

## Ferotekućine

Matija Čulo<sup>1</sup>

Prošle godine na otvorenom danu Instituta za fiziku u Zagrebu u sklopu teme “čudesne tekućine” predstavljena je i ferotekućina, tvar koja posjeduje mehanička svojstva tekućine i magnetska svojstva čvrste tvari. U ovom članku ćemo opisati najvažnija fizikalna svojstva koja ferotekućinu čine čudesnom te na mikroskopskoj razini dati odgovarajuću fizikalnu sliku. Na kraju ćemo nešto reći o suvremenoj primjeni ferotekućina u različitim područjima ljudske djelatnosti te također navesti neke potencijalne primjene u budućnosti. Stoga krenimo redom.

### Od “kamena koji vodi” do “robotske krvi”

O tome koliko je magnetizam utkan u život suvremenog čovjeka ne treba puno govoriti. Telefoni, mobiteli, televizori, kompjutori, zvučnici, kreditne kartice... sve su to predmeti iz svakidašnjeg života koji svoju funkciju temelje na magnetskim pojavama. Ovakva šarolika primjena, sasvim jasno, bila bi nezamisliva da nije bilo velikih umova 19. i 20. stoljeća kao što su Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère, Carl Friedrich Gauss, Jean-Baptiste Biot, Felix Savart, Michael Faraday, James Clerk Maxwell, Albert Einstein i mnogi drugi, koji su postavili temelje razumijevanja tog čudnog svijeta magnetskih pojava, koji se i danas intenzivno istražuje. Međutim, priča o magnetizmu počinje mnogo, mnogo ranije.

Vjerojatno najpoznatija legenda o otkriću magnetizma je ona o starom pastiru Magnesu s otoka Krete koji je živio prije otprilike 4000 godina. Prema legendi, Magnes je jednog dana sa svojim stadom prolazio područjem sjeverne Grčke, tzv. Magnezijom te iznenada opazio da su se čavli na njegovim sandalama kao i željezni vrh njegova štapa čvrsto priljubili uz veliku crnu stijenu na kojoj je stajao. Kako bi otkrio izvor privlačenja, Magnes je počeo kopati zemlju oko stijene i pronašao male crne kamenčiće koji imaju sposobnost privlačenja željeznih predmeta. Danas znamo da su ti kamenčići zapravo prirodno magnetizirani komadi minerala magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , nazvanog tako ili po Magneziji u kojoj je otkriven ili po Magnesu koji ga je prema legendi otkrio, a otud i naziv magnetizam.

Priče o magnetitu se također vežu uz antičkog pisca Gaja Plinija Sekunda, poznatijeg kao Plinija Starijeg, iz 1. st., koji u svojim djelima piše o planini u blizini rijeke Ind koja je u potpunosti sačinjena od kamenja koji privlače željezne predmete. To kamenje prema Pliniju Starijem posjeduje posebne moći kao što su liječenje bolesti ili istjerivanje zlih duhova. Štoviše, ondašnji ljudi su vjerovali da postoje čitavi otoci sačinjeni od takvog kamenja te da prolazak željeznog broda u blizini takvog otoka može dovesti do njegovog nasukavanja ili čak potonuća. Stoga su s takvim otocima povezivali misteriozne nestanke brojnih brodova. Antički ljudi su također uočili da se komadić magnetita u obliku igle pušten da pliva na površini vode uvijek orijentira na isti način, u smjeru sjever-jug te su tako počeli izrađivati prve kompase. S tim u vezi je i drevni naziv za magnetit, “kamen koji vodi” (engl. lodestone). Zapise o kompasima nalazimo i na drugom kraju svijeta, u Kini. Prema nekim izvorima Kinezi su primitivne kompase izrađivali još prije 4500 godina. Bilo kako bilo, svojstva magnetita, što naravna, što nadnaravna, spominju se u ljudskoj povijesti već tisućama godina.

<sup>1</sup> Autor je profesor fizike, zaposlen na Institutu za fiziku u Zagrebu, e-pošta: mculo@ifs.hr

Nadnaravne moći su se magnetitu pripisivale i veći dio srednjeg vijeka. Prvi pokušaj razdvajanja činjenica od praznovjerja većemo uz francuskog učenjaka Gilberta Petera Peregrinusa i njegovo djelo u kojem su sakupljeni svi podaci o magnetitu koji su do tada bili poznati. Sljedeći značajan napredak napravio je engleski liječnik William Gilbert iz 16. st. koji je prvi shvatio da je i naš planet Zemlja magnetičan te da se magnetičnim može učiniti i komad običnog željeza. Ipak, o pravom znanstvenom razumijevanju magnetičnosti i magnetskih pojava možemo govoriti tek u 19. st.

a)



b)



Slika 1. a) Ferotekućina i b) željezna piljevina u blizini stalnog magneta.

