

# Emil Babić - profesor emeritus, jedan od pionira niskotemperaturne fizike u Hrvatskoj

---

Smontara, Ana

Source / Izvornik: **Matematičko fizički list, 2022, 73, 3 - 13**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:692733>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-05**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





## Emil Babić – profesor emeritus, jedan od pionira niskotemperaturne fizike u Hrvatskoj

Ana Smontara



Emil Babić

Profesor Emil Babić, iako već dulje u mirovini, još je znanstveno izuzetno aktivan u polju eksperimentalne fizike čvrstog stanja nastavljajući svoju dugogodišnju suradnju sa znanstvenicima Fizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta (FO PMF) Sveučilišta u Zagrebu (svoje matične institucije) i Instituta za fiziku Sveučilišta (IFS), danas Institut za fiziku (IF), institucije na kojoj je započeo znanstvenu karijeru. Nedavno je na Institutu za fiziku prešao s radom ukapljivač helija, drugi po redu, instaliran 1991., koji je do današnjeg dana ukapljivao helij za eksperimentalna istraživanja u fizici kondenzirane materije, znanosti o materijalima i srodnim disciplinama u Zagrebu.

Tim povodom se okupila grupa znanstvenika, djelatnika i umirovljenika, koji su na razne načine bili povezani s radom tog uređaja (slika 1). Među njima je istaknutu ulogu imao Emil Babić, jer je, kao mladi znanstvenik, aktivno sudjelovao i pri instalaciji prvog ukapljivača (Collinsov stroj konstruiran na Massachusetts Institute of Technology, MIT). Tom prigodom smo zamolili profesora Babića za razgovor na temu *Niskotemperaturna eksperimentalna fizika čvrstog stanja kod nas*, na što se on vrlo ljubazno odazvao.



Slika 1. Profesor Emil Babić (u sredini) sa znanstvenicima i tehničarima prigodom prestanka rada ukapljivača helija na Institutu za fiziku, 18. ožujka 2022.

## **Kako je teklo Vaše osnovnoškolsko i srednjoškolsko obrazovanje? Tko je pobudio Vaš interes za fiziku?**

Rođen sam u Hvaru usred II. Svjetskog rata, pa mi je djetinjstvo bilo prilično kaotično. Već u prvih devet godina mog života promijenili smo šest prebivališta. Moj otac je interniran nedugo nakon mog rođenja, pa se majka tijekom rata morala sama brinuti o dvoje male djece. Stoga smo se preselili u obiteljsku kuću Šime Vučetića u Veloj Luci. Krajem rata, 1945., smo se preselili kod tete u Split i putem Crvenog križa tražili oca. Nakon par mjeseci smo saznali da živi u Osijeku, pa smo odmah krenuli tamo. Osijek mi se sviđao, no nakon dvije godine smo premješteni u Donji Miholjac, gdje sam započeo osnovnu školu. Godine 1951. smo se preselili u Našice, gdje sam 1957. upisao gimnaziju, koja je tada bila u ljetnikovcu grofova Pejačevića u lijepom parku, a većina nastavnika su bili mladi entuzijasti. Najviše su me zanimale kemija i fizika, koje su nam predavali profesorica S. Šabarić i profesor B. Babić. To je bilo doba prvog umjetnog satelita Sputnik i prvog astronauta J. Gagarina, pa sam izrađivao rakete i čitao knjige o astronautici. Volio sam i atletiku, a bio sam registrirani rukometaš. S klubom "Partizan" sam vikendima putovao (pretežno kamionom) na utakmice diljem istočne Slavonije. Volio sam i planinariti, prošao sam Julijske alpe od Triglava do Jaloveca, a bio sam i na Zugspitze u Bavarskoj.

## **Studij fizike završili ste na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu (PMF) Sveučilišta u Zagrebu. Koji su Vam kolegiji bili najzanimljiviji i kakav su trag profesori ostavili u Vašem studiju?**

Godine 1961. sam upisao inženjerski studij fizike u Zagrebu, zbog toga što je prethodno studij teorijske fizike upisao moj brat Matko. Tada je inženjerski studij fizike upisivalo godišnje oko 150 studenata, uglavnom iz Zagreba. Početak studija mi nije bio uspješan, jer sam mislio da se uz učenje mogu nastaviti baviti sportom i noćnom razonodom s kolegama. To nije bilo moguće uz "mršavu" stipendiju Ministarstva prosvjete i nedovoljnu prehranu u Studentskom centru. Stoga sam u drugom semestru počeo ozbiljno učiti i dospio među desetak studenata s najboljim ocjenama (to je bio pravi poduhvat obzirom da su u toj generaciji bili izvrsni studenti: V. Paar, I. Andrić, T. Ivezić). Tadašnji inženjerski studij se granao na teorijsku i eksperimentalnu fiziku, a eksperimentalna fizika dalje na atomsku fiziku, fiziku čvrstog stanja i nuklearnu fiziku (koju sam izabrao). U početku studija dojmili su me se kolegiji iz Opće fizike profesora I. Šlause i M. Paića (s vrsnim pokusima V. Petrovića), a kasnije predavanja profesora K. Ilakovca i S. Kurepe. Pri kraju studija me profesor Paić pozvao da se nakon diplome (*Mossbauerov efekt*, nuklearna fizika) zaposlim kao poslijediplomski student iz *Fizike čvrstog stanja* na Institutu za fiziku Sveučilišta (IFS). Uz dopuštenje Ministarstva prosvjete zaposlio sam se na IFS-u u srpnju 1966.

