

# NEODIMIJSKI MAGNETI NA SATU FIZIKE

Ivica Aviani

*Institut za fiziku, Zagreb, Hrvatska  
Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Splitu, Hrvatska*

**Apstrakt<sup>1</sup>.** Koristeći iskustva stečena u radu s nastavnicima i učenicima te najnovija dostignuća magnetizma, razvili smo niz jednostavnih pokusa s neodimijskim magnetima. Dio pokusa direktno prati nastavne programe u osnovnim i srednjim školama, dok ostatak služi kao temelj za dodatnu nastavu i projektne zadatke. Mnoge fizikalne fenomene moguće je prikazati na dojmljiv način, gotovo kao mađioničarski trik. Tako možemo zainteresirati učenike, a jednom kad ih zainteresiramo, pažljivo će slušati naša objašnjenja. Dakako, uz pokus potrebno je ispričati i zanimljivu priču. Zato sam u ovom tekstu opisao nekoliko osnovnih ideja iz povijesti magnetizma te dao i neka temeljna objašnjenja pojave magnetizma. Iako ću na predavanju predstaviti pokuse iz raznih područja fizike ovaj tekst prvenstveno je posvećen magnetizmu tvari koji nije značajnije zastupljen u kurikulumu.

## UVOD

U svom višegodišnjem radu s nastavnicima i učenicima, kroz radionice i popularna predavanja doživio sam puno veselja susrećući se s nastavnicima entuzijastima i nasmijanim licima učenika. Nekako u isto vrijeme postali su dostupni i vrlo jaki neodimijski magneti. Zahvaljujući njima mnoge fizikalne pojave mogao sam prikazati na jednostavan i dojmljiv način. Ponekad je sve izgledalo kao čarolija, kao mađioničarski trik. Takvi pokusi mogli su zainteresirati učenike, a jednom kad ih zainteresirate, oni će pažljivo slušati objašnjenja. Ovaj rad nastao je s idejom da se stečena iskustva i znanja sistematiziraju te da se izradi motivirajući obrazovni demonstracijski komplet dostupan svima.

Ideje za pokuse nalazio sam na Internetu i u edukacijskim časopisima te sam ih odmah usvajao i uvodio u svoja predavanja i radionice. Za to vrijeme nastajale su i originalne



SLIKA 1. Demonstracijski komplet za magnetizam [2].

ideje, tako da komplet sadrži nekoliko potpuno originalnih pokusa, a brojni pokusi modificirani su i prilagođeni na originalan način.

<sup>1</sup> Dio teksta ovog rada objavljen u radu [1].

Komplet [2] sadrži pribor i upute za izvođenje tridesetak jednostavnih, ali efektnih pokusa, od kojih je nekoliko originalnih, dok je većina originalno prilagođena. Namijenjen je prije svega nastavnicima i učenicima svih uzrasta, ali i fakultetima za upoznavanje s modernim materijalima i značenjem magnetizma u suvremenoj tehnologiji. Nova i neočekivana iskustva trebala bi ponajprije zainteresirati učenika, a zatim ga i upoznati s temeljnim fizičkim konceptima. Kao primjer u ovom tekstu opisana su tri pokusa iz magnetizma tvari s objašnjenjima te jedan primjer iz mehanike.

Einstein je imao samo pet godina kad se susreo s magnetizmom, dobivši svoj prvi kompas. Tog događaja rado se sjeća. Pobudio mu je čuđenje i znatiželju koja se nije gasila do kraja njegova života. Magnetizam će sigurno probuditi radoznalost u svakoj znatiželjnoj duši, a uz odgovarajući pristup može potaknuti radoznalost i istraživački duh mnogih učenika. Ako u tome uspijemo, obavili smo golem posao.

## IZ POVIJESTI MAGNETIZMA

Izraz magnetizam dolazi od riječi *Magnesia* što je predio u grčkoj pokrajini Tesaliji. Stari su Grci tamo pronašli crni mineral koji je privlačio komadiće željeza. Radi se o željeznom oksidu  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (Slika 2) [3].



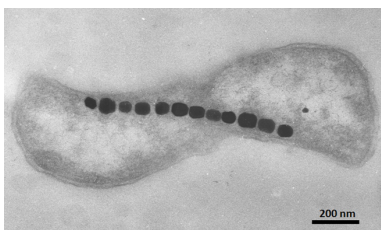
**SLIKA 2.** Najjači prirodni magnet, mineral magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Iz zbirke učila PMF-a u Zagrebu.