Od otkrića magnetita pa do nedavno, magnetičnost smo povezivali isključivo s čvrstim agregatnim stanjem. Situacija se međutim promijenila prije 40-ak godina, u razdoblju ranog razvoja svemirskog programa, kada je NASA prilikom istraživanja načina kontroliranja tekućeg raketnog goriva u bestežinskom stanju pomoću nanočestica magnetita sintetizirala prvu magnetičnu tekućinu nazvanu ferotekućina. Na prvi pogled, to je sasvim obična crna uljasta tekućina. Međutim, približavanjem magneta ta tekućina postaje snažno magnetizirana i ponaša se sličnije željeznoj piljevini, nego uobičajenim tekućinama (slika 1.). U vanjskom magnetskom polju ferotekućina teče u smjeru gradijenta (porasta) magnetskog polja.

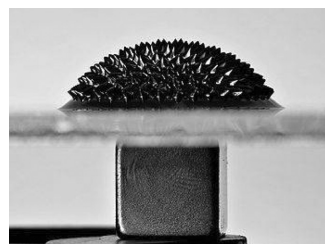
Na ovoj činjenici temelje se brojne praktične primjene ferotekućina, o čemu će biti riječi kasnije, a neke od mogućih primjena su još uvijek, nažalost, samo plod ljudske mašte. Tako bi se u bliskoj budućnosti ferotekućina mogla upotrebljavati u medicini za lokaliziranu primjenu lijekova, a u nešto daljoj budućnosti bi se mogla pronaći u “krvotoku” nekog naprednog robota. U tom slučaju bi povijest magnetizma mogla počinjati pričama o kamenu koji je čovječanstvo uveo u svijet magnetskih pojava (“kamen koji vodi”), a završavati pričama o visoko sofisticiranom načinu prijenosa elemenata potrebnih za funkcioniranje naprednih robota (“robotskoj krvi”), a u pozadini obje priče bi mogao biti jedan te isti materijal, magnetit. Ipak, prije nego što se to dogodi, treba pomno istražiti mehanička, magnetska, električna, termodinamička i druga fizikalna svojstva te čudesne tekućine.

## Čudesna tekućina

Kada se ispod posude u kojoj se nalazi ferotekućina stavi magnet dovoljne jakosti (npr. neodimijski magnet<sup>2</sup>) dotad ravna površina tekućine poprima složeni oblik kojeg krasí mnoštvo jednoliko razmaknutih šiljaka gotovo jednake veličine između kojih se nalaze udubine, podsjećajući tako na nešto što bi se moglo vidjeti u filmovima znanstvene fantastike (slika 2<sup>3</sup>).

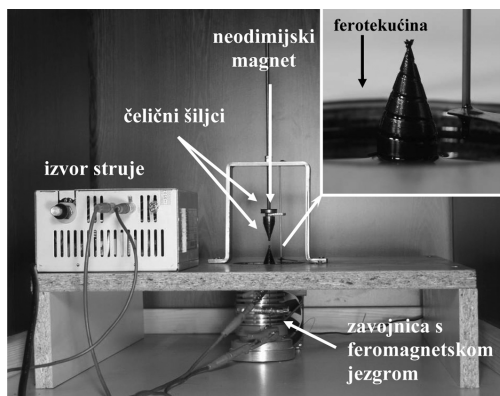
<sup>2</sup> Neodimijski magneti su najjača vrsta trajnih magneta načinjena od legure neodimija, željeza i bora ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ).

<sup>3</sup> Slika 2. uzeta s web stranice:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Ferofluid>



Slika 2. Površina ferotekućine u magnetskom polju.

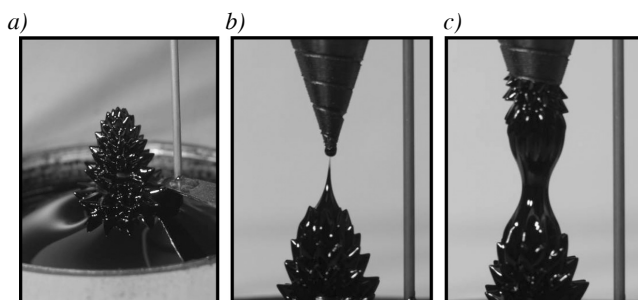
Ovdje treba napomenuti da neodimijski magnet baš i nije najsretniji izbor jer u blizini jakih magneta ferotekućina postaje snažno magnetizirana pa rukovanje može biti dosta nespretno, a ukoliko dođe do prskanja i/ili “ljepljenja” tekućine za magnet i poprilično prljavo. Jednostavan i učinkovit način da se to izbjegne je da se umjesto jakog stalnog magneta upotrijebi obična zavojnica s feromagnetskom jezgrom. Na taj način se cijeli eksperimentalni postav za proučavanje nekog svojstva ferotekućine može pripremiti izvan magnetskog polja (slika 3). Jednom kada je sve spremno, jedino što treba učiniti je pustiti struju kroz zavojnicu. Efekti koje izaziva magnetsko polje zavojnice možda jesu nešto manje izraženi, ali je zato rukovanje znatno pojednostavnjeno. Osim toga, magnetsko polje zavojnice može se vrlo jednostavno mijenjati izborom smjera i jakosti struje što omogućuje proučavanje ferotekućina u vremenski promjenjivim magnetskim poljima.