## **Kako je tekao Vaš poslijediplomski studij? Za koje ste se područje posebno opredijelili i zašto?**

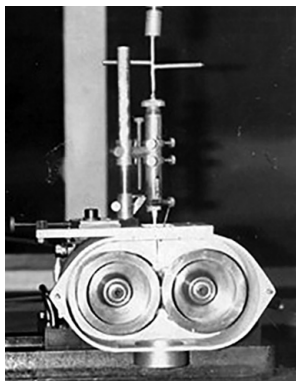
U jesen 1966. sam upisao poslijediplomski studij *Fizika čvrstog stanja* na PMF-u i dobio zadatak da, zajedno s R. Krsnikom i V. Malnarom, u suterenu IFS-a, instaliramo ukapljivače tekućeg dušika i helija, te uredimo laboratorije za elektromagnetska mjerenja na niskim temperaturama. U to vrijeme smo uz pomoć radione sami radili sve poslove potrebne za instalaciju kriogenih uređaja, tako da je taj složeni i dugotrajni tehnički zadatak bio daleko od mojih želja. Uz naš veliki trud IFS je krajem 1967. prvi u ovom dijelu Europe, otpočeo s proizvodnjom i korištenjem tekućeg helija (slika 2), s temperaturama do 1.5 K ( $-272\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Korištenje tekućeg helija nije samo proširilo spektar istraživanja u fizici, kemiji, nanotehnologiji i biomedicini u Zagrebu, već je i znatno unaprijedilo njihovu kvalitetu.



Slika 2. a) Prvo ukapljivanje helija na IFS-u zimi 1967.  
 Slijeva nadesno: V. Roman, R. Krsnik, K. Ilakovac, E. Babić i V. Malnar.  
 b) Prvi kriostat na IFS-u za mjerenje električnog otpora u tekućem heliju 1968.

Nadalje, niz važnih pojava kao što su supravodljivost i kvantni Hallov efekt mogu se proučavati samo na niskim temperaturama. Ipak, sama dostupnost tekućeg helija, kriostata i uređaja za mjerenje električnog otpora nije nam omogućavala istraživanje tada zanimljivih sustava. Naime, metastabilni uzorci prezasićenih slitina (slitine s koncentracijom primjese višom od ravnotežne), dobiveni metodom klipa i nakovnja u laboratoriju A. Tonejca, su bili sićušni, pa smo trebali prvo razviti posebne metode pripreme električnih kontakata, kao i nosače uzoraka prikladne za mjerenja u širokom rasponu temperature od 1.5 do 800 K (širi opis je u [1]). Stoga sam sve do odlaska na specijalizaciju u Genovu krajem 1970. bio opterećen s desetak i više sati dnevno uređenjem kriogenih laboratorija, razvojem eksperimentalnih tehnika, mjerenjima (tada nije bilo računala, pa su mjerenja korištenjem tekućeg helija trajala non-stop, po nekoliko dana) i nastavom (vježbe i praktikumi), tako da mi nije ostajalo dovoljno vremena za poslijediplomski studij. Razvoj eksperimentalnih tehnika je unaprijeđen dolaskom B. Leontića iz Brookhavena, SAD, na IFS u jesen 1968. Njegov mlin za brzo kaljenje (slika 3 lijevo) je po prvi put omogućio proizvodnju velikih uzoraka metastabilnih slitina u kontroliranim uvjetima i time praktički osigurao prednost IFS-a u istraživanjima na tom području. Proizvodnja velikih uzoraka nije protekla bez poteškoća. E. Girt i ja smo dugo podešavali parametre uređaja dok ujesen 1969. nismo dobili prvi veliki uzorak, oblika otoka Hvara (slika 3 desno). To nam je omogućilo već 1970. objavljivanje desetak zapaženih znanstvenih radova o metastabilnim slitinama. Time se Zagreb “preko noći” probio među vodeće centre u istraživanju tih sustava (Caltech, Orsay, MIT), što je rezultiralo IFS-ovom organizacijom 1. *Međunarodne konferencije o metastabilnim slitinama* u Brelima, 1970. Ubrzo je to područje postalo jedno od ključnih u fizici materijala, te dovelo do novih koncepata u fizici (kvantni koherentni učinci), kao i praktičnih primjena (jezgre transformatora, kućišta USB). Sukladno predviđanju M. Paića [2] ta su istraživanja “omogućila stvaranje posve novih materijala za zapanjujućim kombinacijama svojstava i istovremeno nam ukazala na neke, i danas neriješene probleme teorije neuređenih sustava”. Time je IFS postao zanimljiv inozemstvu za suradnju (odlazak mene i I. Zorića u Istituto di Fisica, Genova), dok su na IFS dolazili mladi strani istraživači (P. J. Ford, J. R. Cooper). J. R. Cooper je ubrzo po dolasku na IFS, zajedno s M. Miljakom i Z. Vučićem, izgradio uređaje za mjerenje magnetske susceptibilnosti i termostruje, čime su kriogeni laboratoriji IFS-a kompletirani [3]. Po mom povratku iz Genove 1972. napravili smo novi potencijometar za mjerenje električnog otpora, a od supravodljive Nb-Zr žice donesene iz Genove je

A. Hamzić uz pomoć B. Leontića i M. Vukelića napravio prvi supravodljivi magnet na IFS-u. Iste godine su moji mentori (B. Leontić i C. Rizzuto) odlučili da umjesto nastavka poslijediplomskog studija krenem izravno na izradu doktorata na PMF-u (u Italiji tada nije postojao doktorski studij). Doktorsku disertaciju o nekim transportnim svojstvima prezasićenih slitina Al s 3d prijelaznim metalima (T) sam napisao uz pomoć J. R. Coopera i obranio u veljači 1974. pred međunarodnim povjerenstvom: B. Leontić, C. Rizzuto i J. Friedel.