**SLIKA 3.** Prvi magnetski kompas iz vremena dinastije Qin (221-206 prije Krista) [4].

Svojim magnetskim poljem njega magnetizira Zemlja a ponekad i munje. Grci su ga koristili za proricanje sreće, a znatno kasnije i za navigaciju. Kinezi su magnetit koristili kao kompas još u drugom stoljeću prije Krista. Prvi poznati kompas sastoji se od komada magnetita oblikovanog u žlicu koja se postavlja na glatku brončanu ploču (slika 3). Kada se brončana ploča zakreće žlica se uvijek postavlja tako da ručka pokazuje na jug. Iduća inačica kineskog kompasa bila je drvena riba na kojoj bi se pričvrstio magnet. Riba je plutala na površini vode i pokazivala sjever. Tek kasnije za kompase koriste magnetizirane igle.

Poznato je da su Vikinzi bili uspješni pomorci te stekli znatnu premoć na moru naročito zbog toga jer su za svoju navigaciju koristili kompas, znatno prije nego što se kompas počeo koristiti u Europi, krajem dvanaestog stoljeća.



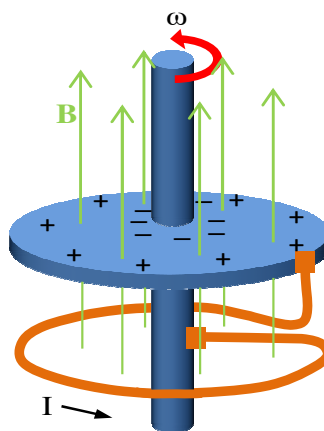
**SLIKA 4.** Slika magnetotaktične bakterije dobivena pomoću transmisijskog elektronskog mikroskopa otkriva niz od dvanaest nanočestica magnetita [5].

Postoje, međutim, živa bića koja za navigaciju koriste kompas već stotinama miliona godina. Najjednostavniji takav organizam je anaerobna magnetotaktična bakterija [5]. Ona može sintetizirati lance magnetskih čestica magnetita koji u nizu funkcioniraju kao magnetska igla. Ovaj nano-kompas služi bakteriji da svoje kretanje usmjeri duž silnica magnetskog polja Zemlje koje su nagnute u odnosu na vodoravnu površinu. To omogućuje mikrobu da zaroni dublje ispod površine gdje ima manje kisika. Takve nano-kompose za navigaciju koriste ptice i mnoga druga bića.

## ZEMLJA KAO VELIKI MAGNET

Sve do 1600 godine nije se znalo koja to sila zakreće kompas prema sjeveru. Tada je Willam Gilbert u svome djelu *De Magnete* pokazao da je i Zemlja veliki magnet te da se igla kompasa zakreće zbog međudjelovanja dvaju magneta, Zemlje i igle.

Ali otkud Zemlji magnetsko polje? Je li to možda zbog toga što joj je jezgra građena uglavnom od željeza? Poznato je da željezo gubi magnetska svojstva kad se zagrije iznad Curieove temperature  $T_C = 1043$  K. Smatra se da središte Zemlje doseže temperaturu od preko 5000 K, a da veliki tlak koji vlada u središtu ne može povećati Curieovu temperaturu toliko da bi željezo bilo magnetično. Dakle željezna jezgra ne može biti razlog Zemljinom magnetizmu. Danas se vjeruje da je pravi razlog tome dinamo efekt. Zemlja je vodič koji se vrti u vlastitom magnetskom polju i tako u svojoj unutrašnjosti inducira električne struje koje onda stvaraju njeno magnetsko polje. Osnovni princip ove teorije ilustrira analogan primjer modela samopobuđujućeg unipolarnog dinama [6]. Pojednostavljeni model prikazan je na slici 5. Model se sastoji od metalnog diska koji rotira u magnetskom polju usmjerenom usporedno osi rotacije. Pod utjecajem Lorentzove sile u disku se radijalno razdvajaju naboji tako da obod diska postaje elektriziran nabojem suprotnim od središta. Žica savinuta oko osi kliznim kontaktima zatvara strujni krug između oboda i središta diska tako da struja koja teče kroz nju stvara magnetsko polje u pravom smjeru. U ovom modelu magnetsko polje i električna struja podržani su vrtnjom Zemlje, no da bi