Slika 3. Eksperimentalni postav za proučavanje svojstava ferotekućine.

Osim šiljaka, ono što se primjećuje je da se unatoč gravitaciji ferotekućina nakuplja u području u kojem je magnetsko polje najjače, dakle u blizini jednog od magnetskih polova zavojnice. Ovo svojstvo ferotekućine da se giba u smjeru porasta magnetskog polja još se lakše uočava ako se u sredinu posude odmah iznad zavojnice postavi čelični šiljak (slika 3). Puštanje struje kroz zavojnicu osim “čudnovatog” oblika površine također uzrokuje i nakupljanje ferotekućine na vrhu čeličnog šiljka. Da efekt bude ljepši može se na površini čeličnog šiljka izdubiti spiralna putanja (slika 3, umetak).

Ferotekućina će se, slijedeći put najmanjeg “otpora”, gibati spiralnom putanjom od dna prema vrhu šiljka ostavljajući preko njega “bodljikavi plašt” (slika 4a).



Slika 4. a) Ferotekućina se nakuplja na vrhu šiljka gdje se nalazi jedan od magnetskih polova zavojnice. b) i c) Približavanjem gornjeg šiljka ferotekućina prelazi na njegov vrh gdje se nalazi jedan od polova neodimijskog magneta.

Čelični šiljak se naime, kao i feromagnetska jezgra, u magnetskom polju zavojnice magnetizira stvarajući u okolnom prostoru vlastito magnetsko polje koje je najjače na samom vrhu gdje se nalazi jedan od magnetskih polova. Ako bi sada vrhu magnetiziranog čeličnog šiljka približili vrh drugog čeličnog šiljka koji je jače magnetiziran (npr. neodimijskim magnetom), primijetili bi da ferotekućina prkoseći gravitaciji prelazi s donjeg na gornji šiljak (slike 4b i 4c). Na taj način se pokazuje da je gibanjem ferotekućine vrlo jednostavno manipulirati oblikom magnetskog polja i upravo na toj činjenici temelji se većina tehnoloških primjena ferotekućina, o čemu će više riječi biti kasnije.

## Ferotekućine zapravo nisu tekućine!

Svaka ferotekućina sastoji se od sitnih čestica promjera oko 10 nm neke feromagnetske (npr. hematit,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ili ferimagnetske tvari (najčešće magnetit,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) raspršene u nekom ugljikovodičnom otapalu kao što je kerozin ili u vodi<sup>4</sup>. U prvom slučaju govorimo o ferotekućini baziranoj na ulju, a u drugom o ferotekućini baziranoj na vodi. Makroskopski gledano, ta se smjesa ponaša kao tekućina, dakle dok joj je volumen praktički neovisan o vanjskim silama, oblik u potpunosti ovisi o njima. Međutim, gledano mikroskopski, ferotekućina je sustav koji se sastoji od dva agregatna stanja, čvrstog i tekućeg. Budući da su nanočestice čvrste faze raspršene u tekućem mediju, ferotekućinu je najbolje okarakterizirati kao vrstu koloidnog sustava kojeg zovemo sol.

$$E_p = -\frac{\mu_0}{4\pi r^3} \cdot 2m^2 \quad E_p = -\frac{\mu_0}{4\pi r^3} \cdot m^2 \quad E_p = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \cdot m^2 \quad E_p = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \cdot 2m^2$$

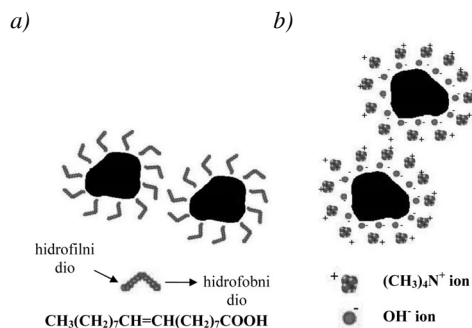
$$E_p = -\frac{\mu_0}{4\pi r^3} \left( 3 \frac{(\vec{m}_1 \cdot \vec{r})(\vec{m}_2 \cdot \vec{r})}{r^2} - \vec{m}_1 \cdot \vec{m}_2 \right) \quad (*)$$

Slika 5. Magnetsko dipol-dipol međudjelovanje opisano relacijom (\*) radi principa minimuma energije preferira razmještaj dipola u kojem su oni međusobno paralelni te paralelni radijvektoru relativnog položaja a).