*Slika 3. Uređaj za ultrabrzno kaljenje slitina (lijevo) i prvi uzorak dobiven tim uređajem 1969.*

### **Nakon doktorata u području fizike čvrstog stanja, poslijedoktorsko usavršavanje Vam je obilježilo sustavno istraživanje metalnih stakala na IFS-u.**

Nakon doktorata sam na poziv J. Friedela boravio mjesec dana u Orsayu, a nakon toga akademsku godinu 1974/75 proveo na Imperial Collegeu (IC) u Londonu. U Orsayu sam uz pomoć S. Barišića upoznao elitu teorijske (P. G. de Gennes, A. Blandin, G. Toulouse) i eksperimentalne (A. Fert, I. A. Campbell, A. Guinier) fizike čvrstog stanja. U Londonu se grupa B. R. Colesa (koji je uveo naziv spinsko staklo za magnetski neuređene sustave) pretežno bavila magnetskim i transportnim svojstvima slitina, pa sam nastavio s proučavanjem prezasićenih Al-T i Zn-T slitina, te kanio preći na proučavanje odstupanja od Mathiessenova pravila u slitinama srebra i torija, kada A. D. Caplin izradi supravodljivi potencijometar. Boravak u Londonu mi je bio jako ugodan. Kao i prethodno, u Genovi i Parizu sam u slobodno vrijeme pohađao muzeje, kazališta i koncerte, te se družio s kolegama i studentima. Na jednom seminaru u IC-u o amorfnim slitinama (slitine s nasumičnim rasporedom atoma kao u staklu ili tekućini, metalna stakla, MS [4]), uočio sam da unatoč otkriću metalnih stakala davne 1960. i konferencije u Brelima 1970., razumijevanje tih sustava bilo je prilično oskudno, što je dijelom posljedica odsustva sustavnih istraživanja njihovih temeljnih svojstava. Stoga sam odlučio da se po povratku u Zagreb prebacim na istraživanje MS i da pokušam pridobiti što više članova odjela Fizike metala II (FM II) IFS-a da mi se pridruže. U tu svrhu sam iz Londona donio bitne dijelove za sastavljanje lučne peći, kojom sam kanio praviti početne (master) slitine za brzo hlađenje. Međutim, na IFS-u se dio znanstvenika FM II (J. R. Cooper, A. Bjeliš, I. Batistić, L. Forró, E. Tutiš) počeo baviti kvazijednodimenzionalnim vodičima u suradnji sa S. Barišićem i grupama u Budimpešti i Orsayu, tako da smo za proučavanje metalnih stakala ostali samo B. Leontić, B. Očko, A. Hamzić i ja. Ipak, uskoro su nam se pridružili studenti koji su radili diplomske radove kod nas: J. Lukatela, D. Pavuna, Ž. Marohnić, J. Ivkov, R. Ristić i B. Pivac, tako da je sustavno proučavanje svojstava MS moglo započeti. Ubrzo je B. Leontić napravio novi uređaj za



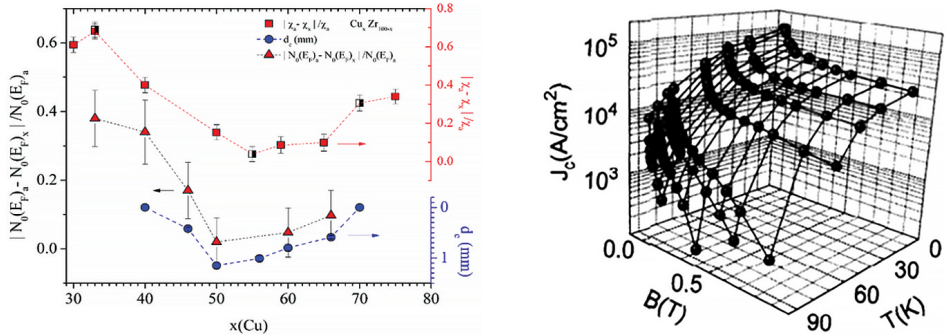
brzo kaljenje razmazivanjem mlaza taljevine na obodu brzo rotirajućeg bakrenog valjka (melt spinning), koji je prikladniji za proizvodnju MS od mlina, zbog duljeg kontakta taljevine s valjkom, a time i niže konačne temperature uzorka [4]. Napravili smo i peć za lučno taljenje i preuredili RIZ-ov uređaj za indukcijsko taljenje. Istovremeno je J. Ivkov započeo mjerenja Hallovog efekta, dok je M. Očko u suradnji s M. Stubičarem mjerio mikrotvrdoću, koja je u MS jednostavno povezana sa svim mehaničkim svojstvima kao i s elektronskom strukturom (ES) dane slitine. Već na 3. konferenciji o brzo kaljenim metalima (RQ III) u Brightonu 1978. imali smo četiri zapažena predavanja, a idućih desetak godina je “Zagrebačka škola” bila među vodećima u istraživanju MS u svijetu. To je rezultiralo suradnjama s istaknutim institucijama u svijetu, pozvanim predavanjima na međunarodnim skupovima i potražnji za našim mladim istraživačima (D. Pavuna, J. Horvat). Tijekom slobodne studijske godine 1980/81 sam u CSIRO u Sydneyu konstruirao napredni uređaj za melt spinning, prvi u Australiji. Početku rada tog uređaja je nazočio ministar znanosti Australije. Kada se u sekundi prostor oko uređaja ispunio sjajnim metalnim trakama rekao je da bi to “bilo korisno za Božićne dekoracije”! Na tom uređaju napravio sam brojne uzorke MS, koje smo dugo istraživali na IFS-u. Održao sam seminare u Sydneyu, Canberri i Melbourneu, družio se sa S. Marčeljom, te uživao sa suprugom u prirodi i osobitoj hrani.