**SLIKA 5.** Prototip samopobuđujućeg unipolarnog dinama kao moguću model nastanka Zemljinog magnetskog polja.

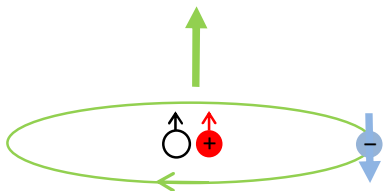
model imao smisla svi dijelovi Zemlje ne smiju se vrtjeti istom kutnom brzinom jer u modelu žica miruje u odnosu na disk. Kad bi se Zemlja kojim slučajem prestala vrtjeti nestalo bi magnetskog polja. To bi bilo pogubno za život jer bi tada Zemlja bila potpuno izložena Sunčevom vjetru, koji bi sasvim otpuhao atmosferu. Smatra se da model dinamika dobro objašnjava nastanak magnetskog polja Sunca te ostalih zvijezda.

## KAKO JE OBJAŠNJEN MAGNETIZAM TVARI

Kraj devetnaestog stoljeća zaokružen je kompletnom teorijom klasičnog elektromagnetizma čiji su vrhunac predstavljaju Maxwellove jednadžbe i objašnjenje elektromagnetskog vala. Međutim magnetizam tvari i dalje je ostao misterija. Ako se izračuna struja potrebna da se jakost polja željeznog magneta proizvede pomoću zavojnice jednakog oblika dobivaju se vrijednosti tisuća ampera. Postojala su pitanja: Teku li u željezu zaista tako velike struje? Ako je tako, zašto se željezo ne rastali? Da bi objasnio feromagnetizam [7] Pierre Weiss 1907. godine uvodi ideju molekularnog (zapravo magnetskog) polja koje djeluje unutar magneta i usmjerava atome željeza u isti smjer te tako omogućava pojavu feromagnetizma. Jasno je da kada termička energija postane približno jednaka magnetskoj energiji željezo gubi svojstvo magneta. Curieva temperatura za željezo iznosi  $T_C = 1043$  K. To bi značilo je Weissovo unutarnje magnetsko polje u željezu iznosi oko 1000 T. Postojanje tako velikog polja u materijalu sasvim je nerealno. Uz sve te probleme, godine 1911. Niels Bohr dokazuje da za elektrone u termodinamičkoj ravnoteži, kad nema gradijenta temperature ili električnog polja, magnetizacija mora biti jednaka nuli. Postalo je jasno da klasična fizika ne može objasniti magnetizam tvari. I onda slijede dva značajna pomaka. Godinu dana kasnije Bohr kvantizira elektronske orbite i povezuje ih s magnetskim momentom atoma. Linearizirajući relativističku Schrodingerovu jednadžbu Dirac 1928. godine objašnjava elektronski spin.

Konačno 1929. godine Dirac i Heisenberg pokazuju da veliko Weissovo molekularno polje zapravo ne postoji. Uređenje magnetskih momenata u feromagnetu posljedica je interakcije izmjene što je zapravo kulonska interakcija modificirana Paulijevim principom. Ona djeluje samo između susjednih atoma i ne proteže se kroz cijeli kristal, zbog čega polje u magnetu ne iznosi nerealnih 1000 T nego tek 1 do 2 T. Magnetizam tvari konačno je objašnjen na zadovoljavajući način.

## ODAKLE ATOMSKI MAGNETIZAM

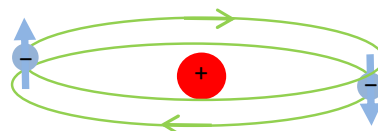


SLIKA 6. Shematski prikaz magnetskih doprinosa u atomu deuterija.

Sada možemo postaviti pitanje što je to najmanji magnet. Je li to atom željeza? S obzirom da se atom željeza sastoji od 26 elektrona i 26 protona te 30 neutrona za početak je bolje uzeti jednostavniji element. Zato ćemo za primjer uzeti izotop vodika, deuterij (Slika 6), koji se sastoji od jednog protona, jednog neutrona i jednog elektrona. Sve navedene čestice su magneti s tim da su magnetski

momenti neutrona i protona, zbog veće mase, oko 2000 puta manji od magnetskog momenta elektrona. Uz to, elektron kruži oko jezgre pa njegovo gibanje, slično kao kod strujne petlje, stvara orbitalni magnetski moment, približno jednakog iznosa magnetskom momentu samog elektrona. Dakle, daleko najveći doprinos magnetizmu tvari stvara elektron. Uz to, elektron je elementarna čestica i time najmanji mogući magnet. S druge strane, neutron i proton sastoje se od još manjih čestica, kvarkova, koji su također najmanji magneti. Dakle najmanji magneti su kvarkovi i elektron s tim da elektron zbog velike jakosti magnetskog polja koje stvara dominira svijetom magnetizma.

