
***Mjesto**:*	-		
Mentor:	-		
Student:	Ivana Bakoška	***Smjer:***	-
Datum:	-		

***Nastavni predmet**:*	Fizika
***Nastavna cjelina**:*	Magnetske pojave. Elektromagnetizam.
Nastavna jedinica:	Magnetske pojave

SADRŽAJNI PLAN:

Redni broj	Podjela nastavne cjeline	Broj sati	
		Teorija	Vježbe
1./2.	Magnetske pojave	2	0
3./4.	Magnetski tok. Magnetska indukcija. Oerstedov pokus.	1	1
5./6.	Djelovanje magnetske sile na električnu struju – Amperova sila	1	1
7./8.	Magnetska sila na električki nabijenu česticu – Lorenzova sila	1	1
9.	Magnetsko polje i strujne petlje	1	0
10.	Strujna petlja u magnetskom polju	1	0
11./12.	Faradayev zakon elektromagnetske indukcije. Samoindukcija	1	1
13./14.	Ponovimo i povjerimo znanje	0	2
15.	Pisana provjera znanja (teorija)	1	0
16.	Pisana provjera znanja (zadaci)	0	1
17.	Analiza pisane provjere znanja	0	1

OČEKIVANA POSTIGNUĆA UČENIKA I NJIHOVO VRJEDNOVANJE

Cilj nastavne jedinice:

Osposobiti učenike za opisivanje svojstva feromagneta, dijamagneta i paramagneta, magnetskog polja, magnetskog polja Zemlje.

Ključni pojmovi:

Magnet, magnetske domene, magnetsko polje, silnice magnetskog polja, feromagneti, dijamagneti, paramagneti, magnetsko polje Zemlje

Obrazovna (spoznajna) postignuća: [26]

Učenik će biti sposoban:

- Opisati svojstva magneta i magnetskog polja
- Razlikovati feromagnete, dijamagnete i paramagnete
- Opisati magnetsko polje Zemlje

Funkcionalna (psihomotorička) postignuća : [26]

Učenik će biti sposoban:

- Poticati primjenjivanje ranije stečenih znanja
- Izvoditi demonstracijske pokuse prikaza ponašanja feromagneta, dijamagneta i paramagneta u vanjskom magnetskom polju
- Primijeniti fizikalne zakonitosti u svakodnevnom životu
- Poticati bilježenje i logičko zaključivanje

Odgojna (afektivna) postignuća (vrijednosti, stavovi, navike) : [26]

Učenik će biti sposoban:

- uvažiti tuđi način razmišljanja i zaključivanja
- prakticirati pozitivan odnos prema radu koji donosi konkretne rezultate
- prihvatiti osjećaj zadovoljstva i vlastite vrijednosti nakon uspješnog razumijevanja gradiva te riješenog zadatka

Način provjere postignuća:

Praćenje učeničke aktivnosti tijekom cijelog sata, razgovor s učenicima, praćenje rješavanja radnog listića, pitanja za ponavljanje

ORGANIZACIJA NASTAVNOG SATA

<table>
<tr><td colspan="4">Tip nastavnog sata: obrada novog gradiva – blok sat</td></tr>
<tr><td>Oblici rada:

-frontalni rad
-individualni rad
-grupni rad</td><td>Nastavne metode:

-metoda usmenog izlaganja
-metoda demonstracije
-metoda razgovora
-metoda crtanja i pisanja</td><td>Nastavna sredstva i pomagala:

-nastavna pomagala: kreda, spužva, školska ploča, pribor za demonstraciju pokusa – magneti različitih oblika, različiti metali i materijali, željezna piljevina, stalak sa kukicom, neodimijski magneti, feromagnet, dijamagnet, paramagnet
-računalo
-projektor</td><td>Korelacija s ostalim predmetima:

-geografija (Zemlja kao magnet, kompas)</td></tr>
<tr><td colspan="4">Literatura za učitelja:

• V. Paar, V. Šips: Fizika 2, udžbenik za drugi razred gimnazije; Školska knjiga, Zagreb, 2001.
• Jakov Labor: Fizika 2, udžbenik za drugi razred gimnazije; ALFA, Zagreb, 2005.
• V. Paar, A. Hrlec, K. Vadlja Rešetar, M. Sambolek: Fizika oko nas 3, udžbenik fizike u trećem razredu gimnazije; Školska knjiga, Zagreb, 2020.
Literatura za učenike:

• V. Paar, A. Hrlec, K. Vadlja Rešetar, M. Sambolek: Fizika oko nas 3, udžbenik fizike u trećem razredu gimnazije; Školska knjiga, Zagreb, 2020.</td></tr>
</table>

TIJEK NASTAVNOG PROCESA (90 minuta)

1. Uvodni dio sata

Početak sata započinjem pozdravom i upitom učenika kako su te jesu li umorni. Svrha pitanja je uvid u atmosferu razreda kako bih dobila dojam kakav tempo sata učenicima odgovara taj dan. Upisujem sat i učenike koji nisu prisutni na nastavi te upalim prezentaciju koja će mi pomoći u izvedbi metodičke jedinice. Svaki sat bitno je postaviti određenu motivaciju koja će služiti kao „odskočna daska“ u nadi da se učenici zainteresiraju za jedinicu koji obrađujemo te općenito za fiziku. Na prezentaciji pokazujem slike ukrasnih magneta, računala, zvučnika, kompas, Zemlje, i kao danas najpopularnije, držača mobitela u automobilu. Upitam učenike jesu li ikada vidjeli ili čuli za stvari prikazane na slici te očekujem, naravno, da jesu. Zatim ih upitam malo više o držaču mobitela, provjeravam znaju li od čega je on napravljen. Nakon što, očekivano, odgovore, upitam ih što misle zašto uz taj magnet dobiju i komadić metala koji će prilijepiti za mobitel te od kojeg bi metala taj komadić mogao biti. Nakon toga pokazujem im sliku levitacije grafita i upitam ih znaju li što ova slika predstavlja i koje materijale možemo uočiti. U ovom dijelu sata dopuštam učenicima slobodno i neometano iznošenje vlastitog mišljenja te im ne govorim jesu li njihovi zaključi točni ili netočni. Budući da imamo 90 minuta za obradu, učenici imaju dovoljno vremena da iznesu svoje ideje te da razmisle o prikazanom. Očekujem da će učenici na početna pitanja odgovoriti točno, ali da će kod levitacije grafita ostati zapanjeni te da će ih to najviše zainteresirati. Nakon provedene diskusije, govorim učenicima kako ćemo kroz sljedeće sate upoznati magnetizam, a da ćemo prvo obraditi uvod te saznati nešto o magnetskim pojavama. Prikazujem naslov na prezentaciji: Magnetske pojave, zapisujem ga na ploču zajedno s datumom, a učenici isto zapišu u bilježnicu.

2. Središnji dio sata (konstruiranje modela)

Upitam učenike znaju li koliko je stara riječ magnetizam. Nakon što poslušam njihove ideje, ispričam im povijesnu priču postanka te riječi. Započinjem s legendom o pastiru Magnesu koji je čuvajući svoje stado primijetio da su mu se čavlići na potplatama sandala prilijepili uz veliki crni kamen na kojemu je stajao. Pastir Magnes jedva se mogao pomaknuti. Kamen na kojemu je stajao sadržavao je u sebi prirodni magnetski materijal kojeg nazivamo magnetit te se vjeruje da od njega potiče riječ magnetizam. Također napominjem da su još u staroj Grčkoj, prije nekoliko tisuća godina otkrili također taj crni mineral, pronađen u blizini grada Magnesisa,

koji je privlačio komadiće željeza pa je moguće da je i po tome gradu magnetizam dobio svoj naziv.

