



## Mladen Horvatić, svjetski poznati stručnjak za NMR u čvrstom stanju

Ana Smontara



Mladen Horvatić

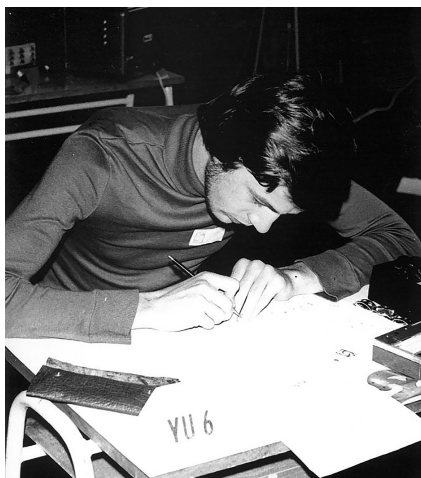
Mladen Horvatić rođen je 1. veljače 1959. u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu (gimnazija "Dr. Ivan Ribar") pohađao je u Karlovcu. Diplomirao je fiziku 1982. na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu (PMF) Sveučilišta u Zagrebu. Završio je poslijediplomski studij iz područja fizike (smjer Fizika čvrstog stanja) na PMF-u Sveučilišta u Zagrebu i magistrirao 1987. U periodu od 1987. do 1990. specijalizirao je tehniku nuklearne magnetske rezonancije (NMR) čvrstog stanja u Laboratoire de Spectrométrie Physique de l'Université Joseph-Fourier Grenoble (Grenoble, Francuska) u grupi za NMR čvrstog stanja pod vodstvom dr. Claudea Berthiera. Tamo je proučavao nove (bakreno-oksidne) visokotemperaturne supravodiče, te doktorirao na PMF-u Sveučilišta u Zagrebu 1991. s temom *Nuclear magnetic resonance study of the high-temperature superconductor  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$* .

Nakon diplome bio je asistent potom znanstveni suradnik na Institutu za fiziku Sveučilišta u Zagrebu, a od 1992. radi u Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses, bivši Grenoble High Magnetic Field Laboratory, CNRS, Grenoble, Francuska, gdje je voditelj NMR grupe. Ostvario je plodonosnu međunarodnu suradnju. Suraduje s brojnim istraživačkim grupama diljem svijeta, posebno pokrivajući teoriju (prof. F. Mila, EPFL, Lausanne, prof. T. Giamarchi, Sveučilište u Ženevi, dr. N. Laflorencie, LPT, Toulouse), NMR (prof. M. Takigawa, ISSP, Tokio, prof. V. Mitrović, Sveučilište Brown, Providence, dr. R. Stern, NICPB, Tallinn, dr. M. Klanjšek, IJS, Ljubljana, prof. M. Požek i prof. M. Grbić, Sveučilište u Zagrebu) kao i sintezu uzoraka (prof. O. Piovesana, Sveučilište u Perugi, prof. A. Paduan-Filho, Sveučilište u São Paulu, prof. H. Tanaka, Tehnološki institut u Tokiju, prof. A. Zheludev, ETH, Zürich). Održao je brojna predavanja na znanstvenim skupovima najviše razine. Bio je mentor/komentor mnogim post-doktorandima. Objavio je više od 160 znanstvenih radova u međunarodno priznatim časopisima. Osim toga, vrlo je aktivan u akademskoj sredini. Osobito vrijedi istaknuti sudjelovanje u organizaciji prve međunarodne radionice *Recent advances in broad-band solid-state NMR of correlated electronic systems* održane u Hrvatskoj (Trogir, 2010.) ili u organizaciji 11. međunarodne konferencije *Research in High Magnetic Fields RHMf 2015.*, Grenoble, Francuska.

Mladen Horvatić, osim u svojim znanstvenim radovima, ostavio je dubok trag u obrazovanju učenika: održavanjem radionica za nadarene učenike posebice pripremajući ih za natjecanja najviše razine (međunarodne olimpijade iz fizike (slika 1)). Ujedno je bio i vjerni rješavač zadataka iz MFL-a tijekom srednjoškolskog obrazovanja. Sve je to povod da smo ga zamolili za razgovor za naš list, na što se rado odazvao.