Zbog toga, da bismo razumjeli većinu pojava u magnetizmu tvari [7] dovoljno je promatrati elektrone. Složeniji atomi su građeni od velikog broja elektrona koji kruže oko pozitivne jezgre. Pritom elektroni uglavnom popunjavaju slobodne orbitale u blizini jezgre. Ako se dva elektrona vrte u istoj orbitali ali u suprotnim smjerovima i uz to imaju suprotno orijentirane spinove tada se njihov magnetski doprinos potpuno poništava. Atomi koji su građeni od tako popunjenih orbitala nemaju magnetski moment. Međutim, ako u unutrašnjim orbitalama postoje nespareni elektroni takvi atomi pokazuju magnetska svojstva. Takvi su primjerice željezo, nikal i kobalt ali i mnogi drugi.



**SLIKA 7.** Dva elektrona suprotnih spinova i smjerova vrtnje u istoj orbitali poništavaju atomski magnetizam.

## KOLIKO SU JAKI NEODIMIJSKI MAGNETI

Magnetska polja prisutna su svuda oko nas. Dolaze iz različitih izvora i s različitim intenzitetima. Iako su iznimno važna za život svih bića na Zemlji, mi ih svojim osjetilima ne zamjećujemo. Jakost magnetskog polja  $B$  (magnetsku indukciju) izražavamo u jedinicama tesla (T), mjernoj jedinici koja nosi naziv po našem Nikoli Tesli. Da bismo dobili osjećaj o tome koliko iznosi 1 T, razmotrimo neke primjere. Magnetsko polje koje proizvodi čovječji mozak iznosi tek oko  $10^{-12}$  T. Magnetsko polje Zemlje iznosi oko  $3 \cdot 10^{-5}$  T, a polje najjačega stalnog magneta koji su znanstvenici napravili 45 T. Smatra se da udaljene neutronske zvijezde (magnetari) stvaraju najjača polja u svemiru od  $10^{10}$  T. Tipična jakost magnetskog polja u blizini velikoga neodimijskog magneta, koji koristimo u pokusima je oko 0,5 T.

Jakost polja neodimijskog magneta ovisi o njegovoj veličini. Možemo je približno izračunati iz magnetizacije. Magnetizacija je fizička veličina jednaka magnetskom momentu predmeta podijeljenom s njegovim obujmom. Kod većine tvari magnetizacija je jednaka nuli i postaje različita od nule tek kada predmet stavimo u vanjsko magnetsko polje. Stalni magneti se razlikuju od ostalih predmeta po tome što im je magnetizacija različita od nule.

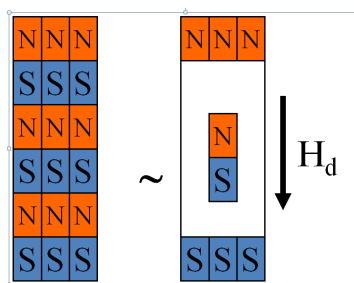
Magnetizacija neodimijskih magneta iznosi oko  $10^6$  A/m. Da bi bolje razumjeli značenje te veličine zamislimo strujnu petlju ploštine  $1 \text{ cm}^2$  kroz koju prolazi struja od 1 A. Magnetski moment petlje jednak je umnošku električne struje i ploštine petlje i iznosi  $10^{-4} \text{ Am}^2$ . Ako je petlja načinjena od žice promjera 1 mm, onda zatvara prostor oblika

diska obujma  $0,1 \text{ cm}^3$ , a njezina magnetizacija je  $10^3 \text{ A/m}$ . Za postizanje magnetizacije neodimijskog magneta kroz tu žicu trebamo pustiti struju od  $1000 \text{ A}$ !