Kako bi učenicima bilo lakše pratiti pokuse i kasnije ih se prisjetiti, podijelim im listiće na kojima se nalaze pitanja vezana za pojedine pokuse. Listići se nalaze u dodatku. Krećemo sa standardnim, najjednostavnijim pokusom (Pokus 1 na listiću), privlačenje predmeta pomoću magneta. Pribor koji nam je potreban za izvedbu ovog pokusa je magnet, različiti materijali (željezni čavlić, čelične zakovice, aluminijska folija, bakrena cijev, novčić, plastika, stiropor, drvo, titanij, srebro, zlato, nikal, kobalt…). Upitam učenike ima li tko zainteresiran za izvedbu pokusa. Ukoliko nema dobrovoljaca, nasumice odaberem jednog učenika te ga vodim kroz pokus, dok ostali promatraju, opažaju i zapisuju što su primijetili. Materijale koje smo odabrali postavimo nasumično na stol. Prije izvedbe pokusa upitam učenike što misle, koje predmete će magnet privući, a koje neće. Poslušamo ideje učenika te počnemo s izvedbom pokusa. Učenik uzima magnet te ga redom približava materijalima koji su rasprostranjeni na stolu. Prije nego magnet približi materijalu, govori o kojem je materijalu riječ. Nakon izvedenog pokusa, zahvalim učeniku na asistenciji te mu kažem da može sjesti natrag na svoje mjesto. Upitam učenike što su zapisali te mogu li zaključiti kako možemo definirati magnete. Učenici iznose svoje ideje te očekujem da su u mogućnosti, na temelju pokusa, samostalno izvesti definiciju magneta. Magnet ćemo definirati kao tijelo koje privlači predmete od željeza, čelika, nikla, kobalta te njihovih legura. Prikažem slajd na kojemu je to zapisano te učenici prepisuju u svoje bilježnice. Nakon toga napravit ćemo prvu podjelu magneta, a to su na prirodne i umjetne. Zapisujemo da su prirodni magneti željezne rude, odnosno magnetit, a da umjetne možemo podijeliti još na permanentne magnete, koji trajno zadržavaju svoja magnetska svojstva, i elektromagnete, koji su izgrađeni od zavojnice i jezgre od mekog željeza, a njegova magnetična svojstva postojat će samo kada zavojnicom prolazi struja. Zatim pokazujem učenicima različite oblike magneta od kojih su najtipičniji u obliku potkove, štapića, pločice te magnetne igle. Magnete proslijedim po razredu kako bi ih svi učenici mogli vidjeti, a zatim im pokažem dva pločasta magneta, obojenih pola plavo, a pola crveno te upitam učenike što će se dogoditi ako približim crvenoj strani magneta plavu stranu drugoga, a što ako crvenoj strani jednog magneta približim crvenu stranu drugog magneta? Ovdje očekujem da će učenici znati iznijeti da svaki magnet ima dva pola: sjeverni (N) i južni (S) jer su to već učili u osnovnoj školi. Također očekujem da će učenici znati zaključiti kako će se isti polovi odbijati, a različiti privlačiti. Nakon iznesenih ideja još jednom ponovim kako između magneta djeluje magnetska sila te da će magnetska sila biti privlačna između raznoimenih polova, a odbojna između istoimenih. To