Problem koji se odmah nameće u vezi sa solom je mogućnost razdvajanja faza, tj. njegova stabilnost. Razdvajanje faza može biti uzrokovano slijeganjem nanočestica uslijed djelovanja gravitacije ili njihovim nakupljanjem uslijed uzajamnog međudjelovanja. Zbog izuzetno malih dimenzija, kinetička energija Brownovog gibanja nanočestica daleko je veća od njihove gravitacijske potencijalne energije pa stabilnost koloidnog sustava u gravitacijskom polju nije upitna. Razdvajanje faza nakupljanjem nanočestica uslijed međudjelovanja predstavlja međutim veći problem. Budući da su čestice feromagnetske ili ferimagnetske tvari nanometarskih dimenzija možemo uzeti da se sastoje od jedne

<sup>4</sup> Postoje i tzv. magnetoreološke tekućine koje se isto tako sastoje od sitnih čestica feromagnetske ili ferimagnetske tvari raspršenih u nekom otapalu, najčešće ulju, međutim zbog znatno većih dimenzija čestica čvrste tvari (obično 0.1–10  $\mu\text{m}$ ) te tekućine imaju bitno drugačija svojstva od ferotekućina.

jedine domene, tj. da se ponašaju kao stalni magnetski dipoli. Magnetsko dipol-dipol međudjelovanje ovisi o veličini čestica, orijentaciji dipola i njihovom međusobnom položaju, a može biti privlačno (slike 5a i 5b) i odbojno (slika 5c i 5d). Ukoliko bi veličina nanočestica bila veća od 10 nm uslijed magnetskog međudjelovanja moglo bi doći do nastanka manjih nakupina feromagnetske ili ferimagnetske tvari kao što su dimeri, trimeri, prsteni pa čak i lanci. Budući da je Brownovo gibanje tih nakupina znatno manje izraženo takve ferotekućine bile bi manje otporne na slijeganje uslijed gravitacijskog učinka. Ipak, u konvencionalnim ferotekućinama veličina nanočestica je obično 5-10 nm, tako da je magnetsko međudjelovanje najčešće preslabo da bi dovelo do razdvajanja faza zbog njihovog nakupljanja.



Slika 6. a) Sterička i b) elektrostatska stabilizacija ferotekućine.

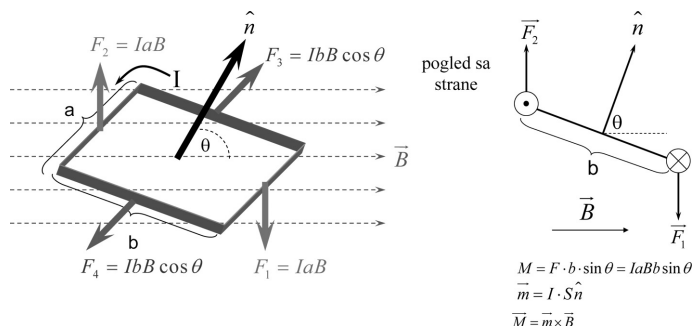
Znatno veći problem predstavlja van der Waalsovo međudjelovanje koje također ovisi o veličini čestica, ali je za razliku od magnetskog uvijek privlačno. Energija van der Waalsovog međudjelovanja već za čestice veličine 5–10 nm veća je od kinetičke energije Brownovog gibanja tako da je razdvajanje faza uslijed nakupljanja neizbježno. Stoga se prilikom sinteze ferotekućinama dodaje neka površinski aktivna tvar, tzv. surfaktant. Ukoliko se radi o ferotekućini baziranoj na ulju, kao surfaktant se najčešće koristi oleinska kiselina  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ . Molekule oleinske kiseline sastoje se od dugačkog nepolarnog ugljikovodičnog lanca (hidrofojni dio) i polarne karboksilne skupine (hidrofilni dio). Budući da s molekulama ulja znatno jače međudjeluje hidrofojni dio molekule oleinske kiseline, one se u ferotekućini orijentiraju tako da svojim hidrofilnim dijelom priliježu uz površinu nanočestice, dok se hidrofojni dio pruža radialno prema van (slika 6a<sup>5</sup>). Monosloj oleinske kiseline debljine  $\approx 2$  nm oko svake nanočestice onemogućava bliski susret dvije nanočestice tako da van der Waalsovo privlačenje, koje brzo opada s udaljenošću između dvije čestice, nije dovoljno da prouzroči nastanak nakupina i tako dovede do razdvajanja faza. Kažemo da je ferotekućina na bazi ulja sterički stabilizirana. U slučaju ferotekućine bazirane na vodi, kao surfaktant se najčešće koristi tetrametilamonijev hidroksid  $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ . On se u vodi ionizira na  $(\text{CH}_3)_4\text{N}^+$  i  $\text{OH}^-$  ione koji se vežu na površinu nanočestica magnetita tvoreći najčešće dvoslojnu ljusku oko svake čestice. Prvi sloj se, zbog manjih dimenzija i time jačeg međudjelovanja s nanočesticom, sastoji od  $\text{OH}^-$  iona, a drugi sloj od  $(\text{CH}_3)_4\text{N}^+$  iona (slika 6b). Na taj način svaka nanočestica dobiva istovrsni naboj na površini zbog kojih se među njima javlja elektrostatsko odbojno međudjelovanje koje sprečava nakupljanje, tj. razdvajanje faza. Kažemo da je ferotekućina na bazi vode elektrostatski stabilizirana.