**Opišite Vaša sjećanja iz vremena osnovne škole i gimnazije. Kada ste se odlučili za studij fizike? Kao učenik gimnazije rješavali ste zadatke iz MFL-a. Išli ste na natjecanja iz matematike i fizike u gimnaziji. Je li Vam to pomoglo u usmjerenju na fiziku?**

Koliko se sjećam, fizikom sam se počeo baviti vrlo rano, čim je u 7. i 8. razredu osnovne škole fizika postala posebni školski predmet. Budući da sam bio dobar u matematici, već tada mi je moj četiri godine stariji brat Berislav (koji je poslije postao teorijski fizičar) pokazao kako se u fizici postavljaju i rješavaju jednadžbe. To sam jako dobro prihvatio, tako da sam fizikalne probleme rješavao lako i već u osmom razredu sudjelovao na republičkom natjecanju iz fizike. U gimnaziji sam nastavio s natjecanjima iz fizike, pa sam bio uspješan i na republičkom i na saveznom nivou, a kao maturant sam dospio do međunarodne olimpijade iz fizike, 1977. u Čehoslovačkoj (slika 1). Tu treba napomenuti posebno povoljne okolnosti: u Prvoj gimnaziji u Karlovcu sam iz matematike, fizike i kemije, imao zaista *iznimno* dobre profesore, koji su svaki na svoj način doprinijeli mojoj ljubavi za prirodne znanosti: Branko Šantić je bio savršeno organiziran, jasan i efikasan profesor matematike, fizika Dubravka Heinricha (zvanog Hans) je bila kreativna i pomalo otkačena, a kemiju je Pernar Josipa (zvana Pina) predavala vrhunskom klasičnom kvalitetom. Osim toga, moj stariji brat je tada studirao fiziku, pa mi je nabavljao dobre zadatke da bih trenirao za natjecanja. Tu je bio i MFL, gdje sam najviše rješavao zadatke iz matematike, što je neophodna baza mnogo čemu, a naročito fizici. Sve u svemu, u takvom okviru je izbor studija fizike bio potpuno neupitan.



*Slika 1. Rješavanje eksperimentalnog zadatka na 10. Međunarodnoj fizikalnoj olimpijadi, Hradec Králové, ČSSR, 1977.*

**Brzo ste završili studij. Tko Vas je usmjerio na fiziku kondenzirane materije? Kako je tekao Vaš poslijediplomski studij?**

Budući da mi je gimnazija dala visok nivo iz fizike i matematike, a natjecanja su to dodatno izbrusila, prijemni ispit na fizici je bio formalnost, a studij je išao normalno, bez poteškoća, iako je fizika tada bila poznata kao najteži studij Sveučilišta u Zagrebu. Budući da su prethodne generacije studenata studij fizike jako zavlačile, s mojom generacijom je pokrenut sustav studiranja *godinu za godinom* koji je studente prisiljavao da ispite polažu redovito. To je svima ubrzalo studij, a meni uopće nije bilo teško. U to doba su se prve dvije godine studija odvijale u staroj zgradi PMF-a, na Marulićevom trgu, dok su predavanja tokom zadnje dvije godine održavana većinom u tadašnjem Institutu za fiziku Sveučilišta u Zagrebu, koji je posvećen istraživanjima fizike čvrstog stanja. Studenti su bili u neposrednom dodiru s tom granom fizike i s međunarodno priznatim znanstvenicima. Fiziku čvrstog stanja mi je predavao prof. Slaven Barišić, veliki gospodin i stručnjak iznimnih znanstvenih i drugih kvaliteta, a i moj brat je već bio zaposlen na Institutu kao teorijski fizičar. Izbor područja fizike se tako nametnuo sam po sebi. Jedino sam, za razliku od brata teoretičara, izabrao eksperimentalnu fiziku, u skladu sa svojim praktičnim sposobnostima.