nam znači da se raznoimeni polovi privlače, a istoimeni odbijaju. Zatim upitam učenike što će se dogoditi ukoliko prepolovim magnet. Ovo je također nešto što su učenici već učili u osnovnoj školi stoga očekujem da će znati odgovoriti kako je magnetske polove nemoguće razdvojiti. Iznosim učenicima kako magnetno tijelo uvijek ima dva pola te da magnet nazivamo dipolom. Pokazujem im magnet koji se razlomio na dva dijela. Govorim kako ćemo uvijek dobiti dva pola magneta bezobzira koliko puta razlomili magnet, a to im i pokažem približavajući razlomljeni dio magneta, magnetu poznatih polova. Postavljam pitanje učenicima možemo li pomaknuti knjigu na stolu ako samo mahnemo rukom ispred nje te što ja moram napraviti ako je želim pomaknuti. Učenici iznose kako se knjiga na taj način neće pomaknuti te da ju moram gurnuti. Zatim ih upitam mora li magnet dotaknuti željezni predmet kako bi se on pomaknuo. Učenici iznose kako to nije potrebno već će se željezni predmet pomaknuti čim magnet dovoljno približimo. Zaključujemo da se oko magneta stvara magnetsko polje, odnosno prostor ili područje u kojemu osjetimo djelovanje magnetske sile. Učenici zapisuju definiciju magnetskog polja. Zatim upitam učenike sjećaju li se kako prikazujemo magnetsko polje. Dolazimo do zaključka kako magnetno polje možemo prikazati pomoću magnetskih silnica koje prikazujemo kao zamišljene krivulje. Magnetske silnice izlaze iz sjevernog pola magneta (N) i ulaze u južni pol magneta (S). Također ističem kako tangenta na silnicu pokazuje smjer magnetskog polja u svakoj točki. Prethodno navedene zaključke učenici zapisuju u bilježnice, a isto to prikazano je i na prezentaciji. Kao drugi pokus predočit ćemo magnetsko polje pomoću magneta i željezne piljevine (Pokus 2 na listiću). Kao i u prvom pokusu, upitam učenike za dobrovoljca koji će asistirati tijekom pokusa, a ukoliko se nitko ne prijavi nasumice odaberem jednog učenika. Upitam učenike što misle da će se dogoditi ako željeznu piljevinu posipam oko magneta? Učenici iznose svoje ideje, a zatim izvodimo pokus. Ravni magnet postavimo na stol te oko njega posipamo željeznu piljevinu i promatramo što će se dogoditi. Učenici uočavaju kako se željezna piljevina orijentira u smjeru magnetskog polja. Zaključujemo da se ona ponaša kao skup malih magnetnih igala. Zatim uzmemo dva magneta, postavimo prvo istoimene polove jedan do drugoga te oko njih posipamo željeznu piljevinu. Učenici uočavaju kako između istoimenih polova nema željezne piljevine, pa zaključujemo da tu magnetske silnice ne postoje. Kada postavimo raznoimene polove, željezna piljevina se nalazi između tih polova pa zaključujemo da su ovdje magnetske silnice prisutne. Uočavamo također da su magnetske silnice negdje gušće poredane, a negdje rjeđe. Objašnjavam učenicima kako je magnetsko polje jače tamo gdje su magnetske silnice gušće poredane. Sva opažanja pokusa i zaključke koje donesemo učenici zapisuju na listić s pripadajućim pokusom kako bi se tijekom učenja lakše snašli i prisjetili pokusa. Zatim definiram homogeno magnetsko polje kao polje koje je u

svakom svom dijelu jednako, magnetske silnice su jednako gusto raspoređene te su međusobno paralelne, a kao primjer spomenemo magnetsko polje između polova potkovičastog magneta. Govorim učenicima kako sam sigurna da znaju da se Zemlja ponaša kao veliki magnet te ih upitam kako to možemo znati. Očekujem da će se učenici sjetiti kako to možemo zaključiti jer se magnetska igla uvijek postavlja u smjeru sjever-jug. Govorim učenicima da se to događa zbog strujanja tekućeg metala u vanjskom dijelu Zemljine kore. Budući da je Zemlja magnet, imat će svoj sjeverni i južni magnetski pol. Upitam učenike poklapaju li se ti polovi s geografskih polovima? Učenici se prisjećaju da se ne poklapaju te da se južni magnetski pol Zemlje nalazi u blizini Sjevernog geografskog pola, a sjeverni magnetski pol da se nalazi u blizini Južnog geografskog pola. Podijelim učenicima listić sa slikom Zemlje te im kažem da označe na slici pojedine polove (listić u dodatku). Objašnjavam učenicima kako se odstupanje geografskog pravca sjever-jug od pravca koji će nam pokazati magnetna igla naziva magnetska deklinacija koja danas iznosi za Hrvatsku 5°34' prema istoku. a kut između osi dipola i osi rotacije Zemlje iznosi 11,3°. Govorim učenicima da si odstupanje zabilježe na slici i koliko taj kut iznosi. Spomenut ćemo još i magnetsku inklinaciju koja nam označava kut što ga magnetska igla zatvara s horizontalnom ravninom u bilo kojoj točki na Zemlji. Podsjećam učenike kako je zbog magnetskog polja kojeg Zemlja posjeduje moguća orijentacija pomoću kompasa.