### **Koji su Vaši najznačajniji rezultati te doprinosi fizici čvrstog stanja?**

Primjeri s početka rada su Kondo efekt, koji uzrokuje porast otpora sniženjem temperature  $i$ /ili lokalizirane spinske fluktuacije (SF, drugačiji opis iste pojave), te odstupanje od Mathiessenovog pravila (neaditivnost fononske i primjesne otpornosti) u prezasićenim slitinama aluminijska (Al) i cinka (Zn) s prijelaznim metalima (T). Zbog niske topljivosti T u Al nije postojao neposredni dokaz Kondo/SF učinka na otpornost u Al-T slitinama. Na naše iznenađenje, mjereći otpor prezasićenih Al-Mn slitina s 2–5 at. % Mn, otkrili smo da on brzo raste sniženjem temperature [5], što je dokaz Kondo/SF ponašanja. Trebalo je još utvrditi da li je ponašanje otpora o temperaturi u Kondo sustavima (Zn-T, Au-T) jednako onom u SF sustavima (Al-T), tj. univerzalno. Tu provjeru je C. Rizzuto ponudio svim suradnicima, no osim A. M. Stewarta i mene svi su odbili zbog različitih teorijskih opisa Kondo i SF pojava. Pokazali smo da univerzalnost postoji, a nedugo zatim je J. Cooper mjerenjima otpora Al-Mn slitina pod visokim tlakom pokazao da je univerzalno ponašanje sukladno Kondovom opisu [3]. Za kraj istraživanja Kondo efekta smo G. Gruner i ja 1976. postavili model međudjelovanja među primjesama. Za provjeru modela smo pripremali slitine Al-Mn s koncentracijama Mn do 12 at. % [1]. Korištenjem prezasićenih slitina Al, Zn-T smo prvi točno odredili temperaturne i koncentracijske ovisnosti odstupanja od Mathiessenovog pravila. Stoga nam je povjerena organizacija 1. EPS konferencije o fononskom otporu ispod Debyeve temperature u Cavtatu 1977. na kojoj su sudjelovali najpoznatiji istraživači područja iz čitavog svijeta.

Istraživanje metalnih stakala (MS) [4] je trajni izazov u fizici (po P. W. Andersonu je “priroda stakla i staklastog prijelaza najdublji i najtemeljitiји neriješeni problem u teorijskoj fizici čvrstog stanja”). Stoga smo proučavali konceptualno i tehnološki najzanimljivije vrste MS i skoro sva njihova svojstva. Iz brojnih postignuća izdvojit ću ih samo par za magnetska i nemagnetska MS. Otkrili smo nemonotono ponašanje kritičnog eksponenta magnetske susceptibilnosti u blizini perkolacijskog praga za dugodosežno magnetsko uređenje, te dokazali u suradnji s E. P. Wohlfarthom jaki feromagnetizam iznad tog praga. Razvili smo (J. Horvat, S. Sabolek, M. Šušak, P. Popčević) i jednostavni model dinamičke magnetizacije mekih feromagnetika, koji opisuje mogućnost bezhisterezne magnetizacije i smanjenje gubitaka energije. Kod nemagnetskih metal-metal MS smo pokazali neposrednu vezu elektronske strukture i promjene predznaka Hallovog koeficijenta  $R_H$ , te razvili u suradnji s R. Jacobsom model

koji omogućuje predviđanje koncentracije kod koje  $d$ -stanja kasnog prijelaznog metala postaju dominantna na Fermijevoj razini ( $E_F$ ), pa se promijeni predznak od  $R_H$ . Među prvima smo temperaturno ponašanje električne vodljivosti istih MS opisali učincima kvantne koherentnosti, a korištenjem inducirane anizotropije vodljivosti smo u suradnji s G. J. Morganom odredili doprinos  $d$ -elektrona vodljivosti tih MS. Razvili smo i novi model lakoće ostakljivanja predstavljene najvećom debljinom uzorka,  $d_c$  zasnovan na sličnosti elektronske strukture MS i spoja koji prvi nastane kristalizacijom MS, koji dobro opisuje koncentracijsku ovisnost lakoće ostakljivanja (slika 4a).