**Vaša znanstvena karijera započela je na Institutu za fiziku u grupi profesora Zvonimira Ogorelca, pod čijem ste voditeljstvom diplomirali i izradili magistarski rad u području fizike čvrstog stanja partikularno u području superionskih vodiča. Zašto ste odabrali baš to područje?**

Moram priznati da je moj prvi izbor uže specijalnosti bio vođen poznavanjem i najbližom ponudom, bez nekog objektivnog kritičkog ispitivanja daljnjih perspektiva. Tematika superionskih vodiča je zaista zanimljiva, a grupa znanstvenika koja se na Institutu time bavila je bila mlada i dinamična, i pružala je motivirajuću i vrlo ugodnu znanstvenu atmosferu. Mentorstvo profesora Ogorelca je bilo formalno, što je značilo odsustvo savjeta i punu slobodu istraživanja, pri čemu je on bio vrlo tolerantan i nije postavljao nikakve uvjete. Nažalost, za našu grupu mladih znanstvenika je to također značilo da nam je nedostajalo znanstvenog iskustva i da smo bili dosta izolirani, bez međunarodne suradnje i bez komunikacije s teoretičarima. A to se onda negativno odražavalo na produkciju znanstvenih radova. Retrospektivno gledano, možda sam u početku znanstvene karijere trebao malo pažljivije birati. Na sreću, imao sam kvalitetne rezultate i uspješno sam magistrirao.

**Nakon magisterija mijenjate područje svojeg istraživanja i u grupi dr. Claudea Berthiera “NMR u čvrstom stanju” počinjete se baviti istraživanjem novootkrivenih visokotemperaturnih supravodiča tehnikom nuklearne magnetske rezonancije (NMR).**

U to se doba prof. Barišić jako zalagao za uvođenje NMR-a u zagrebačku fiziku, jer je to vrlo moćna mikroskopska eksperimentalna tehnika. Kako me poznavao s dodiplomskog i poslijediplomskog studija, ponudio mi je da za doktorat naučim tu tehniku kod njegovog francuskog kolege iz Grenoblea, dr. Claudea Berthiera, koji je bio jedan od svjetski najboljih i najpoznatijih stručnjaka za NMR čvrstog stanja. Grenoble je jedan od najvećih centara za fiziku čvrstog stanja, a inače je poznat kao glavni grad francuskih Alpi, idealno smješten za planinarska uživanja. Naravno da sam takvu jedinstvenu priliku morao iskoristiti, bez obzira što se za to moralo dobro potruditi i ubrzati magistriranje.

Upravo u vrijeme mog odlaska u Grenoble su otkriveni visokotemperaturni supravodiči, pa je dr. Berthier orijentirao svoje i moje znanstvene napore u tu potpuno novu tematiku. Tehniku NMR-a sam uspješno savladao i jako zavolio, rezultati su bili zanimljivi, važni i konkurentni s brojnim drugim istraživačkim grupama iz cijeloga svijeta. Tokom te dvije godine specijalizacije nastalo je dovoljno materijala za više važnih znanstvenih članaka i za solidnu doktorsku disertaciju.

**Doktorirali ste na PMF-u Zagrebu 1991. i nakon postdokorskog usavršavanja dobivate stalnu poziciju u CNRS-u u Grenoblu.**

Tadašnji plan je bio da u Zagreb uvedem tehniku NMR-a. Tako da sam doktorat napisao i obranio u Zagrebu. Formuliran je tako da, osim prikaza važnih znanstvenih rezultata iz područja visokotemperaturnih vodiča, fizičarima dade i konciznu prezentaciju same tehnike NMR-a, što se tiče njenih mogućnosti i interpretacije rezultata mjerenja u fizici čvrstog stanja. Nažalost, planove je poništila financijska realnost: bilo je to doba domovinskog rata, i planirani budžet za nabavu NMR spektrometra i magneta je ukinut. Budući da u Zagrebu tada nisam mogao osnovati NMR laboratorij, moj francuski mentor, dr. Berthier, mi je ponudio mogućnost da se kandidiram za poziciju u francuskom državnom centru za znanstvena istraživanja CNRS-u, s namjerom da preuzmem realizaciju njegovog projekta razvoja NMR-a u vrlo jakim magnetskim poljima. To je značilo prilagoditi tehniku NMR mjerenja posebnim, 24-megavatnim magnetima laboratorija za jaka magnetska polja, *Laboratoire National de Champs Magnétiques Intenses* (LNCMI), u Grenoblu. Poziciju u CNRS-u sam uspio dobiti, pa