Sve ovo prethodno gradivo bilo je prisjećanje gradiva iz 8.razreda osnovne škole. Drugi dio blok sata posvetit ćemo se novim saznanjima. Za početak upitam učenike znaju li u čemu je razlika između magnetičnih i nemagnetičnih materijala? Na ovo pitanje ne očekujem točne odgovore, ali dajem učenicima prostora da iznesu svoje ideje kako bih vidjela na koji način razmišljaju. Govorim im kako je razlika u sposobnosti stvaranja i ponašanju magnetskih domena. Upitam ih jesu li ikada čuli za pojam magnetske domene? Objašnjavam učenicima da su domene malena područja, veličine 10^{-9} m, koji se ponašaju kao maleni magneti. Kada pogledamo nemagnetizirano tijelo, njegove domene su nasumično orijentirane pa se njegova magnetska polja poništavaju te se takav materijal neće ponašati kao magnet. Ako zatim takav određeni materijal postavimo u vanjsko magnetsko polje, njegove domene se počinju usmjeravati u smjeru magnetskog polja te se materijal magnetizira. Učenici ukratko zapisuju objašnjeno pomoću prezentacije. Tijekom prethodnog objašnjavanja namjerno sam naglasila da taj materijal mora biti točno određen, a to je zato jer postoji podjela materijala s obzirom na njihova magnetska svojstva. Govorim učenicima kako materijale prema ovoj podijeli dijelimo na dijamagnete, paramagnete i feromagnete. Učenike podijelim u 3 skupine. Svaka skupina dobiva 6 neodimijskih magneta, stalak s kukicom, konac, štapić željeza (feromagnet), štapić

volframa (paramagnet) i štapić bizmuta (dijamagnet). Svakom učeniku podijelim listić na kojemu se nalazi postupak izvođenja pokusa na temelju kojeg moraju zaključiti kako se ponašaju dijamagneti, paramagneti i feromagneti ako ih postavimo u vanjsko magnetsko polje (listić u dodatku). Učenici izvode pokus. Prvo će privezati svaki od materijala na komadić konca te će ga objesiti na kukicu koja se nalazi pričvršćena na stalak. Materijal će postaviti tako da miruje paralelno, a zatim okomito u odnosu na šipku stalka. Sa svake strane materijala zatim približavaju po 3 neodimijska magneta te promatraju što se događa s pojedinim materijalima. Tijekom izvođenja pokusa, pomažem učenicima te ih vodim kroz pokus kako bi dobili što točnije zaključke. Na listić zapisuju što su uočili, a kada završe s izvođenjem pokusa svaka grupa će podijeliti s ostatkom razreda svoja opažanja. Ono do čega učenici trebaju doći jest da će se dijamagnet (bizmut) okrenuti suprotno od smjera magnetskog polja kojeg stvaramo s neodimijskim magnetima, paramagnet (volfram) će se usmjeriti u istom smjeru kao magnetsko polje, a feromagnet (željezo) će se privući magnetima, ovisno kako ih približavamo i udaljavamo jedno od drugoga. Na temelju njihovih pokusa zapisujemo kako je dijamagnetizam fundamentalno svojstvo svih tvari te da nemamo prisustvo magnetizacije kod tvari koje su dijamagnetične, odnosno njihove domene su orijentirane nasumično. Zatim zapisujemo da je paramagnetizam pojava kod koje paramagnetični materijali postaju magneti pri prisustvu vanjskog magnetskog polja, ali nakon što polje nestane, nestaju i njihova magnetska svojstva. Kada je magnetsko polje prisutno domene su orijentirane u smjeru polja, ali kada polje nestane domene se vraćaju nasumičnoj orijentaciji i magnetizacija nestaje. Ostaje nam još zapisati feromagnetizam za koji zaključujemo da kod feromagnetičnih materijala magnetska svojstva ostaju i nakon nestanka vanjskog magnetskog polja te da su njegove domene usmjerene u smjeru magnetizacije, odnosno u smjeru vanjskog magnetskog polja.

3. Završni dio sata

Za kraj sata pred učenike stavljam postav neodimijskih magneta na kojima lebdi komadić grafita, odnosno primjer koji su vidjeli na početku prvoga sata. Govorim im da promotre kakav postav imamo i što opažaju. Za domaću zadaću moraju objasniti što su uočili i zašto levitacija nastaje. Svaki učenik dolazi do postava kako bi izbliza vidio efekt koji je nastao. Na početku idućeg predavanja provjerit ćemo ideje učenika i otkriti jesu li došli do dobrog zaključka te ih na kraju sata srdačno pozdravljam.

