

dr.sc. Dalibor Paar
Prirodoslovno matematički fakultet
Bijenička cesta 32
10 000 Zagreb

Nacionalna zaklada za znanost, visoko školstvo i
tehnologijski razvoj Republike Hrvatske
Trg J. J. Strossmayera 4, 10 000 Zagreb

Zagreb, 25. veljače 2009

Izvešće o završenom projektu: "Istraživanja visokotemperaturnih supravodiča nuklearnom magnetskom rezonancijom"

Izvešće o postignutim ciljevima boravka i istraživanja i planovi za
buduću suradnju

Pozdoktorski projekt „Istraživanje visokotemperaturnih supravodiča s nuklearnom magnetskom rezonancijom“ bio je financiran je od Državne zaklade za znanost, visoko školstvo i tehnologijski razvoj Republike Hrvatske i Deutsche Forschungsgemeinschaft. D.Paar je uspostavio suradnju s grupom dr. H.-J.Grafea i boravio u Laboratoriju za NMR studije u fizici čvrstog stanja u Leibnitz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW) Dresden, Njemačka od 1.10.2007. do 30.9.2008 (od čega 9 mjeseci u okviru ovog projekta) . Tijekom svog boravka u IFW Dresden, koristeći svoje prethodno iskustvo o visokofrekventnim tehnikama upoznao se s primjenom NMR metode u fizici čvrstog stanja i sudjelovao u NMR studijama različitih visokotemperaturnih supravodiča. .

Nuklearna magnetska rezonancija (NMR) i nuklearna kvadrupolna rezonancija (NQR) su jedne od vodećih metoda za proučavanje strukture i dinamičkih svojstava materijala. NMR tehnika omogućuje ne samo uvid u lokalnu elektronsku i magnetsku strukturu ovih spojeva, već daje i informaciju o elektronskoj spinskoj dinamici i magnetizaciji. Stoga se mogu promatrati jezgre koje su vezane na elektronski spinski sistem na različite načine. Ovim istraživanjima moguće je opaziti lokalne nehomogenosti u spinu i gustoći naboja, a dosadašnje studije ukazuju da takve prostorno nehomogene distribucije naboja imaju važnu ulogu u mehanizmu visokotemperaturnih supravodiča.

NMR uređaji koji postoje u Hrvatskoj omogućuju analizu kemijskih spojeva u tekućem stanju, a do sada nije postojao NMR uređaj za analizu materijala u čvrstom stanju. U aktualnim istraživanjima svojstava visokotemperaturnih supravodiča koja se odvijaju na Fizičkom odsjeku PMF-a u Zagrebu, pored

eksperimentalnih metoda koje su nam na raspolaganju imamo veliku potrebu za NMR i NQR mjerenjima, te je to bio motiv za upoznavanje s tom metodom.

Tema istraživanja samog projekta bila su NMR i NQR mjerenja različitih supravodiča, s posebnim naglaskom na rutenokupratima, te na monokristalima YBCO. NMR mjerenjima na novoj generaciji visokokvalitetnih monokristala YBCO priređenih u MPI Stuttgart s točno definiranom orijentacijom a, b i c – osi nastojimo doći do novih spoznaja o prirodi supravodljivog stanja. Mjerenjima NMR vremena relaksacije spin-rešetka T_1 proučavaju se kvazičestična pobuđenja i jezgre virova u miješanom stanju supravodiča. Mjerenjima spin-spin relaksacije T_2 proučava se dinamika i vibracije virova. NQR mjerenja daju informacije o nehomogenostima i fluktuacijama naboja u CuO_2 ravninama.

