

Željezno doba u fizici čvrstog stanja i obrazovanju

Dalibor Paar¹

Željezno doba u obrazovanju

Obrazovanje u svijetu u ovom trenutku prolazi kroz brze i velike promjene i značajno se udaljuje od koncepata obrazovnih sustava 20. stoljeća. Sama činjenica da mnoga zanimanja nestaju, a javljaju se brojna nova, govori da su promjene nužne i hitne. Fokusiranost obrazovanja od rane dobi (temeljena na novim spoznajama o razvoju mozga) na znanstveno obrazovanje (STEM odnosno STEAM) postaje ključno za razvoj suvremenog društva. Jedna od velikih promjena je uvođenje suvremenog znanstvenog obrazovanja već od rane dobi (najkasnije od 4. godine života) uz nastavak kroz cijelu obrazovnu vertikalu, neovisno o tome što će dijete kasnije raditi u životu. Veliki iskorak u istraživanjima kognitivnog razvoja djece od rane dobi početkom novog tisućljeća doveo je do novih standarda suvremenog obrazovanja: djecu treba od najranije dobi izložiti ne samo temeljnim konceptima fizike, kemije, biologije i informatike, već i upoznati sa složenijim konceptima – modelima. Priručnici za djecu 4–6 godina pod nazivom Teorija relativnosti ili Kvantno računarstvo postaju dio literature u vrtićima.

Transformacija obrazovnog sustava polazi od dvije ključne komponente: reduciranja izbora tema koje djeca uče te razvoja metoda s naglaskom na istraživačku i problemski orijentiranu nastavu uz što više vanučioničke nastave. Fizičari trebaju prirediti sadržaje prikladne za učenje od rane dobi. No, koje teme su važne? Odgovor je jasan – to su aktualne teme vezane uz razvoj znanosti i tehnologije. Ako se priča gradi oko takvih, uzbudljivih, intrigantnih i u pravilu još u potpunosti nerazjašnjenih tema, interes učenika je znatno veći.

Uzmimo za primjer temu koja je stavljena na margine našeg obrazovnog sustava, a ima enormni potencijal u razvoju novih tehnologija. Riječ je o supravodljivosti, fenomenu kojeg je još 1911. godine otkrio Heike Kamerlingh-Ones kada je ustanovio da električni otpor žive pada na 0 na temperaturama nižim od 4.2 K (-268.95°C – temperatura tekućeg helija). Daljnja istraživanja niza fizičara utvrdila su se važna svojstva ovog fenomena, kao što su prolazak električne struje kroz tanku izolatorsku barijeru (Josephsonov efekt) ili lebdenje magneta iznad supravodiča (Meissnerov efekt). O važnosti teme govori i činjenica da je za istraživanja vezana uz supravodljivost dodijeljeno osam Nobelovih nagrada. Hrvatski fizičari aktivno sudjeluju u istraživanjima ovog fenomena, pa mogu iz prve ruke dati uzbudljive materijale za potrebe obrazovanja.

Željezno doba u fizici čvrstog stanja

Fenomen supravodljivosti, dakle, već 107 godina zaokuplja pažnju fizičara te je i danas dio šire fronte istraživanja novih materijala u fizici čvrstog stanja. Novi materijali su temelj razvoja nanotehnologija, pa se različiti aspekti njihove fizike trebaju naći na svim razinama obrazovnog sustava. Iako se radi o složenom fenomenu, kao i druge važne fizikalne teme, s nekim od aspekata ovog fenomena djecu treba suočiti već u vrtiću. Kako dalje napreduju s fizikalnim znanjem, može se ulaziti u pojedine mikroskopske aspekte, o tome kako naboj putuje materijalom do efekata koje izaziva. Inače, kretanje

¹ Autor je s Fizičkog odsjeka, PMF, Sveučilište u Zagrebu; e-pošta: dpaar@phy.hr

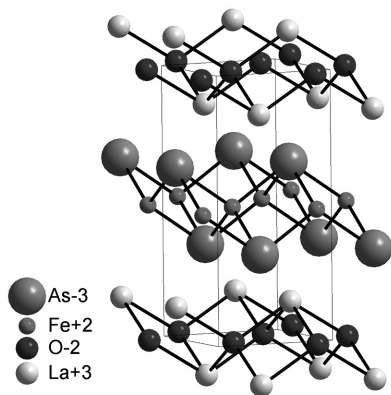
naboja običnim vodičem je za razine osnovne i srednje škole vrlo kompleksna tematika i niz aktualnih znanstvenih studija pokazuje globalno nerazumijevanje učenika unatoč svim dosadašnjim tehnikama.