Sada, kada napokon znamo od čega se zapravo svaka ferotekućina sastoji, možemo početi proučavati mikroskopsku fizikalnu pozadinu njihovih čudnovatih svojstava koja se javljaju u prisustvu vanjskog magnetskog polja.

<sup>5</sup> Slike 6a i 6b uzete s web stranice: <http://mrsec.wisc.edu/Edetc/background/ferrofluid/index.html>

## Ferotekućine nisu magnetične!

Iako svaka pojedina nanočestica posjeduje magnetski dipolni moment, ferotekućina u okolnom prostoru ne stvara magnetsko polje. Razlog tome je Brownovo gibanje zbog kojeg su magnetski dipolni momenti nanočestica nasumično orijentirani te je magnetizacija ferotekućine jednaka nuli. U prisustvu vanjskog magnetskog polja situacija je međutim bitno drugačija. Promotrimo radi jednostavnosti ferotekućinu u homogenom magnetskom polju. Tada na svaku nanočesticu djeluje moment para sila koji njezin magnetski dipolni moment nastoji usmjeriti paralelno vanjskom magnetskom polju (slika 7).



Slika 7. Općenito ponašanje magnetskog dipola u magnetskom polju možemo proučiti na modelu pravokutne petlje kojom teče struja  $I$ . U magnetskom polju  $\vec{B}$  na svaku stranicu petlje djeluje sila  $\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$ . U homogenom polju suma svih sila jednaka je 0. Preostaje samo moment para sila koji, uz definiciju magnetskog momenta petlje kao vektora čiji je iznos jednak umnošku struje  $I$  i površine petlje  $S = ab$  te čiji je smjer paralelan normalni na površinu petlje  $\vec{n}$ , možemo zapisati kao  $\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$ . Ta relacija vrijedi općenito bez obzira radi li se o pravokutnoj petlji, igli kompasu ili jednom jedinom atomu i pokazuje da minimum magnetske potencijalne energije dipola odgovara položaju u kojem je on usmjeren paralelno homogenom magnetskom polju. U slučaju nehomogenog magnetskog polja suma svih sila kao i suma svih momenata različita je od 0 tako da uz zakretanje petlje postoji i sila na centar mase koja ju nastoji pomaknuti u smjeru porasta magnetskog polja. I ovaj zaključak vrijedi općenito tako da možemo reći da je minimum magnetske potencijalne energije dipola u nehomogenom polju zadan položajem u kojem je on paralelan polju, a nalazi se u području u kojem je polje najjače.

To je položaj minimuma magnetske potencijalne energije dipola u vanjskom magnetskom polju. Stoga će u dovoljno jakom magnetskom polju, kada je kinetička energija Brownovog gibanja znatno manja od promjena magnetske potencijalne energije, većina magnetskih dipola biti usmjerena paralelno vanjskom magnetskom polju, dakle ferotekućina će biti magnetizirana. Čim se magnetsko polje isključi, magnetski dipoli opet će postati nasumično orijentirani i magnetizacija ferotekućine će pasti na nulu. To je ponašanje tipično za paramagnetske tvari kakve su mnogi metali (npr. natrij, aluminij, platina, kositar...), kompleksni spojevi koji sadrže ione prijelaznih metala pa čak i neki plinovi ( $O_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $ClO_2$  ...). Takve tvari izvan magnetskog polja prestaju biti magnetizirane, za razliku od feromagnetskih ili ferimagnetskih tvari koje zadržavaju magnetizaciju i po prestanku djelovanja magnetskog polja, tj. magnetične su. Ipak, magnetska susceptibilnost tipičnih ferotekućina je i nekoliko redova veličine veća od magnetske susceptibilnosti uobičajenih paramagnetskih tvari pa za ferotekućine obično kažemo da su superparamagnetične.