Od posebnog interesa istraživanja tijekom boravka u Dresdenu bila je nova grupa supravodiča otkrivenih 2008. godine, baziranih na metaličnim Fe-As ravninama. Novi supravodiči izazvali su veliki interes u svjetskoj znanstvenoj zajednici, a među prvima su sintetizirani na IFW Dresden. Kod njih je posebno zanimljivo što je magnetski ion Fe^{2+} direktno odgovoran za formiranje supravodljivog kondenzata (najviše temperature supravodljivog prijelaza za sada su 55K, to su najviše kritične temperature izvan kuprata). NMR tehnika se pokazala značajna za proučavanje normalnih i supravodljivih svojstava jako koreliranih elektronskih sustava. NMR studijama jezgre ^{75}As u spoju $\text{LaO}_{0.9}\text{F}_{0.1}\text{FeAs}$ pronašli smo jaku temperaturnu ovisnost spin-rešetka relaksacijskog vremena, te Korringa-oblik ovisnosti. U supravodljivom stanju rezultati mjerenja ukazuju na spin-singlet sparivanje, a jaka anizotropija u spin-rešetka vremenu relaksacije moguća je posljedica doprinosa supravodljivih virova (H.-J.Grafe, D.Paar, et al., objavili smo u okviru ovog projekta u *Physical Review Letters*. **101** (2008) , 4; 047003-1-047003-4). Izvedena su i istraživanja u suradnji s grupom prof. Požeka na Fizičkom odsjeku PMF-a u Zagrebu, pri čemu je napravljena je analiza gornjeg kritičnog polja, dubine prodiranja i frekvencije otpuštanja novih supravodiča i to smo objavili u radu u *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. **78** (2008) , 1; 012507-1-012507-4. U okviru ovog projekta ukupno su objavljena 2 rada u CC časopisima i dva kongresna priopćenja, a jedan CC rad je u postupku objavljivanja. Na temelju uspostavljene suradnje i objavljenih radova, ovaj projekt možemo smatrati uspješno završenim.

Tijekom ovog projekta, u na Fizičkom odsjeku PMF-a u Zagrebu dobili smo financijska sredstva za FP7 europski projekt SOLeNeMaR (početak u ožujku 2009. godine, trajanje projekta 3 godine), kojim će se uspostaviti laboratorij za NMR čvrstog stanja, te će se iskustva stečena jednogodišnjim boravkom u IFW Dresden, uz daljnju suradnju s kolegama u IFW Dresden, upotrijebiti u realizaciju tog projekta.

Popis radova objavljenih u okviru ovog projekta (izvod iz Hrvatske znanstvene bibliografije):

1. Grafe, H.-J.; Paar, Dalibor; Lang, G.; Curro, N. J.; Behr, G.; Werner, J.; Hamann-Borrero, J.; Hess, C.; Leps, N.; Klingeler, R.; Büchner, B.: ^{75}As NMR studies of superconducting $\text{LaFeAsO}_{0.9}\text{F}_{0.1}$. // *Physical Review Letters*. 101 (2008) , 4; 047003-1-047003-4 (članak, znanstveni).
2. Narduzzo, A.; Grbić, Mihael Srđan; Požek, Miroslav; Dulčić, Antonije; Paar, Dalibor; Kondrat, A.; Hess, C.; Hellmann, I.; Klingeler, R.; Werner, J.; Köhler, A.; Behr, G.; Büchner, B.: Upper critical field, penetration depth, and depinning frequency of the high-temperature superconductor $\text{LaFeAsO}_{0.9}\text{F}_{0.1}$ studied by microwave surface impedance. // *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*. 78 (2008) , 1; 012507-1-012507-4 (članak, znanstveni).
3. Grafe, Hans-Joachim; Hammerath, Franziska; Paar, Dalibor; Urbanik, G.; Kataev, V.; Wolf, Th.; Khaliullin, G.; Büchner, B.: Nuclear Magnetic Resonance evidence for correlations between antiferromagnetism and pseudogap effects in Zn- and Ni-doped $(\text{Eu}, \text{Nd})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+y}$ single crystals // 6th INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE STRIPES SERIES, Quantum Phenomena in Complex Matter / Bianconi, A (ur.). Erice-Sicily : SUPERSTRIPES-ONLUS and ETTORE MAJORANA FOUNDATION AND CENTRE FOR SCIENTIFIC CULTURE, 2008. 19-19 (predavanje,međunarodna recenzija,sažetak,znanstveni).
4. Grafe, Hans-Joachim; Paar, Dalibor; Lang, Guillaume; Wolter, Anja; Manthey, Katarina; Hammerath, Franziska; Curro, Nick J.; Büchner, Bernd.: ^{75}As Nuclear Magnetic Resonance studies of Superconducting $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ // 6th INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE STRIPES SERIES, Quantum Phenomena in Complex Matter / Bianconi, A (ur.). Erice-Sicily : SUPERSTRIPES-ONLUS and ETTORE MAJORANA FOUNDATION AND CENTRE FOR SCIENTIFIC CULTURE, 2008. 75-75 (predavanje,međunarodna recenzija,sažetak,znanstveni).