

ŽELJKO VUJOVIĆ

---

OD NUKLEARNOG SPINA DO MAGNETNOG  
REZONANTNOG SLIKANJA

**ŽELJKO VUJOVIĆ**  
**OD NUKLEARNOG SPINA DO MAGNETNOG**  
**REZONANTNOG SLIKANJA**

Recenzenti:  
Prof. dr Šerif Bešlić  
Akademik dr Zoran V. Popović

Izdavač:  
Akademska misao, Beograd

Za izdavača:  
Marko Vujadinović

Kompjuterska obrada  
*Dejan Vujović*

Tiraž  
300

ISBN 978-86-7466-794-7

Štampa  
Akademska misao, Beograd

U Beogradu, 2019.

ŽELJKO VUJOVIĆ

OD NUKLEARNOG SPINA DO  
MAGNETNOG REZONANTNOG  
SLIKANJA



*Kako da se poveća jačina magnetne indukcije glavnih magneta aparata za MRI, na vrijednosti veće od 7T?*



## PREDGOVOR

Ova knjiga se bavi, najviše, opisom fizičke pojave nuklearnog spina i njegovog ponašanja u spoljašnjem magnetnom polju. Kakvo je zbirno djelovanje mnoštva nuklearnih spinova u čovječjem tijelu, kada, na njih, djeluje spoljašnje magnetno polje? Zbog čega i kad je potrebno da se, čovječje tijelo, izloži djelovanju spoljašnjeg magnetnog polja? Kolika treba da bude jačina spoljašnjeg magnetnog polja? Da li, koliko i kada su, ta magnetna polja, štetna po zdravlje čovjeka?

Knjiga sadrži prikaz načina objašnjenja pojave, koji koristi SIEMENS, kao i ugledni američki radiolozi, korisnici sistema za magnetno rezonantno slikanje.

Trudio sam se da pratim duh vremena u ovoj oblasti, i stvorim tekst, koji će, aktuelnošću i sažetošću, da zainteresuju čitaoce, da knjigu pročitaju i zamisle se o sadržajima koje daje.

Mislim da je posebno značajno da ukažem na način mišljenja, koji su koristili istraživači nuklearnog spina. Oni koji su ga otkrili, kao i oni koji ga opisuju na savremen način.

Nadmetanje svejetskih lidera u proizvodnji uređaja za magnetno rezonantno slikanje, prvenstveno GE i SIEMENS, evaluacija njihovih najnovijih, nestandardnih uređaja s jačinom magnetne indukcije 7T, time i nagovještaj jačih, blago su osvjetljeni s uvjerenjem da će, oni, da buknu u vrijeme koje je pred nama. Izvjesno je da će, ti novi uređaji, da prave slike veće prostorne rezolucije i kontrasta, od postojećih, i omoguće da se bolje prikažu male strukture i hemijski sadržaj u tijelu čovjeka, posebno u mozgu.

Posebna inspiracija za pisanje bila mi je knjiga „Kako napisati i publikovati naučno delo“, Zorana V. Popovića. Za to, njemu, velika drugarska i prijateljska hvala.

*Autor*

## UVOD

Metoda magnetnog rezonantnog slikanja postala je nezamjenljiva u vrhunskoj medicinskoj neinvazivnoj dijagnostici. Od 1998. godine, koriste se, kao standard u svijetu, aparati čija je jačina magnetne indukcije glavnog polja 3T (Tesla). Siemens je uveo, u kliničku upotrebu, i aparat jačine indukcije glavnog magnetnog polja 7T. Predviđa se, i istražuje, da se naprave aparati, koji će da imaju jačinu magnetne indukcije glavnog polja veću od 7T.

U tom nezaustavivom razvoju, potisnuto je u drugi plan, kako je sve počelo? Šta je omogućilo da se stvore tako moćni aparati za medicinsku dijagnostiku, kakvi danas postoje?

Zbog toga se podsjećamo, da se, postulat nuklearnog spina, genijalnog naučnika Wolfganga Paulija, postupno i burno, pretvorio u teoriju i našao primjenu neprocjenjive vrijednosti. Taj burni razvoj teorije i prakse praćen je Nobelovim nagradama za postignute rezultate u oblasti fizike (1943, 1944. i 1952), hemije (1991. i 2002) i medicine (2003 – dvije nagrade). Ukupno, za doprinose zasnovane na otkriću nuklearnog spina, dodijeljeno je sedam Nobelovih nagrada.

Objašnjenje fizičke pojave, na kojoj se zasnivaju savremeni aparati za magnetno rezonantno slikanje, nije dovoljno poznato čak ni visokospecijalizovanim korisnicima ovih moćnih aparata. Šta je magnetna rezonancija, odnosno nuklearna magnetna rezonancija, kako se nazivala prvobitno? Kako da se opiše i objasni ta pojava? Kako, popularno opisano, izgledaju savremeni aparati za magnetno rezonantno slikanje? Na ta i mnoga druga pitanja, želio sam da odgovorim ovim radom.