Plan ploče

Magnetske pojave

Magneti - tijela koja predmete načinjene od željeza, nikla, kobalta, čelika i njihovih legura

Podjela magneta: prirodni – željezna ruda

umjetni – permanentni i elektromagneti

Magnetsko polje – prostor u kojem se osjeća djelovanje magnetske sile

Magnetsko polje predočavamo zamišljenim krivuljama – **magnetskim silnicama** – izlaze iz N, ulaze u S

Magnetske domene – područja veličine 10^{-9} m koji se ponašaju kao mali magneti.

U nemagnetiziranom stanju - nasumično orijentirane

U magnetiziranom stanju – usmjerene u smjeru magnetskog polja

S obzirom na magnetska svojstva materijala, magnete dijelimo na:

a) Dijamagnetizam – fundamentalno svojstvo svih tvari – domene nasumično orijentirane
b) Paramagnetizam –
   - magnetsko polje prisutno → magneti → domene orijentirane u smjeru polja
   - nestanak magnetskog polja → magnetska svojstva nestaju → domene nasumično orijentirane
c) Feromagnetizam – magnetska svojstva se zadržavaju i nakon nestanka polja → domene orijentirane u smjeru polja

DODATAK – RADNI LISTIĆI

Pokus 1. Privlačenje predmeta različitih materijala pomoću magneta

- Pribor: magnet, željezni čavlić, čelične zakovice, aluminijska folija, bakrena cijev, novčić, plastika, stiropor, drvo, titanij, srebro, zlato, nikal, kobalt

Pitanje: Koje predmete je magnet privukao, a koje ne? Kako možemo definirati magnet?

_____

_____

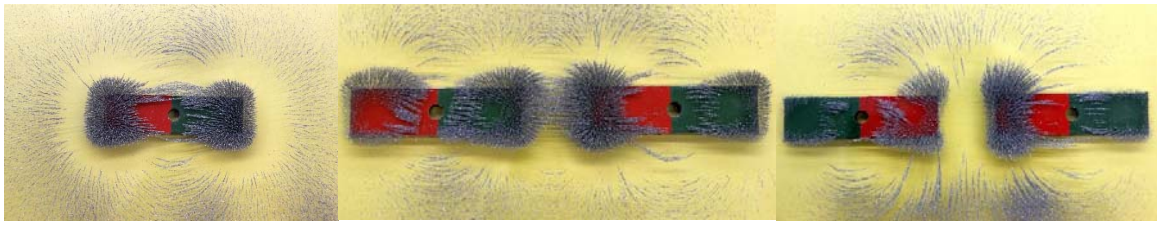
_____

_____

_____

Pokus 2. Magnetske silnice

- Pribor: magneti, željezna piljevina



Zaključak pokusa:

_____

_____

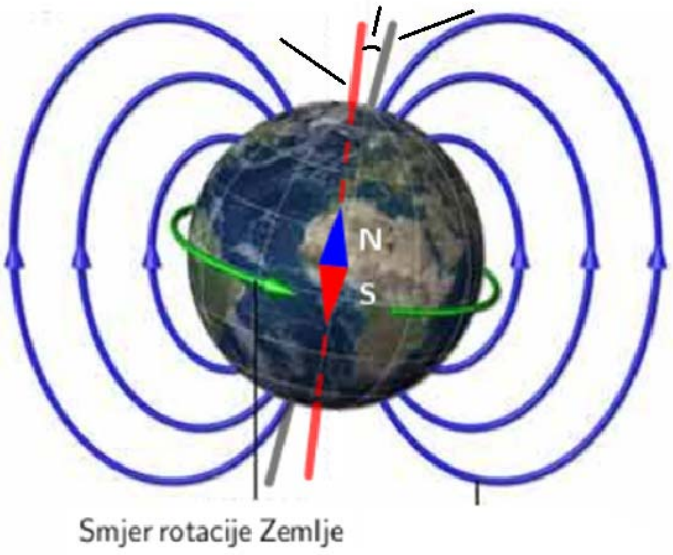
_____

_____

_____

Zemlja kao magnet

Zadatak: Potrebno je označiti magnetske i geografske polove, magnetsko polje te kut deklinacije