sam se u listopadu 1992. godine sa svojom porodicom preselio u Grenoble. Tu treba naglasiti da samo dva laboratorija u svijetu omogućuju NMR mjerenja u tako jakim poljima, i svi znanstvenici kojima su takva mjerenja zanimljiva dolaze ili u Tallahassee u Floridi ili u Grenoble u Francuskoj. Radi se o vrlo ekskluzivnoj poziciji i pravom znanstvenom izazovu.



Slika 2. Život uz nuklearnu magnetsku rezonanciju (NMR): tri stručnjaka za NMR na početku svoje “rezonantne” karijere sredinom 90-ih, i puno godina kasnije, 2018. g. Slijeva nadesno, Pietro Carretta (Sveučilište u Paviji), Marc-Henri Julien i M. H. (LNCMI-Grenoble).

### **Suradnju s hrvatskim znanstvenicima nastavljate u okviru međunarodnih projekata te doprinosite izobrazbi i usavršavanju novih naraštaja znanstvenika.**

Mojim odlaskom u Grenoble je projekt uvođenja tehnike NMR-a u zagrebačku fiziku odgođen, ali nije napušten. Puno godina poslije je napokon i ostvaren, zahvaljujući projektu prof. Miroslava Požeka s PMF-a, kojeg je financirala Europska zajednica. Moj doprinos tom projektu je bio u stručnoj izobrazbi Mihaela Grbića, tada mladog doktoranda, u definiciji detaljne tehničke konfiguracije nabavljenih instrumenata, kao i u organizaciji međunarodnog znanstvenog skupa kojim je novoosnovani zagrebački laboratorij predstavljen stručnim kolegama u cijelom svijetu. Dakako, time je uspostavljena i moja trajna suradnja s NMR-om u Zagrebu: radi se o zajedničkim znanstvenim projektima s prof. Grbićem, radnim posjetima, razmjeni znanja i ugodnih trenutaka.

### **Vašu karijeru obilježila je suradnja sa svjetski prepoznatljivim znanstvenoistraživačkim grupama u svijetu.**

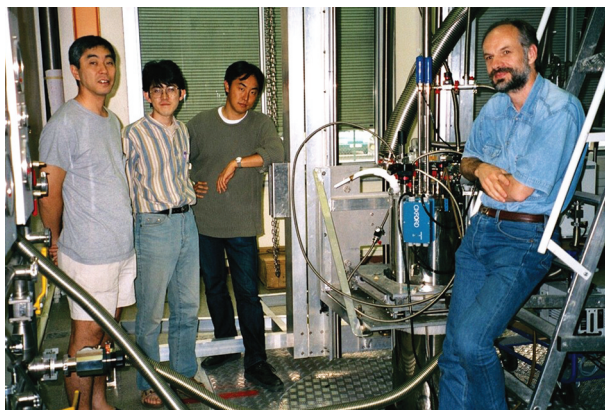
Budući da imam ekskluzivnu poziciju i zadatak da osiguravam NMR mjerenja u vrlo jakim magnetskim poljima svima koji to žele, to me dovodi u kontakt sa znanstvenim grupama iz cijeloga svijeta, što se često razvija u višegodišnje suradnje. Osim toga,

mnogi mladi znanstvenici koji su svoje postdoktorsko usavršavanje napravili u našoj NMR grupi su poslije osnovali svoje laboratorije, ali ostaju vezani s matičnom “NMR porodicom” u Grenobleu (slika 3). Radi se i o znanstvenim i tehničkim suradnjama, i o pravom prijateljstvu s osobama izvanrednih kvaliteta. S profesionalne strane tako sam upoznao različite znanstvene tematike i dobio koautorstvo u brojnim radovima. S privatne strane imao sam veliku radost upoznati i zajedno raditi s iznimnim ljudima.