Zadržimo se još malo na ferotekućini u homogenom magnetskom polju. Spomenuli smo da će, ukoliko je kinetička energija Brownovog gibanja znatno manja od promjena magnetske potencijalne energije, većina magnetskih dipolnih momenata biti usmjerena paralelno vanjskom magnetskom polju. Budući da magnetsko dipol-dipol međudjelovanje preferira razmještaj dvaju magnetskih dipola prikazan na slici 5a, u ferotekućini će postojati preferencija slaganja magnetskih dipola u lančaste strukture, slično kao i kod željezne piljevine u jakom magnetskom polju (slika 1b). Na taj način doći će do smanjenja magnetske potencijalne energije međudjelovanja magnetskih dipola. Ukoliko su silnice vanjskog magnetskog polja okomite na površinu Zemlje, magnetski dipolni momenti će se slagati jedan na drugog povećavajući pritom gravitacijsku potencijalnu energiju sustava. Osim toga, nastanak lančastih struktura dovest će i do promjene oblika dotad ravne površine ferotekućine, što će za posljedicu imati povećanje površine, a time i površinske energije sustava. Površina s jednoliko razmaknutim šiljcima podjednake veličine rezultat je procesa u kojem je smanjenje magnetske potencijalne energije veće od povećanja gravitacijske potencijalne energije i površinske energije sustava. To je stanje minimuma ukupne energije ferotekućine u gravitacijskom i magnetskom polju. Broj i veličina šiljaka zadani su jakošću vanjskog magnetskog polja, jakošću gravitacijskog polja, tj. akceleracijom sile teže i napetošću površine. Gravitacijska potencijalna energija favorizira što veći broj šiljaka, a magnetska i površinska energija što manji broj. Jednaka veličina i jednaki razmak šiljaka posljedica su translacijske simetrije u sustavu (nema razloga da bilo koji šiljak bude drugačiji od ostalih).

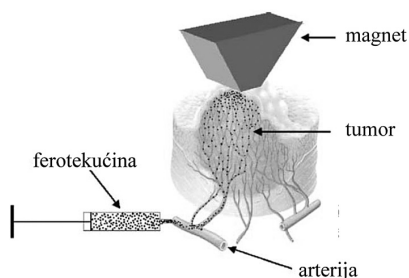
Promotrimo sada ferotekućinu u nehomogenom vanjskom magnetskom polju. Tada uz moment para sila koji magnetski dipolni moment svake nanočestice nastoji usmjeriti paralelno vanjskom magnetskom polju, na centar mase svake nanočestice djeluje sila koja je nastoji pomaknuti u smjeru gradijenta magnetskog polja, tj. u smjeru porasta magnetskog polja. Budući da nanočestice, gibajući se u smjeru gradijenta, za sobom povlače i molekule otapala, na taj način dolazi do gibanja čitave tekućine. Dakle, minimum magnetske potencijalne energije u nehomogenom vanjskom magnetskom polju odgovara stanju u kojem je magnetski dipolni moment orijentiran paralelno vanjskom magnetskom polju, a nalazi se u prostoru u kojem polje ima najveću vrijednost. Sasvim jasno je da na dinamiku ferotekućine, osim magnetske, utječu i druge sile poput sile teže ili viskoznosti. Međutim, u dovoljno jakim magnetskim poljima, a vidjeli smo da je takva polja moguće dobiti i pomoću obične zavojnice s feromagnetskom jezgrom, magnetska sila može igrati ključnu ulogu u dinamici ferotekućine i to će biti redovito slučaj u tehnološkim i drugim primjenama.

Da rezimiramo – izvan magnetskog polja kinetička energija Brownovog gibanja nanočestica feromagnetske ili ferimagnetske tvari oklopljene molekulama surfaktanta znatno je veća od promjena energije izazvanih van der Waalsovima ili magnetskim dipol-dipol međudjelovanjem. Zbog toga su magnetski dipolni momenti nanočestica nasumično orijentirani pa izostaje bilo kakvo uređenje ferotekućine na mikroskopskoj razini. Površina tekućine u tom je slučaju kao i kod uobičajenih tekućina vodoravna. U vanjskom magnetskom polju naprotiv, većina magnetskih dipolnih momenata biva usmjerena paralelno silnicama polja te zauzima prostor u kojem je magnetsko polje najjače. Promjena magnetske potencijalne energije dipola u vanjskom polju sada je znatno veća od kinetičke energije Brownovog gibanja. Od dva moguća rasporeda na slikama 5a i 5c preferira se raspored magnetskih dipolnih momenata prikazan na slici 5a jer se na taj način dodatno smanjuje i potencijalna energija uzajamnog međudjelovanja magnetskih dipolnih momenata. To dovodi do nastanka lančastih struktura koje su odgovorne za površinu ferotekućine s mnoštvom šiljaka između kojih se nalaze udubine. Možemo reći da je takav osebujan oblik površine ferotekućine posljedica uzajamnog međudjelovanja magnetskih dipolnih momenata, a gibanje ferotekućine u smjeru gradijenta posljedica međudjelovanja magnetskih dipolnih momenata s vanjskim magnetskim poljem.