Jakost magneta često se izražava u jedinicama magnetskog polja  $B$  koje magneti stvaraju u svojoj neposrednoj blizini. Magnetsko polje  $B$  u blizini velikog magneta približno je jednako magnetskom polju unutar beskonačno velikog magneta. Izračunamo ga tako da magnetizaciju pomnožimo s permeabilnošću vakuuma  $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$ . Tako dobijemo da najveći neodimijski magneti može stvoriti magnetsko polje nešto veće od  $1 \text{ T}$ . Manji magneti stvaraju manja magnetska polja.

## PREDNOSTI I MANE NEODIMIJSKIH MAGNETA

Tradicionalni željezni magneti osjetljivi su na udarce i toplinu te se lako demagnetiziraju. Nisu osobito jaki i s vremenom znatno oslabe. Mogu imati samo oblik potkove ili štapa, odnosno igle. Razlog tome je *demagnetizirajuće polje*. To je magnetsko polje koje nastaje unutar magneta zato što magnet ima konačnu veličinu. Izvor tog polja su plohe polova magneta. Možemo zamisliti da je magnet sastavljen od niza magnetića (NS) međusobno spojenih suprotnim polovima kao na slici 8a. Budući da su suprotni polovi susjednih magnetića S-N blizu, njihova polja se dokidaju. Stoga magnetsko polje stvaraju jedino polovi koji se nalaze na početku i na kraju niza. Oni nemaju svoje bliske susjede s kojima bi poništili polje (slika 8b). Pogledajmo kako to polje djeluje na magnetić NS u unutrašnjosti magneta. Primjećujemo da ga polje rubnih magneta nastoji zakrenuti u suprotan smjer SN. Dakle, polje koje stvara magnet nastoji poništiti samo sebe. To je demagnetizirajuće polje. Zbog njega u *feromagnetu* nastaju magnetske domene i zbog njega mekano željezo nije magnet.



SLIKA 8. Nastanak demagnetizirajućeg polja  $H_d$  u magnetu.

Sam atom željeza jedan je od najjačih elementarnih magnetića u periodnom sustavu elemenata pa je vanjskim poljem željezo moguće magnetizirati do polja od  $2,16 \text{ T}$  [8]. Po tome bi željezo bilo najbolji magnet. Nevolja je u tome da kristalna struktura željeza omogućuje lako zakretanju magnetskih momenata atoma željeza. Zbog toga, čim spustimo vanjsko polje, pod djelovanjem demagnetizirajućeg polja, magnetizacija željeza pada na malu vrijednost. Djelovanje demagnetizirajućeg polja može se znatno umanjiti ako se polovi magneta udalje. Zato se željezni magneti izrađuju u obliku igle, štapa ili potkove. Kod magneta oblika torusa, vanjski polovi su međusobno spojeni pa nema vanjskih polova, a time ni demagnetizirajućeg polja. Zato potkovasti magnet čuvamo tako da mu polove premostimo željeznim štapom.

Da bi se napravio dobar magnet proizvoljnog oblika bilo je potrebno spriječiti zakretanje magnetskih momenata u materijalu. U tu svrhu sintetiziran je feromagnet  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  u kojem je smjer magnetskih momenata atoma željeza fiksiran anizotropnom kristalnom strukturom materijala. Zahvaljujući tome dobili smo vrlo jake stalne,



takozvane neodimijske magnete. Sam naziv nije sasvim odgovarajući jer su građeni pretežno od atoma željeza. To su najjači postojeći stalni magneti čije magnetsko polje doseže vrijednost od 1,4 T. Iznimno su otporni na demagnetizirajuće polje pa mogu imati bilo kakav oblik i raspored magnetskih polova. Bez problema mogu se izraditi u obliku diska ili kugle. Ipak, imaju i loše strane. Krhi su pa lako pucaju. Osjetljivi su i na zagrijavanje iznad 200°C, nakon čega trajno gube magnetska svojstva.

Zbog svojih izuzetnih svojstava neodimijski se magneti sve više upotrebljavaju u industriji pa im se, zbog masovnije proizvodnje, cijena stalno smanjuje. Zadnjih godina cijena im se smanjile nekoliko puta, čime su ovi magneti postali dostupni za široku primjenu.