GRUPNI RAD – PONAŠANJE PARAMAGNETA, DIJAMAGNETA I FEROMAGNETA U MAGNETSKOM POLJU

Pribor:

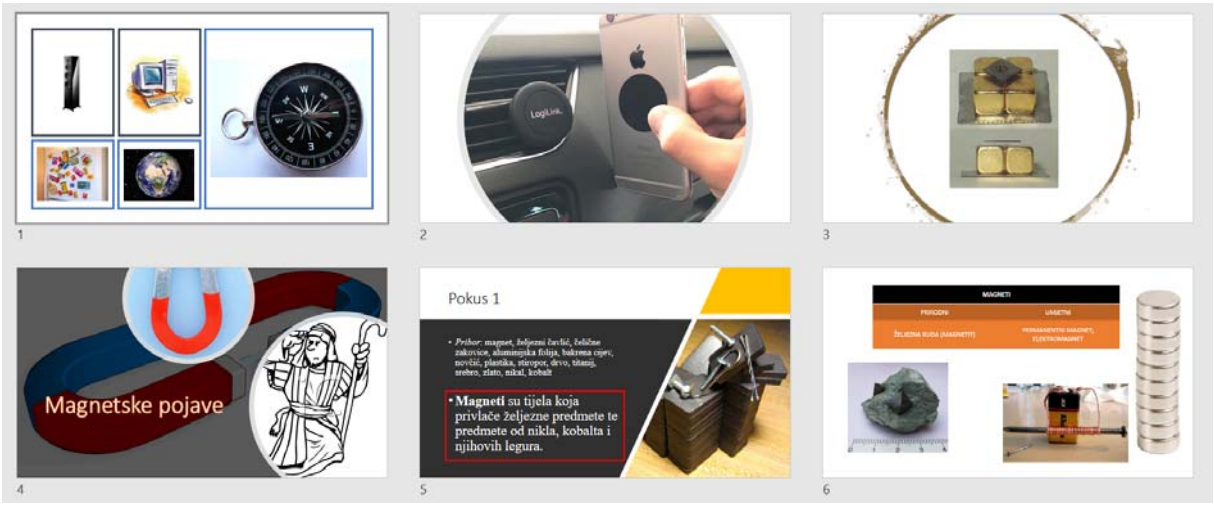
- 6 neodimijskih magneta
- Dijamagnet – bizmut
- Paramagnet – volfram
- Feromagnet – željezo
- Konac
- Stalak s kukicom

Postupak rada:

Na konac privežite jedan od materijala te ga objesite na kukicu koja se nalazi na stalku. Materijal se ne smije gibati na stalku, odnosno mora biti u stanju mirovanja te orijentiran paralelno, a zatim okomito na šipku stalka. Sa svake strane materijala polako i jednomjerno približavajte po 3 neodimijska magneta spojena jedan na drugi. Promatrajte kako se materijali ponašaju u vanjskom magnetskom polju te zapišite svoja opažanja.

Opažanja:

DODATAK – PLAN PROJEKCIJSKOG PLATNA



6. Zaključak

Magnetizam definiramo kao fenomen pojave sile koja može biti odbojna i privlačna, a nastaje zbog gibanja električnog naboja.

Prema ponašanju tvari i materijala u magnetskom polju postoje pet skupina koje možemo promatrati: dijamagnetizam, paramagnetizam, feromagnetizam, antiferimagnetiam i ferimagnetizam, a svaka od njih ima svoja jedinstvena svojstva. Neka od njih možemo i trebali bi smo objasniti tijekom nastave fizike.

Demonstracijski pokusi općenito potiču učenike na razmišljanje i zaključivanje te oblikovanje njihovog kritičkog mišljenja stoga ih treba što više njegovati i prikazivati. Ponašanje materijala u magnetskom polju možemo vrlo jednostavno pokazati unutar nastave fizike upravo pomoću takvih demonstracijskih pokusa. Feromagneti najzastupljeniji su u nastavi, najviše se obrađuju i jedini se prikazuju dok paramagneti i dijamagneti ostaju u njihovoj sjeni kao samo definirani ili još gore, samo spomenuti. U radu su opisana dva demonstracijska pokusa izvedena s priborom koji se vrlo lagano može pronaći, a zaključak koji donose pomoći će učenicima u shvaćanju svojstava i ponašanja dijamagneta i paramagneta u vanjskom magnetskom polju.