Slika 4. a) Primjena modela za lakoću ostakljivanja za Zr-Cu slitine.

b) Ovisnost kritične struje  $J_c$  o magnetskom polju  $B$  i temperaturi  $T$  za Bi-Sr-Ca-Cu-O supravodljivu traku.

Godine 1987. sam sretnim slučajem uključen u istraživanje visokotemperaturnih supravodiča (VTS), kuprata Y-Ba-Cu-O i Bi-Sr-Ca-Cu-O na IF-u. Naime, nakon otkrića supravodljivosti s temperaturom prijelaza  $T_c = 40$  K u La-Sr-Cu-O 1986. C. Rizzuto me je pitao za moguću idući VTS. Predložio sam Y-Ba-Cu-O, te spomenuo da očekujem da su VTS crne boje. Kada je u siječnju 1987. predstavljena supravodljivost s  $T_c = 91$  K u polifaznom uzorku Y-Ba-Cu-O, sa supravodljivom fazom crne boje, primljen sam u zajednička istraživanja VTS IF-a i IRB-a (M. Prester, N. Brničević) i pozvan da držim predavanja u Genovi. U tim istraživanjima je važnu ulogu imao razvoj novih metoda istraživanja i uređaja Ž. Marohnića, Đ. Drobca, M. Prester i I. Kuševića. Uspješno smo proučavali gustoće kritičnih struja,  $J_c$  i kritična polja povezana s gibanjem magnetskih virova pod utjecajem temperature ( $T$ ) i magnetskog polja ( $B$ ). Prvi smo uveli dvofazni opis polikristalnih VTS: (slabe) veze između supravodljivih zrna + (jaka) VTS zrna i s tim povezani perkolativni tok i raspodjelu  $J_c$  unutar uzoraka. Od 1993. smo istraživali i prototipne srebrom oklopljene trake i žice Bi-Sr-Ca-Cu-O, koje se u nekim gusto naseljenim gradovima USA i Japana koriste za distribuciju električne energije. Uveli smo prikaz njihove  $J_c$ - $B$ - $T$  površine (slika 4b) koja sadrži sve informacije potrebne za primjenu supravodiča (npr., magnetna za MRI ili fuziju ili ubrzivače čestica). Ubrzo smo predložili, a zatim i dokazali jako poboljšanje svojstava važnih za primjenu tih traka zapinjanjem vrtloga na nanoskopskim defektima nastalim fisijom u  $U_3O_7$  dopiranim trakama ozračenim termičkim neutronima. Razvili smo jednostavni model koji omogućuje optimizaciju postupka, tj. izbor najpovoljnije koncentracije dopiranja i doze ozračivanja za dani sustav. Od 2001. smo istraživali i supravodič  $MgB_2$ . On ima jako vezana zrna, što olakšava pravljenje žica s visokim  $J_c$ , a uz to je samodopiran, jer prirodni bor sadrži oko 20 % izotopa  $^{10}B$  koji ( $n, \alpha$ ) reakcijom prelazi u visokoenergijske alfa čestice, koje naprave nanoskopske centre zapinjanja virova u uzorku. U suradnji s Đ. Miljanićem smo prvi dokazali da ozračivanje  $MgB_2$  neutronima

jako poboljša njegova svojstva važna za primjenu ( $n$ , alfa) reakcija se može koristiti i za poboljšanje  $J_c$ -B-T površine drugih supravodiča dopiranih borom). Prvi smo dokazali korelirano zapinjanje virova u žicama  $MgB_2$  dopiranim nanočesticama Si ili SiC. Izuzetno poboljšanje  $J_c$  u magnetskom polju u  $MgB_2$  dopiranom nanočesticama SiC smo u suradnji s S. X. Douom objasnili sinergijom koreliranog zapinjanja virova na nanočesticama i poboljšanja dopiranjem ugljikom iz SiC. Posebno se ponosim suradnjom na poboljšanju elektromagnetskih svojstava  $MgB_2$  supravodiča dopiranog magnetskim nanočesticama u okviru UKF 1B projekta (2008.–2011.). Sredstvima tog projekta smo napravili prvi laboratorij za proizvodnju magnetskih nanočestica u Hrvatskoj i pokrenuli pilot proizvodnju  $MgB_2$  žica. Proizveli smo stotinjak različitih žica među kojima su dopirane nanočesticama nikla i niklenog ferita oklopljene grafitom imale supravodljiva svojstva bliska onim najboljih žica  $MgB_2$  u svijetu. Razvili smo novi opis poboljšanja svojstava važnih za primjenu pomoću omjera ireverzibilnog polja (magnetsko polje pri kojem je  $J_c = 0$ ) dopirane i nedopirane žice.

Zadnjih godina u okviru široke međunarodne suradnje uspješno istražujemo nove visokoentropijske slitine, VES (slitine s četiri ili više glavnih sastojaka). Istraživanjem prijelaza iz VES u klasične slitine, KS (sadrže jedan glavni sastojak) istog sastava, koji omogućuje razumijevanje nastanka VES i ocjenu njihovog tehnološkog potencijala u odnosu na onaj KS, pokazali smo [6] da intrinzična svojstva VES, kao i ona KS, određuje elektronsku strukturu, a kemijska složenost igra u tome manju ulogu. Ukratko, ponašanja VES su slična onim MS i prezasićenih KS, a prednost im je da se mijenjanjem koncentracije  $i$ /ili sastava svojstva mogu fino podešavati. Kako VES omogućuju proučavanje niza važnih problema u fizici nadam se da ćemo ih nastaviti proučavati.