## Od umjetničkih skulptura do sofisticiranog liječenja tumora

Iako osnovna zadaća zbog koje su NASA-  
ini znanstvenici sintetizirali prvu ferotekućinu  
nikada nije ostvarena, ferotekućine su našle  
primjenu u mnogim područjima ljudske djelat-  
nosti. Činjenica da se njihov položaj može vrlo  
jednostavno održavati vanjskim magnetskim pol-  
jem čini ih vrlo pogodnim za primjenu kao  
sredstva za podmazivanje kao i za izradu tzv.  
tekućih brtvi, a lakoća upravljanja tokom čini  
ih nezamjenjivim u izradi sustava za pozici-  
oniranje. Činjenica da u njen sastav ne ulaze  
nužno otrovne tvari, kao i da veličina nanočes-  
tica zajedno s adsorbiranim slojem surfaktanta  
ne prelazi nekoliko stotina nanometara, što je

znatno više od veličine većine organskih molekula i znatno manje od veličine stanice,  
čini ferotekućine dobrim kandidatom za primjenu u biomedicini, posebno kod liječenja  
tumora. Naime, glavni zadatak u liječenju bilo koje vrste tumora kemoterapijom je  
osigurati dovoljnu koncentraciju supstance koja uništava stanice tumora. To može ovisno  
o situaciji predstavljati veliki problem budući da ista supstanca redovito uništava i stanice  
zdravog tkiva. Iako se supstanca može unijeti u organizam na mjestu gdje se nalazi  
tumor, krvotokom će ista supstanca proći skoro čitavim tijelom. Ferotekućine bi ovdje  
mogle biti od velike koristi. Aktivna supstanca bila bi reverzibilno vezana za surfaktant  
koji je adsorbiran na površinu nanočestice. Ferotekućina bi se u organizam unosila ili  
venskim ili arterijskim putem te u slučaju da se tumor nalazi na nepristupačnom mjestu  
magnetskim poljem dovodila do cilja gdje bi se istim poljem i lokalizirala sve dok  
aktivna supstanca ne bi bila otpuštena u stanice tumora (slika 8<sup>6</sup>). Nakon toga bi se na  
sličan način ferotekućina i uklonila iz organizma.



Slika 8. Princip liječenja tumora  
uz pomoć ferotekućine.

Ferotekućine bi se isto tako mogle koristiti u liječenju tumora tzv. magnetskom  
hipertermijom. Znanstvenici su naime još u 19. st. ustanovili da se rast tumora može  
zaustaviti porastom temperature. Danas već postoje metode liječenja tumora koje se  
baziraju na toplinskoj energiji, npr. usmjereno zračenje radiovalovima, ultrazvuk ili  
lokalni termalni kontakt. Ipak, sve te metode imaju jedan zajednički nedostatak, a  
to je negativni učinak povišene temperature na okolno zdravo tkivo. Ferotekućine bi  
ovdje mogle predstavljati veliki napredak budući da bi one svoju funkciju za razliku  
od ostalih metoda obavljale iznutra svodeći tako negativni učinak na okolno zdravo  
tkivo na minimum. Ferotekućina bi bila unesena ili direktno u područje tumora ili bi  
se ondje dovela magnetskim poljem. Za održavanje ferotekućine magnetsko polje bi  
trebalo biti lokalizirano u području tumora, a za razvoj toplinske energije trebalo bi  
biti vremenski promjenjivo, npr. izmjenično magnetsko polje što je vrlo lako postići  
upotrebom elektromagneta. Zamislimo da u trenutku u kojem su svi magnetski dipolni  
momenti postavljeni paralelno vanjskom magnetskom polju magnetsko polje naglo  
promijeni smjer. Tada bi se svi magnetski dipolni moment našli u položaju maksimalne  
potencijalne energije. Zbog zakretnog momenta magnetski dipolni moment počeli bi se  
okretati prema novom položaju minimuma magnetske potencijalne energije disipirajući  
u sudarima kinetičku energiju rotacije u toplinsku. Ukoliko bi sada magnetsko polje  
ponovno promijenilo smjer, priča bi se ponovila. Na taj način bi se magnetska energija

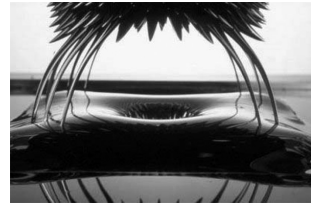
<sup>6</sup> Slika 8. uzeta iz: S. Odenbach, *Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Application of Ferrofluids*, Lect. Notes Phys. **763** (Springer, Berlin Heidelberg 2009).



postepeno pretvarala u toplinsku zagrijavajući pritom okolni medij, u ovom slučaju stanice tumora.