Primjena supravodiča danas, u moćnim magnetima koji se nalaze u istraživačkim i dijagnostičkim uređajima te u vrlo preciznim (SQUID) magnetometrima, samo je manji dio mogućnosti primjene koje se mogu otvoriti ako se otkriju supravodljivi materijali s dovoljno visokim kritičnim temperaturama (temperatura ispod koje materijal postaje supravodljiv), magnetskim indukcijama i gustoćama električne struje. Za primjenu u tehnologiji je ključno da kritična temperatura bude iznad temperature tekućeg dušika (77 K, -196.15°C) jer je tekući dušik mnogo jeftiniji od ostalih kriogenih tekućina (helij, vodik) i lako se transportira. Kod klasičnih supravodiča (metali i njihove legure s nižim kritičnim temperaturama) teorijski okviri su dobro razrađeni (mikroskopska BCS teorija iz 1957. godine u kojoj se opisuje stvaranje Cooperovih parova elektrona koji se ponašaju kao bozoni – subatomske čestice cjelobrojnog spina i specifičnih svojstava koja omogućuju kretanje bez gubitaka energije). Nasuprot tome, brojni istraživači zadnjih desetljeća nastoje usavršiti teorijske modele drugog tipa materijala – visokotemperaturnih supravodiča [Bednorz & Müller, 1986]. Najvišu kritičnu temperaturu 92 K (-181.15°C) imao je oksidni kuprat $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ otkriven 1987. godine. Hrvatski fizičari aktivno se uključuju u eksperimentalna i teorijska istraživanja visokotemperaturne supravodljivosti, pregled je već dan u MFL-u (Barišić & Barišić, 2015–2016).



Slika 1. Prvi supravodljivi magnet u Zagrebu (NbZr , $B = 3.4\text{ T}$) konstruirao je prof. dr. sc. Amir Hamzić 1972. godine.

Dvadesetak godina kasnije dolazi do otkrića materijala koji cijeloj priči daju nove izazove. Radi se o novoj grupi intrigantnih materijala, željeznim pniktidima. Otkriće supravodljivosti u $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ s temperaturom supravodljivog prijelaza $T_c = 26\text{ K}$ dovelo je do značajnog proboja u istraživanjima visokotemperaturne supravodljivosti – željeznog doba u supravodljivosti [Kamihara 2008]. Ovi materijali imaju temperature supravodljivog prijelaza do 55 K, što je najviša kritična temperatura osim u slučaju supravodljivih kuprata. Iste godine hrvatski fizičari u suradnji s njemačkim počinju s istraživanjima ovih materijala [Grafe, Paar et al., 2008]. Dok je otkriveno nekoliko različitih familija supravodiča baziranih na željezu, svi oni posjeduju mehanizam kojim se antiferomagnetsko uređenje pretvara u supravodljivo podešavanjem elektronske gustoće promjenom kemijskog sastava, što je usporedivo s kupratima. Željezni pniktidi imaju elektronski aktivne Fe-As ravnine s multiorbitalnim karakterom, a dopiranjem elektronima kroz supstituciju s fluorom, potisnuto je antiferomagnetsko uređenje i dolazi do pojave supravodljivosti.



Slika 2. Struktura $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$.

Simetrija parametra uređenja i mehanizam sparivanja Cooperovih parova su jedni od najintrigantnijih problema aktualne fizike čvrstog stanja. U pniktidima supravodljivo sparivanje ne nastaje zbog konvencionalnog elektron-fonon vezanja (ionskih vibracija koje djeluju privlačno između dva elektrona) kakvo je dano BCS teorijom, već je posljedica nekonvencionalnog mehanizma sparivanja uslijed elektron-elektron Coulombske interakcije.