Sve mogućnosti njihove primjene treba tek spoznati jer mnoge, relativno slabe fizikalne pojave u njihovim jakim magnetskim poljima dolaze do punog izražaja, stvarajući efekte koji su često u neskladu s našim iskustvom. Pomoću ovih magneta, relativno slabe paramagnetske i dijamagnetske pojave postaju vidljive kao snažno privlačenje ili odbijanje tvari. Njihovim gibanjem u blizini metala, u metalu nastaju jake vrtložne struje s izraženim efektima kao što su usporeni pad, lebdjenje itd. Jako magnetsko međudjelovanje može poslužiti i za zanimljive pokuse iz mehanike, npr. za demonstriranje zakona očuvanja i djelovanja centripetalne sile, ili iz termodinamike, npr. termomagnetski motor. Ove pojave otvaraju mogućnost nove percepcije mnogih fizikalnih pojava.

## PRIMJER 1: SVE TVARI SU MAGNETIČNE

Neke od tvari koje nas okružuju magnet privlači, a neke odbija, no te su sile tako slabe da ih je teško uočiti. Kažemo da su te tvari nemagnetične. No, je li to prava istina? Ovaj pokus je nastao na temelju ideje iz rada [9]. Komadić odabrane tvari (papira, aluminijske folije, grafita, drva...) stavimo na površinu vode, tako da ga održava površinska napetost (slika 9). Magnet pričvršćen na velikom čavlu približimo komadiću materijala sa strane. Primjećujemo da komadić započinje gibanje po površini. Uočavamo da magnet mnoge tvari privlači, bilo jače ili slabije, ali neke i odbija. Za tvari koje magnet slabo privlači kažemo da su paramagnetične, a za one koje odbija da su dijamagnetične. To inače ne primjećujemo jer sila trenja sprječava gibanje predmeta u polju magneta. Smanjimo li silu trenja, djelovanje magneta postaje uočljivo. To smo postigli stavljanjem tijela na površinu vode.



SLIKA 9. Jak magnet pomiče sve tvari na površini vode.

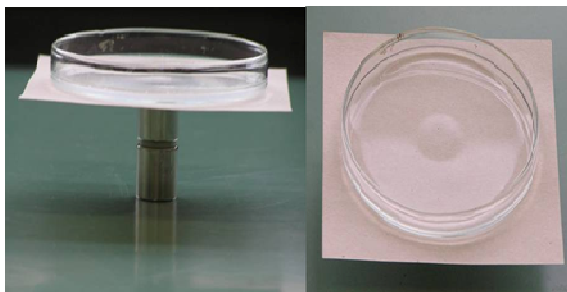
*Paramagnet* je tvar koju magnet slabo privlači. Atomi ili molekule paramagneta su mali stalni magneti koji se mogu zakretati neovisno o susjednim magnetima. Zbog termičkog gibanja ti su magneti orijentirani u različitim smjerovima. Kada se takvi atomi

ili molekule nađu u magnetskom polju, orijentiraju se pretežno u smjeru polja, čime se tvar kao cjelina ponaša kao slabi magnet. Pojavu slaboga magnetskog privlačenja nalazimo kod aluminiija, kisika, platine, urana, litija, magnezija, natrija.

*Dijamagnet* je tvar koju magnet slabo odbija. Atomi ili molekule dijamagneta nisu stalni magneti. Vanjsko magnetsko polje tada u njima inducira magnetske momente. Inducirani momenti orijentiraju se uvijek suprotno vanjskome magnetskom polju. Zbog toga se takve tvari odbijaju od magneta, bez obzira kojim polom magneta im prilazimo. Ovo je jedan od rijetkih makroskopskih kvantnomehaničkih fenomena koji je moguće objasniti jedino zakonima kvantne fizike. Dijamagnetizam je prisutan kod svih tvari, ali je slabiji od paramagnetizma pa se zbog toga primjećuje samo kod tvari čiji atomi ili molekule nisu magneti, odnosno kod kojih su elektronske ljuske sasvim popunjene. Dijamagnetične tvari su voda, bizmut, grafit, ali i bakar, olovo, živa, srebro, ako nisu onečišćeni paramagnetskim atomima.

## PRIMJER 2: MAGNET I VODA

Ovaj pokus nastao je na temelju ideje iz reference [10]. U Petrijevu posudicu ulijemo jedan do dva milimetra vode kojoj smo prethodno dodali malu količinu tekućeg sapuna, kako bismo joj smanjili površinsku napetost. Posudu sredinom pažljivo položimo na bazu valjkastog magneta. Magnet i nepotrebne odraze s donjih ploha sakrijemo



**SLIKA 10.** Na površini vode nastaje uleknuće u blizini jakog magneta.

tako da ispod posudice postavimo komad papira. Promatramo odraz s površine vode. Na površini, točno iznad magneta, uočavamo uleknuće (slika 10). Ono je očito nastalo zato jer voda "bježi" od magneta. Voda je dijamagnetična.