#### **S kojim znanstvenicima, u Hrvatskoj i inozemstvu, posebno uspješno surađujete?**

Za moj znanstveni razvoj je bila odlučujuća izvrsna suradnja s mentorima B. Leontićem i C. Rizzutom (slika 5), a puno sam naučio od mog cjeloživotnog prijatelja, mentora i suradnika J. R. Coopera (slika 6a). Tijekom 56 godina istraživačkog rada surađivao sam s mnogo znanstvenika različitih profila (fizičara, kemičara, metalurga) i tehničara iz više zemalja i ta suradnja je u većini slučajeva bila vrlo uspješna.



*Slika 5. Na EPS konferenciji u Cavtatu 1977. Slijeva nadesno: A. Hamzić, B. Leontić, J. Lukatela, E. Babić, B. Korin, R. Krsnik i sprijeda C. Rizzuto.*

Štoviše, mogao bih parafrazirati I. Newtona i reći da sam puno toga ostvario, *jer sam nošen na plećima divova*. Imena tih divova su na zajedničkim publikacijama, a neki su na slikama  $i$ /ili spomenuti u tekstu.





Slika 6. a) Šetnja po Samoborskom gorju 2016. s kolegom i prijateljem J. R. Cooperom te suprugom A. Karmelić.

b) Studenti i suradnici profesora Emila Babića, slijeva nadesno: J. Ivkov, T. Rudeš i Đ. Drobac.

Upoznao sam i nekoliko dobitnika Nobelove nagrade: P. W. Andersona, A. Fertu, P.-G. de Gennesa, V. L. Ginzburga, N. F. Motta, C. Rubiu i A. Salama. S A. Salamom sam se sreo u dva navrata. Prvi put na Imperial Collegeu (IC) 1974., a potom u ICTP-u 1988., kao suorganizator 1. *Eksperimentalne radionice iz visokotemperaturnih supravodiča* (VTS, slika 7).



Slika 7. Sudionici 1. *Experimental Workshop on HTc Superconductors* u Trstu 1988.: C. Gough, E. Babić, X. Sishen, P. Ganguli, Đ. Drobac, čuče M. Prester i K. Zadro.

Pri prvom susretu je A. Salam omalovažavao teme istraživanja iz čvrstog stanja na IC-u (Kondo efekt i odstupanje od Mathiessenovog pravila) rekavši: “Umjesto prljavštinom u metalima, trebali bi se baviti utjecajem ekstremnih magnetskih polja na elektrone u tvari”. Međutim, na svečanom ručku u ICTP-u 1988. on nije krio zadovoljstvo uspjehom radionice o VTS, jer je ona bila najneposredniji način ostvarenja njegove želje da se vrhunska znanost prenese u Treći svijet. A. Salam je tijekom rata 1991. poslao novčanu pomoć hrvatskom Crvenom križu i zajedno sa 109 dobitnika Nobelove nagrade potpisao apel za mir u Hrvatskoj koji je inicirala Greta Pifar-Mrzljak. P. W. Anderson me fascinirao brzinom reakcije. Tijekom ručka u profesorskoj kantini IC-a, 1975., fizičar N. Rivier je tvrdio da u amorfnoj (staklastoj) tvari fononi (kvantni opis titranja atoma u tvari) nisu mogući, na što je Anderson nožem pozvonio po staklenoj čaši i sa smješkom rekao: “To je učinak fonona, zar ne?” Tada su, unatoč

Ginzburgovom predviđanju VTS u 1960-tim, i Anderson i de Gennes (krivo) smatrali da supravodljivost više ne nudi otkrića, pa se de Gennes prebacio na proučavanje polimera. Mott je tijekom posjete IFS-u ranih 1980-tih, unatoč užasne vrućine i poodmakle dobi, više od sat vremena strpljivo analizirao naše rezultate.

**U radu ste posebnu pažnju posvetili odgajanju mladih znanstvenika i uspostavi istraživačkih grupa na IF-u i FO PMF-a temeljenih na zajedničkim istraživanjima u okviru zajedničkih projekata.**

Već na početku rada u znanosti i nastavi uvjerio sam se da je najučinkovitiji prijenos znanja putem neposredne komunikacije, te da budućnost znanosti i cijelog društva leži na plećima mladih, zbog njihove neiscrpane energije, entuzijazma i nespitanosti (slika 6b). Stoga sam se trudio da zamisli jasno prikažem i temeljito pretresem sa suradnicima. Ponekad smo u našim razgovorima intuitivno došli do rješenja problema, ili smo uvidjeli potrebu da proširimo ili čak promijenimo planirana istraživanja. Također sam uvijek bezrezervno pomagao i poticao napredovanje mladih znanstvenika, neovisno o tome jesu li bili moji suradnici ili ne. Ponosan sam što sam u okviru svojih zamisli i/ili projekata, uspio tokom niza godina privući izvrsne suradnike s IF-a, FO PMF-a i izvan Zagreba (slika 8), te da smo zajedno pridonosili rješavanju niza važnih problema u fizici: od metastabilnih i neuređenih sustava do visokotemperaturnih supravodiča. Osobito sam ponosan što sam neko vrijeme vodio zajedničke projekte IF-a i FO PMF-a, jer smatram da je zatvaranje znanosti u institucionalne okvire loše rješenje, posebno za zemlje s malim brojem aktivnih znanstvenika. No veselio sam se i kada su moji suradnici prijavljivali vlastite projekte, jer čvrsto vjerujem da napredak znanosti traži da učenici prošire i premaše istraživanja svojih učitelja. Po mom saznanju svi moji bivši suradnici su se kasnije iskazali u znanosti ili njezinim primjenama, bilo kod nas ili inozemstvu.