Slika 3. Na “NMR planinarenju” u masivu Tailleferu u blizini Grenoblea skupilo se 15. 6. 2011. čak devetoro bivših i tadašnjih članova NMR grupe pod vodstvom Claudea Berthiera (u prvom planu na lijevoj slici). Na desnoj slici su: Mihael Grbić (PMF, Zagreb), Vesna Mitrović (Brown University, Providence) i M. H.

**U svojoj ste znanstvenoj karijeri objavili u koautorstvu velik broj znanstvenih radova. Možete li izdvojiti znanstvene doprinose koji su Vam posebno prirasli srcu, a koji su obilježili i Vašu znanstvenu karijeru?**



Slika 4. Svjetski prva NMR mjerenja koja su kombinirala vrlo niske temperature (0.035 kelvina) i vrlo jaka magnetska polja (28 tesla) su potvrdila postojanje “magnetskog kristala” koji se u posebnim uvjetima može formirati u jakom magnetskom polju. U pozadini desno se vidi “dilucijski” hladnjak kojim se postižu temperature ispod 1 K, dok se veliki 24-megavatni magnet ne vidi jer je u podrumu neposredno ispod hladnjaka. Prisutni eksperimentatori, Masashi Takigawa i Katsuaki Kodama (Sveučilište u Tokiju), Yo Tokunaga (sad u JAEA, Tokai) i M. H., u svibnju 2001. g., još nisu znali da će rezultati tog mjerenja biti objavljeni u prestižnom časopisu “Science” [K. Kodama et al., Science 298, 395 (2002)].

Naravno, od znanstvenih doprinosa su mi više prirasli srcu oni gdje sam se ponajviše sam potrudio za njihovo ostvarenje. Radi se o mojoj glavnoj znanstvenoj tematici kvantnog magnetizma, gdje jako magnetsko polje može inducirati posebna, *egzotična* stanja materije. Jedan primjer je Bose-Einsteinov kondenzat koji je magnetski ekvivalent električnom supravodljivom stanju. Drugi primjer su platoi u krivulji magnetizacije u ovisnosti o magnetskom polju, koji u posebnim slučajevima mogu odgovarati uređenju lokalne raspodjele magnetizacije u *magnetski kristal* (tzv. Wignerovom kristalizacijom). Teorijski je prvi put predloženo da se upravo to događa u spoju  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ , a naša NMR mjerenja su dala prvi i jedini dokaz te pretpostavke, kao i detaljnu informaciju o strukturi tog magnetskog kristala (vidi slike 4 i 5).



Slika 5. NMR spektar kojim je potvrđeno postojanje “magnetskog kristala” ovdje je okrenut naopako i ukrašen da bi postao novogodišnjom čestitkom laboratorija.

Ovdje bih rado povukao paralelu s primjenom NMR-a u medicini, gdje slike magnetskom rezonancijom daju dojmljivo preciznu informaciju o unutrašnjosti našeg tijela. U fizici, NMR spektar nekog spoja direktno odražava mikroskopsku raspodjelu magnetizacije ili električnog naboja, i takvi su rezultati najupečatljiviji. Puno sam proučavao magnetske (spinske) lance, dakle kvazijednodimenzionalne sustave, i tako pokazao da se iz NMR spektra takvog sustava može izravno rekonstruirati prostorna ovisnost vala magnetizacije (atom po atom). Iz NMR spektra se također može očitati kakav je profil magnetizacije (atom po atom) koji nastaje oko svake primjese. NMR također daje informaciju o fluktuacijama magnetizacije (spinskoj dinamici). Tu je interpretacija rezultata složenija i suradnja s teoretičarima obavezna. Mi smo tako dali prvi kompletan opis niskoenergetske dinamike kvazijednodimenzionalnih sustava na osnovi teorijskog opisa tzv. Tomonaga-Luttingerove tekućine (TLL). Ima tu i puno drugih atraktivnih rezultata, svaki je zanimljiv na svoj način.