Iako su kisik i vodik paramagnetični, jer imaju nesparene elektrone, molekula vode kao cjelina nije magnet jer su joj svi elektroni spareni. Elektroni dvaju atoma vodika u molekuli vode  $H_2O$  sasvim dopunjavaju  $2p$  ljusku atoma kisika, tako da je ukupni magnetski moment molekule jednak nuli. Dijamagnetizam je svojstvo popunjenih atomskih orbitala. Zbog magnetskog odbijanja, dijamagneti mogu lebdjeti u polju magneta. Biljke i životinje sadrže dosta vode pa su zato često dijamagnetične. U Nizozemskoj je 1997. godine izveden pokus u kojem je postignuta levitacija žive žabe u magnetskom polju od 16 T, bez posljedica za samu žabu. To je je moguće zato što je žaba sastavljena uglavnom od vode i zato dijamagnetična.



### PRIMJER 3: LEBDENJE

Četiri magnetne kocke složimo tako da se sjeverni i južni polovi izmjenjuju kao polja na šahovskoj ploči odnosno tako da čine magnetski kvadropol. To je najlakše napraviti postavljanjem kockastih magneta na magnetičan novčić. Na sredinu nježno postavimo listić čistog (pirolitičkog) grafita. Listić lebdi u magnetskom polju [11] (slika 11). Grafit možemo lagano gurati vrhom olovke ili ga pokrenuti kuckanjem po stolu te promatrati slobodno gibanje listića. Između magneta i listića možemo provući konac i tako pokazati da ne dodiruje podlogu. Pokus demonstrira dijamagnetsku levitaciju i pogodan je kao uvodni, motivirajući pokus za magnetizam tvari. Za stabilno lebdjenje grafitnog listića potrebno je područje u kojem je potencijalna energija minimalna, odnosno potencijalna jama. Ova konfiguracija magneta najslabije magnetsko polje daje u sredini. Zato u sredini postoji minimum magnetske potencijalne energije pa listić može stabilno lebdjeti.

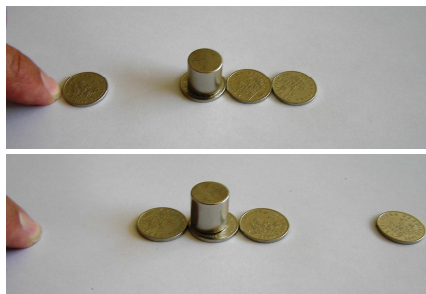
*Magnetska levitacija* je pojava kod koje magnetsko odbojno djelovanje poništava silu težu. Zbog toga tijelo ne dotiče podlogu, nego lebdi. Magnetska sila brzo slabi s udaljenošću pa je lebdjenje moguće samo na visinama do nekoliko centimetara. To je, međutim, dovoljno da se eliminira trenje i konstruiraju vlakovi koju postižu brzine veće od 500 km/h. Lebdjenje nije moguće postići pomoću stalnih magneta koji miruju, jer oni ne mogu biti u stabilnoj ravnoteži. Magneti će se uvijek okrenuti i na kraju privući. Lebdjenje je moguće postići pomoću dijamagneta jer to je tvar koju magnet uvijek odbija, i to sa svih strana. Najjači dijamagnet je supravodič, a dobri dijamagneti su čisti grafit i bizmut. Lebdjenje je moguće postići i pomoću elektromagnetske indukcije.



SLIKA 11. Listić grafita lebdi iznad magnetskog kvadropola.

### PRIMJER 4: MAGNETNI TOP

Znamo da magnet privlači predmete, ali da ih jednom privučene može izbaciti kao iz topa, to nismo očekivali. Ovaj pokus je nastao na temelju ideja iz rada [12]. Pri izvođenju pokusa koristimo neodimijski magnet oblika valjka i četiri jednaka magnetična novčića (u Hrvatskoj su pogodni novčići od 50 lipa) koje pomičemo po horizontalnoj nemagnetskoj podlozi (npr. drvenoj klupi). Novčić na koji smo stavili magnet položimo na podlogu. On je magnetiziran i zato privlači ostale novčiće. Polako primičemo drugi novčić dok se ne



SLIKA 12. Raspored novčića prije (gore) i nakon sruza (dolje).

spoji s prvim. Na isti način treći novčić spojimo s drugim, tako da tri novčića čine niz kao na slici 12 gore. Četvrti novčić polako približimo s druge strane. Naglo privučen on se spoji s nizom, ali istodobno treći novčić izleti velikom brzinom (slika 12 dolje).