*Slika 8. a) Na konferenciji YUCOMAT 2018. u Herceg Novom.*

*Slijeva nadesno: I. Đerđ, L. Forró, D. Pavuna, E. Babić i R. Ristić.*

*b) Susret prigodom 80-tog rođendana profesora Babića.*

*Slijeva nadesno: Đ. Drobac, Ž. Marohnić, K. Zadro i E. Babić u ljeto 2022.*

**Vašu karijeru obilježila je i plodonosna međunarodna suradnja, direktna ili u okviru znanstvenih projekata na kojima ste bili voditelj, ili suradnik.**

Zahvaljujući širokoj znanstvenoj suradnji suvodio sam tri međunarodna znanstvena projekta i to pred dvadesetak godina: projekt s USA/ NIST iz MS, australski projekt iz VTS i miješani projekt s Francuskom, te sudjelovao na još tri takva. Tu bih mogao ubrojiti i vođenje UKF 1B projekta iz 2008. Većina moje međunarodne suradnje bila je neformalna, kao ona sa suradnicima s IF-a i FO PMF-a: obratim se za pomoć u onome što je nužno za ostvarenje zamisli (uzorke ili sinhrotronska istraživanja) i pritom sažeto objasnim zamisao i moja očekivanja. Skoro uvijek sam dobio traženo i to neovisno o

tome da li sam se obratio uglednom znanstveniku ili mladom istraživaču. U nekoliko slučajeva izravne suradnje s teorijskim fizičarima (N. Rivier, V. Zlatić, T. Ivezić, E. P. Wohlfarth, R. L. Jacobs, G. J. Morgan) ponuđen nam je opis naših rezultata, koji smo na temelju njegove logičnosti i suglasnosti s našim i drugim, neovisnim rezultatima prihvatili ili ne. Naprimjer, model opisa promjene predznaka Hallovoeg efekta u Zr-T MS putem “križanja”  $d$ -elektronskih energijskih vrpca Zr i T smo prihvatili tek kada smo se uvjerali da on opisuje i ponašanje termostruje.

**Autor/suautor ste iznimno velikog broja znanstvenih radova i više poglavlja u knjigama te dvije knjige, među kojima se posebno ističe zbirka zadataka iz opće fizike.**

I sam sam iznenađen kada vidim koliko toga smo napravili i objavili u proteklih pedeset tri godine. To je zasluga mojih suautora s kojima sam, dok smo bili mlađi, brzo i često s lakoćom ostvarivali naše zamisli, jer mislim da probleme u fizici treba rješavati, a ne odlagati za budućnost. Uz znanstveni rad čitavo vrijeme sam, od 1966. do mirovine 2012. držao nastavu iz dvadesetak različitih kolegija (neke sam i sam uveo), seminara, vježbi i praktikuma, u prosjeku šest sati tjedno, što mi je zajedno s pripremom, konzultacijama i administracijom uzimalo dva dana tjedno. Unatoč utrošku vremena, nastava mi je koristila, posebno ona iz općih fizika, jer sam zbog tih predavanja bio u tijeku s cjelokupnom fizikom (od astronomije do elementarnih čestica) i njezinim suvremenim primjenama. Nadalje, ponekad sam znanje iz opće fizike mogao izravno upotrijebiti u istraživanju, kao u slučaju utjecaja magnetske permeabilnosti željeza na pulsne I-V karakteristike željezom obloženih žica supravodiča  $MgB_2$ . Iskustvo iz nastave mi je pomoglo i kod znanstvenih i popularnih predavanja i seminara. Stoga mi i danas, nakon deset godina pauze, nedostaju predavanja. S nastavom su povezane i dvije knjige kojima sam suautor: *Zbirka riješenih zadataka iz fizike* (s R. Krsnikom i M. Očkom, šest izdanja) i *Numeričko modeliranje složenih gibanja* (s A. Karmelić), obje u izdanju Školske knjige. U njima sam pokušao provesti stav da fizika nudi ne samo razumijevanje stvarnih pojava (od duge do raketa) već i njihov kvantitativni opis. Stoga zadaci čisto numeričkog tipa ili oni u kojima se fizika tretira kao primjena matematike, nisu osobito korisni. To sam u potpunosti proveo u *Numeričkom modeliranju složenih gibanja*, no ta zbirka je štampana 1988., dvije godine nakon što smo je napisali, tako da su korišteni računalni programi već bili zastarjeli (no svi zadaci imaju i analitičko rješenje). Radom na toj zbirci uvidio sam moć numeričkog modeliranja u znanosti i nastavi.