Nastavi fizike potrebni su pokusi, bili oni eksperimentalni ili demonstracijski. Na taj način nastava se čini kvalitetnijom, jednostavnijom, ali i zanimljivijom. Izvedba pokusa dobar je pokušaj motiviranja učenika te prikazivanja većinom „teške i nejasne“ teorije primjenom koju će učenici lakše prihvatiti, što je u današnje vrijeme zaista put koji kroji bolju budućnost.

7. Literatura

[1] Sparavigma A.C., *Magnetic_Compasses_and_Chinese_Architectures*, 2017.

[2] URL: http://hua.umf.maine.edu/China/astronomy/tianpage/0017Shen_Kuo_9266w.html (20.10.2020.)

[3] URL: https://povijest.hr/jesteliznali/cetiri-velika-izuma-iz-stare-kine/ (20.10.2020.)

[4] Faj Z., *Pregled povijesti fizike*, Drugo dopunjeno izdanje, Pedagoški fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 1999.

[5] Singh N., Jayannavar A.M., *A Brief history of magnetism*, Physical Reasearch Laboratory, India, 2019.

[6] Callister W. D., Rethwisch D. G., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8th Edition, John Wiley and Sons, 2010.

[7] Šips V., *Uvod u fiziku čvrstog stanja*, Školska knjiga, Zagreb, 1991.

[8] URL: https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/metallurgy/research/Magnetic-Materials-Background/Magnetic-Materials-Background-4-Classification-of-Magnetic-Materials.pdf (26.10.2020.)

[9] Coey J.M.D., *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge University Press, New York 2009.

[10] URL: Nastanak kvantne teorije - Quantum mechanics 1 - Lecture 1 (unios.hr) (3.11.2020.)

[11] Blundell S., *Magnetism in Condensed Matter*, Oxford University Press, New York, 2001.

[12] Getzlaff M., *Fundamentals of Magnetism*, Springer. 2008.

[13] Elizaveta Motovilova, Shaoying Huang. *Magnetic Materials for Nuclear Magnetic Resonance and Magnetic Resonance Imaging from: Advances in Magnetic Materials, Processing, Properties, and Performance* CRC Press, 2017.

[14] Tehnička enciklopedija Jugoslavenskog leksikografskog zavoda. Zagreb. JLZ, 1963- 1997., Sv. 5. 1976.

[15] Bakoška I., *Superparamagnetske nanočestice*, magnetska svojstva i primjena, Završni rad, 2018.

[16] URL: https://www.electrical4u.com/ferromagnetic-materials/ (5.11.2020.)

[17] URL: https://www.slideshare.net/DrMadhavraoDeore/ceramic-materials-1-67135068 (5.11.2020.)

[18] URL: https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/materials-science/material-properties/magnetic-properties-of-materials/ (5.11.2020.)

[19] URL: https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1970/neel/biographical/ (10.11.2020.)

[20] URL: https://winnerscience.com/2011/03/25/examples-of-antiferromagnetic-materials (10.11.2020.)

[21] URL: https://www.britannica.com/science/crystal/Ferrimagnetic-materials (10.11.2020.)

[22] URL: https://winnerscience.com/tag/applications-of-ferrimagnetic-materials/ (10.11.2020.)

[23] URL: http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/w/index.html (15.11.2020.)

[24] URL: https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=diamagnetic-levitation (16.11.2020.)

[25] URL: https://magnametals.co.uk/products/magnetic-field-view-film (17.11.2020.)

[26] URL: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_01_10_210.html (18.11.2020.)

Životopis

Ivana Bakoška rođena je 22.12.1996. godine u Našicama, u Republici Hrvatskoj. Pohađala je Osnovnu školu Ivana Gorana Kovačića u Zdencima. Po završetku osnovne škole upisuje Opću gimnaziju Stjepana Ivšića u Orahovici koju je završila 2015. godine. Iste godine upisuje preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, a završava ga 2018. godine nakon kojeg upisuje diplomski studij fizike i informatike.