Ovaj iznenađujući pokus koji povezuje magnetizam i zakone mehanike pouzdano će zainteresirati učenika. Pokusom uvodimo pojam magnetske potencijalne energije te diskutiramo zakonime očuvanja energije i količine gibanja.

*Je li očuvana energija?* Zbog privlačnog djelovanja magneta i novčića, postoji magnetska potencijalna energija koja je to manja što je novčić bliže magnetu. Na kraju pokusa se četvrti novčić nalazi bliže magnetu nego što je to bio treći novčić prije sraza, što znači da se magnetska potencijalna energija sustava smanjila. Ta razlika pretvorila se u energiju gibanja. Energija je očuvana.

*Je li očuvana količina gibanja?* Na početku novčići miruju pa je njihova ukupna količina gibanja jednaka nuli. Takva mora biti i neposredno nakon sraza. Dakle, ako je treći novčić dobio brzinu udesno, ostatak se morao pomaknuti ulijevo. Pažljivim promatranjem ponovljenog pokusa uočavamo malen pomak niza novčića s magnetom ulijevo. Taj pomak je mali zbog velike mase, ali nosi jednaku količinu gibanja kao treći novčić jer je količina gibanja jednaka umnošku brzine i mase. Količine gibanja nastale srazom novčića jednakog su iznosa i suprotno usmjerene, tako da je ukupna količina gibanja, vektorski zbroj, i nakon sraza jednaka nuli. Top se mora pomaknuti unatrag kada ispali granatu.

## ZAKLJUČAK

Pokusi s neodimijskim magnetima mogu značajno doprinijeti poboljšanju nastave fizike kako u sadržajnom smislu i tako i u smislu povećanja zainteresiranosti učenika. Neodimijski magneti su danas jeftini i lako dobavljeni u različitim oblicima i veličinama[13]. Zato nemojte oklijevati, uzmite ih u ruke i zadivite svoje učenike.

## LITERATURA

1. I. Aviani, Pokusi s neodimijskim magnetima u nastavi fizike, Simpozijum o položaju fizike u srednjim školama u regionu, Aleksinac, Srbija 20 - 22. veljače 2015. , Zbornik radova, 28 - 34.
2. I. Aviani i B. Erjavec, *Čudesni svijet magneta*, Priručnik Demonstracijskog kompleta za magnetizam, Institut za fiziku, Zagreb 2010, ISBN 978-953-7666-06-4.
3. Lijep pregled povijesti magnetizma može se naći na stranicama Trinity College Dublin, <https://www.tcd.ie/Physics/Magnetism/Guide/mythsorgins.php> (2009).
4. Slika preuzeta s [http://www.smith.edu/hsc/museum/ancient\\_inventions/compass2.html](http://www.smith.edu/hsc/museum/ancient_inventions/compass2.html) (2015).
5. Chen, L., Bazylinski, D. A. & Lower, B. H., *Nature Education Knowledge* 3, 30 (2010).
6. W. M. Elsasser, *The Earth as a Dynamo*, Sci. Am. 198, 44 (1958). Jeanie I. Watt and Bradley J. Roth, *Phys. Teach.* 45, 168 (2007).
7. Du Trémolet de Lacheisserie, E., Gignoux, D., Schlenker, M. (eds.), *Magnetism: Fundamentals, Materials and Applications*, Springer; 1st ed., (2002).
8. Du Trémolet de Lacheisserie, E., Gignoux, D., Schlenker, M. (eds.), *Materials and Applications*, Springer; 1st ed., (2002).
9. Browne, K., Jackson, D. P., *Phys. Teach.* 45, 425 (2007).

10. Diamagnetic water, <http://www.wondermagnet.com/diamagh2o.html> , (2003).
11. R. Edge, *Phys. Teach*, 41, 122 (2003).
12. J. Rabchuk, *Phys. Teach*. 41, 158 (2003).
13. Cijene i oblike neodimijskih magneta u Hrvatskoj možete vidjeti na stranicama Artas d.o.o, <http://www.artas.hr/magneti/neodimijski.htm>