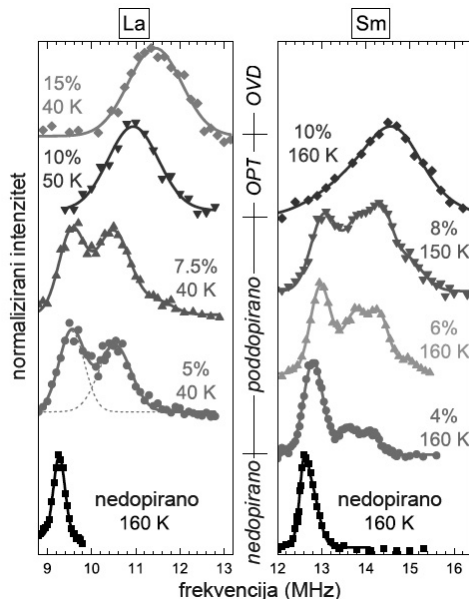
Slika 3. Laboratorij za NMR čvrstog stanja Fizičkog odsjeka PMF-a Sveučilišta u Zagrebu uspostavljen je u okviru EU projekta SOLeNeMaR (2009–2012) pod vodstvom prof. dr. sc. Miroslava Požeka.

Kao lokalne probe u stvarnom prostoru pogodne su eksperimentalne metode nuklearne magnetske rezonancije i nuklearne kvadrupolne rezonancije (NMR i NQR). Ove naprednije tehnike za razliku od mjerenja makroskopske susceptibilnosti omogućuju mjerenje lokalnih magnetskih i ili elektronskih okolina selektivnim pobuđenjima pojedinih atomskih jezgara. Kroz hiperfine interakcije, na mikroskopskoj skali mogu se istraživati statična i dinamična svojstva različitih materijala. Stoga je NMR/NQR jedna od malobrojnih tehnika koje mogu detektirati niskoenergijska pobuđenja spinova ili naboja koja dolaze iz novih faza ili nehomogenog uređenja spinova ili naboja. NMR/NQR također omogućuje uvid u supravodljivo stanje gdje hiperfino vezanje jezgara na elektronske spinove nije zasjenjeno Meissnerovim efektom nasuprot makroskopskoj susceptibilnosti mjerenoj sa SQUID-om.

Centralno pitanje koje se tiče svih familija željeznih pniktida je da li se magnetizam ili spinske fluktuacije natječu sa supravodljivošću ili ju pojačavaju. Kako su NMR i NQR

lokalne probe, moguće je razlikovati koegzistenciju ova dva fenomena sa scenarijem fazne separacije u kome su magnetizam i supravodljivost razvijaju zasebno u prostorno odvojenim područjima uzorka.

Tako se ovom metodom može utvrditi koegzistencija dviju različitih elektronskih okolina na nanoskali u poddopiranim pniktidima, što se može opaziti kao dva maksimuma u As NQR spektru. To ukazuje da supravodljive i magnetske volumne frakcije koegzistiraju na nanoskali te sistem poprima odgovarajuće osnovno stanje ovisno o omjeru intenziteta tih maksimuma. Drugo moguće objašnjenje tih maksimuma može biti orbitalno uređenje koje je vezano sa statičnim magnetizmom.



Slika 4. ^{75}As NQR spektar od $R\text{FeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ ($R = \text{La}, \text{Sm}$). “OPT” i “OVD” se odnose na optimalno dopirane i naddopirane uzorke. Dva oblika elektronskih uređenja koje vidimo kao maksimume u ovisnosti intenziteta NQR signala o frekvenciji, mogu koegzistirati na nanometarskoj skali.

Daljnijim istraživanjima proučavaju se međudnosi između supravodljivosti i magnetizma u drugim pniktidima, na primjer u $\text{Ca}_{1-x}\text{Na}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($T_c = 34$ K) i $\text{Na}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_2\text{As}_2$ ($T_c = 27$ K) koji su elektronski dopirani izvan ravnina te slični fluorom dopiranim $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ gdje je opažen dvostruki maksimum u NQR spektru. Istražuje se supravodljivo stanje te odnos supravodljivosti i magnetizma u tim materijalima te utjecaj kontroliranih nečistoća kao As praznina u strukturi.

Istraživanja je financirala Hrvatska zaklada za znanost u okviru projekta IP-11-2013-2729.

Literatura

- [1] J. G. BEDNORZ, & K. A. MÜLLER, Z. Physik B – Condensed Matter **64**: 189 (1986).
- [2] Y. KAMIHARA, T. WATANABE, M. HIRANO AND H. HOSONO, J. Am. Chem. Soc. **130**, 3296 (2008).
- [3] H.-J. GRAFE, D. PAAR, G. LANG, et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 047003 (2008).
- [4] N. BARIŠIĆ, O. S. BARIŠIĆ, Matematičko-fizički list, **LXVI** 1, 11–14 (2015–2016).