Iako je površina s mnoštvom šiljaka i udubina vjerojatno najfascinantnija pojava vezana uz ferotekućine, barem za sada, gotovo sve primjene, što postojeće, što potencijalne, temelje se na nekom drugom svojstvu ferotekućina. Tako je npr. pojava magnetske konvekcije osigurala primjenu ferotekućina u izradi suvremenih zvučnika što je dovelo do značajnog napretka u kvaliteti zvuka. Kao i u svakom uređaju tako i u zvučniku zagrijavanje predstavlja veliki problem jer smanjuje njegovu efikasnost te se javlja potreba za primjenom što učinkovitijeg načina hlađenja. Najčešće sustavi za hlađenje kao rashladne medije koriste vodu ili zrak, a toplina se od zagrijanog dijela odvodi strujanjem medija izazvanim ili pumpom ili ventilatorom. Magnetska konvekcija osigurava vrlo jednostavan i učinkovit način prijenosa topline, a ventilator ili pumpu zamjenjuje magnet. Zavojnica u zvučniku odgovorna za pretvorbu električnih titraja u mehaničke urojnena je u ferotekućinu koja se u blizini zavojnice održava magnetom. Budući da su ferotekućine paramagnetične, temperaturno ponašanje magnetske susceptibilnosti opisano je Curievim zakonom koji kaže da je ona obrnuto proporcionalna termodinamičkoj temperaturi. Dakle, sloju ferotekućine uz zavojnicu koji se prilikom rada zvučnika zagrijava smanjuje se magnetska susceptibilnost te on postaje slabije magnetiziran. Budući da je vanjski dio ferotekućine koji je na nižoj temperaturi sada jače magnetiziran on biva jače privučen prema magnetu koji se nalazi u blizini zavojnice istjerujući tako zagrijanu ferotekućinu prema van. Zagrijana ferotekućina u vanjskom dijelu predaje toplinu okolini, hladi se i biva ponovno privučena prema zavojnici. Dakle, dolazi do prijenosa topline konvekcijom ferotekućine koji može biti znatno učinkovitiji od prijenosa topline strujanjem zraka ili vode.

Zbog iznimne prilagodbe obliku vanjskog magnetskog polja, ferotekućine su našle primjenu čak i u umjetnosti. Naime, 2000. godine japanska umjetnica Sachiko Kodama započela je rad na umjetničkom projektu s ferotekućinama pod nazivom "Protrude, Flow". Cilj ovog projekta je izrada umjetničkih skulptura čiji se oblik, površinska struktura i boja mijenjaju u skladu s pojavama u okolini kao što su glazba, svjetlost ili ljudska komunikacija imitirajući tako razne oblike u prirodi, npr. biljke i životinje ili prirodne pojave, npr.



Slika 9. Jedna od brojnih Kodamainih dinamičkih skulptura.

tornado (slika 9<sup>7</sup>). Ovakve skulpture omogućavaju senzorska i kompjutorska tehnologija koje informacije iz okoline pretvaraju u električne impulse koji pak putem elektromagneta stvaraju raznovrsna magnetska polja na koja ferotekućina reagira. Kodamaini radovi su izloženi u muzejima diljem svijeta uključujući Skirball Cultural Center u Los Angelesu, National Art Center u Tokyu i Wexner Center for the Arts u Columbusu.

Zaključujemo da su ferotekućine nedvojbeno vrlo zanimljivi fizikalni sustavi i kao takvi ne bi trebali ostati izvan dometa znanstvenih laboratorija i školskih klupa. Ali isto tako, ferotekućine su vrlo korisni materijali koji su već danas prisutni u svakidašnjim uređajima poput zvučnika, CD-ROM-ova, kompjutora itd., a pored toga predstavljaju veliki potencijal za buduće primjene.

## Literatura

- [1] C. HOLM, J.-J. WEIS, *The structure of ferrofluids: A status report*, Current Opinion in Colloid & Interface Science **10** (2005), 133–140.
- [2] S. ODENBACH, *Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Application of Ferrofluids*, Lect. Notes Phys. **763** (Springer, Berlin Heidelberg 2009).

<sup>7</sup> Slika 9. uzeta s web stranice: <http://doraballa-ommo.blogspot.com/2008/08/sačiko-kodama.html>