**Za svoj rad dobili ste mnoga priznanja: dobitnik ste nagrade za znanstvenoistraživački rad “Ruder Bošković”, nekoliko priznanja za znanstvena istraživanja, stalni ste ocjenjivač međunarodnih časopisa i član nekoliko znanstvenih odbora.**

Godine 1974. sam zajedno s B. Leontićem dobio nagradu “Ruder Bošković” za otkriće lokaliziranih spinskih fluktuacija (Kondo efekta) u prezasićenim slitinama aluminijskog manganom i kromom. Dobio sam i dvije nagrade na konferencijama i meni posebno drago priznanje (skulpturu “Brdo”) studenata za najboljeg predavača FO PMF-a. Kako sam se bolje snalazio u laboratoriju, sa suradnicima i studentima nego s odličnicima, te su mi nagrade, iako drage, manje značile nego radost otkrića novog znanja ili boljeg načina predavanja studentima. Čijenim priznanje koje su mi ukazali učenici/suradnici s IF-a i FO PMF-a organizacijom jednodnevnog znanstvenog skupa na IF-u povodom mojeg 70-tog rođendana. Posebno sam ponosan na neke nenagrađene doprinose: sa suradnicima sam doprinio da Zagreb dobije tekući helij već 1967. prvi u ovom dijelu Europe, s E. Girtom prvi napravio veliki uzorak metastabilnih slitina u svijetu 1969. i, zajedno s timom UKF 1B projekta, prve visokokvalitetne supravodljive žice u Hrvatskoj, te u dva navrata pomogao da se Zagreb nađe u vrhu istraživanja iz fizike metala. Dobio

sam i osam stipendija za istraživanja i/ ili predavanja i posjete, dvije od CNR (Italija), tri od CNRS (Francuska), po jednu za Imperial College (Ujedinjeno Kraljevstvo), CSIRO (Australija) i KFKI (Mađarska), kao i četiri plaćena kraća boravka u EPFL (Švicarska), Wollongongu (Australija, dva puta) i Berkeley Springs (SAD). Bio sam član uredništva FIZIKE A od njenog osnutka do kraja izlaženja, a sada sam u časopisu *Materials*. U par navrata sam bio gostujući urednik međunarodnih znanstvenih časopisa među kojima je i naš časopis CCA, a bio sam i član odbora više međunarodnih znanstvenih konferencija. Recenzije su posebno važan dio u sustavu znanosti i stoga se unatoč podmakle dobi trudim da ih odgovorno obavim. Recenzirao sam znanstvene projekte i školske udžbenike za MZOS. Bio sam također član Područnog vijeća prirodnih znanosti, u dva navrata član Matičnog odbora iz polja fizike, član Upravnog odbora IF-a i pročelnik FO PMF-a.

**Hvala Vam na razgovoru za naš list. Molim Vas i da uputite poruku učenicima srednjih škola koji bi se više željeli posvetiti fizici.**

A. Kundt je pred više od 150 godina rekao: *Problem s fizikom je u tome što je teška*. Doista, znanstveno istraživanje je zahtjevno, pa ostavlja malo vremena za druge aktivnosti, no istovremeno bavljenje fizikom i općenito znanostima ima niz prednosti. Jedna od njih je da nitko nema monopol na značajne ideje, tako da do važnih otkrića mogu doći i učenici i studenti, pa i stariji. Nadalje, istraživanje u fizici stalno vode do novih otkrića tako da nema bojazni da nećete imati priliku da otkrijete nešto novo i važno. Znanstveni rad je često izvor velikog osobnog užitka, sličnog onome kada riješite neki teški zadatak iz matematike ili fizike, samo još intenzivnijeg. Jako je važno što znanost doprinosi razvoju društva i poboljšanju kvalitete života. Doista, znanost je u proteklih pedesetak godina više preobrazila način života i ukupnu civilizaciju nego što su to učinile sve ostale društvene institucije u proteklom mileniju. Iako naporan, život fizičara je zanimljiv i zbog toga što su većina njih izvrsne osobe s kojima je užitak družiti se i surađivati. Također, kada nema pandemije rad u znanosti omogućuje putem suradnji i konferencija upoznavanje drugih zemalja, ljudi, običaja i kultura.

Na kraju, moj savjet onima koji se odluče za znanost kao profesiju: pažljivo birajte mentore i suradnike, a odvažno birajte teme istraživanja. To je lijepo izrekao Harry Suhl: *Granice mogućeg možete postići samo ako ponekad posegnete iza njih*. Nadalje, uočite da su i pogreške i promašaji sastavni dio u razvoju znanosti (samo nemojte da vam to postane navika), te da je upornost uvijek nagrađena.

## Literatura

- [1] EMIL BABIĆ, *Akademik Mladen Paić i razvoj fizike čvrstog stanja u Hrvatskoj*, 100. *Obljetnica rođenja M. Paića*, HAZU, 2008.
- [2] FIZIKA Vol. 2 – Suppl. 2, *Proceedings of the First International Conference on Metastable Metallic Alloys*, Brela, 1970.
- [3] ANA SMONTARA, *John R. Cooper, poznati fizičar i profesor emeritus Sveučilišta u Cambridgeu*, *Matematičko-fizički list*, LXXII (2021.–2022.), 88–94.
- [4] EMIL BABIĆ, *Staklasti metali – materijali budućnosti?*, *Matematičko-fizički list*, 123 (1980), 4, 137–141.
- [5] EMIL BABIĆ i dr., *High-Temperature Spin-Fluctuation Resistivity in AlMn*, *Phys. Rev. Lett.* 27 (1971), 805.
- [6] EMIL BABIĆ i dr., *Transition from High-Entropy to Conventional Alloys: Which Are Better?*, *Materials*, 14 (2021), 58.