**Do odlaska u inozemstvo, osim u svojim znanstvenim radovima ostavili ste dubok trag u obrazovanju učenika, svojim radom u povjerenstvima za natjecanja iz fizike, od općinskih do međunarodnih (olimpijade iz fizike), predavanjima te pripremama učenika za natjecanja. Molim Vas opišite i te Vama zanimljive događaje iz tog perioda, npr. vodenje učenika na Savezno natjecanje iz fizike, pripremu eksperimentalnog zadatka za 16. međunarodnu olimpijadu iz fizike itd.**

Budući da mi je sudjelovanje u školskim natjecanjima iz fizike puno toga donijelo, bilo je sasvim logično da ponešto od toga kasnije i *vratim*. U vrijeme kad sam se natjecao nisu još postojale nikakve organizirane pripreme za natjecanja. Kada su pripreme prvi put uvedene, koristio sam svoja brojna natjecateljska iskustva da kroz par sati predavanja dadem organizirane upute kako *optimizirati* rješavanje zadataka. Na primjer, kako

dimenzionalnom analizom i provjerom graničnih slučajeva provjeravati ispravnost rezultata i tako izbjeći pogreške. Kako kontrolirati stres, kako izbjeći gubljenje vremena kad nas jedan zadatak blokira. Da bude jasno, nalaženje rješenja je uvijek djelo autora, a savjeti samo pomažu da se taj proces ne zaglavi.

Što se tiče zadatka za 16. međunarodnu olimpijadu iz fizike u Portorožu (2, 3), ideja je bila da se smisli nešto što nije lagano, a ima priču koja izgleda i realno i zabavno. Bio sam zadovoljan da sam smislio upravo nešto takvo, ali se pokazalo da su natjecatelji bili bolji od mene i našli rješenje koje je jednostavnije nego što sam bio predvidio.

**Hvala Vam na razgovoru. Molim Vas da na kraju uputite poruku učenicima, a napose onima kojima će fizika biti i životni poziv.**

Ideja je ovog razgovora da se na primjeru koji poznajem najbolje, mojem vlastitom, pokaže kako fizika može dati okvir za uspješnu i zanimljivu karijeru. Tu treba primijetiti da je životnim tokom teško upravljati, i da često biramo ono prvo i najbliže što nam se ponudi, a možda i nije najbolji izbor.

To je sasvim u redu i doprinosi raznolikosti života, pri čemu je bitno da se u svakoj situaciji potrudimo da iz nje dobijemo maksimum. I još je bitnije da onda kada nam se ukaže posebno dobra prilika znamo tu mogućnost prepoznati, i da prihvatimo izazove realizacije tog projekta.

Također bih primijetio da se u mom slučaju radi o znanstveno-istraživačkoj karijeri, no nakon studija fizike možemo postati i profesor u školi, inženjer u industriji (istraživanje i razvoj), raditi u banci ili se baviti politikom. Sjetimo se da je Angela Merkel fizičarka koja je započela karijeru kao znanstvenica, da bi je završila kao njemačka kancelarka, i to tokom čak četiri mandata, od 2005. do 2021. g. Radi se o tome da je bit fizike u prepoznavanju što je u nekoj pojavi bitno, a što nebitno za njeno razumijevanje i opisivanje (modeliranje). Fizičari stoga većinom imaju posebno razuman i kritičan pogled na svijet, što je dobro za bilo koju karijeru, a i za privatni život. Bitna osobina fizičara je i kreativnost, pa je poseban užitek prepoznati sve te vrline u jednoj osobi. Sve se to razvija studijem fizike, pa ako vam je fizika interesantna, a matematika nije problem, postanite fizičari!



*Slika 6. M. H. drži pozvano predavanje na drugom međunarodnom skupu "Recent advances in broad-band solid-state NMR of correlated electronic systems", u Trogiru, 4. – 9. 9. 2011.*

## Literatura

- [1] ANA SMONTARA, *Kratka povijest međunarodnih olimpijada iz fizike*, Matematičko-fizički list za učenike srednjih škola, Izvanredni broj (C), (1984), 2–4.
- [2] ANA SMONTARA, *XVI. Međunarodna olimpijada iz fizike (1)*, Matematičko-fizički list za učenike srednjih škola, XXXVI, 1 (144) (1985/1986) 1–7.
- [3] ANA SMONTARA, *XVI. Međunarodna olimpijada iz fizike (2)*, Matematičko-fizički list za učenike srednjih škola, XXXVI, 3 (146) (1985/1986) 80–85.