Da bih postigao željene rezultate, koristio sam briljantnu literaturu Allena D. Elstera, sa Mallinckrodt Institute of Radiology, Washington University School of Medicine, vrhunsku literaturu o principima magnetne rezonancije SIEMENS GmbH, vodećeg proizvođača, u svijetu, aparata za magnetno rezonantno slikanje, popularno, ali vrlo zanimljivo i korisno opisivanje savremenih aparata, i druge relevantne izvore za opisivanje pojave nuklearne magnetne rezonancije, odnosno magnetne rezonancije, kako je, 1984. godine, usvojeno da se zove ta pojava.

Da ponovimo: sve je počelo otkrićem spina, fizičke veličine, koja nije bila poznata. Uslijedilo je otkriće magnetnog momenta protona, spina jezgra atoma i magnetne rezonancije u koju može da se dovede jezgro atoma. Kako se sve to dešava? Kako se opisuju veličine koje učestvuju u ovoj pojavi? Odgovorio sam na ta pitanja, ali i na druga, neophodna za razumijevanje ove složene pojave.

Podsjetio sam da je magnetni moment protona elementarni magnetizam u čovječjem tijelu. Makroskopska magnetizacija čovječjeg tijela je vektorski zbir čitavog ansambla magnetskih momenata protona. Longitudinalna je u odnosu na spoljašnje polje, koje je stvara.

Nuklearni spin opisuje magnetne osobine jezgra atoma. Precesuje oko spoljašnjeg magnetnog polja. Imaju ga jezgra s nejednakim brojem protona i neutrona. Izotopi s nuklearnim spinom se koriste u magnetnoj rezonanciji. Postojanje nuklearnog spina ne znači da jezgro atoma precesuje, nego da precesuje magnetni moment jezgra. Usvojeno je da je broj spinova, koji precesuju u smjeru spoljašnjeg polja, nešto veći od broja spinova, koji procesuju u smjeru suprotnom spoljašnjem polju. Taj višak spinova stvara makroskopsku longitudinalnu magnetizaciju.

Rezonancija je razmjena energije između dva sistema, na određenoj frekvenciji. U magnetnom rezonantnom slikanju, razmjenjuje se energija između pacijenta, koji je namagnetisan stalnim spoljašnjim poljem, i posebnog izvora radiofrekventnih (RF) talasa. RF talas ima frekvenciju koja je jednaka frekvenciji precesije longitudinalne magnetizacije (Larmorova frekvencija). Dodatno, RF impuls naginje longitudinalnu magnetizaciju oko svoje ose. Pod uticajem tog dodatnog magnetnog polja, stvorenog RF impulsom, nastaje tzv. „Rabijeva precesija“, koja je mnogo manja od precesije usled glavnog spoljašnjeg polja i normalna je na pravac glavnog spoljašnjeg polja.

Nagnuta magnetizacija ima dvije komponente: longitudinalnu  $M_z$ , u pravcu spoljašnjeg polja, i transverzalnu,  $M_{xy}$ , koja osciluje u  $xy$ -ravni, normalnoj na pravac polja. Dok postoji RF impuls, aktivna su dva polja: statičko i, za kratko vrijeme, oscilatorno RF polje. Ako promijenimo referentni koordinatni sistem i postavimo ga tako da njegova  $z$ -osa bude paralelna osi RF impulsa, spinovi će da se posmatraju kao da precesuju oko  $z$ -ose tog sistema.

Transverzalna magnetizacija  $M_{xy}$  osciluje pod uticajem spoljašnjeg polja. Ona, pod uticajem pobudnog RF impulsa, precesuje i indukuje MP signal u prijemnom namotaju. Indukovani MR signal se naziva FID – Free Induction Decay – raspad slobodne indukcije.

Prestankom pobude RF signalom nastaje proces raspada transverzalne magnetizacije i oporavak longitudinalne magnetizacije. Ovaj proces se naziva relaksacija. Longitudinalna magnetizacija se oporavlja eksponencijalno, s vremenskom konstantom  $T_1$ , a transverzalna magnetizacija se raspada, takođe eksponencijalno, s vremenskom konstantom  $T_2$ , koja je manja od  $T_1$ . Raspadom transverzalne magnetizacije pogoršava se MR signal (FID) s vremenskom konstantom  $T_2^*$ .

Dijagnostičak vrijednost MRI se povećava s gustinom protona i relaksacijom. Jače magnetno polje povećava vremensku konstantu  $T_1$  za svako tkivo. Time se utiče na povećanje kontrasta slike i razlikovanje različitih tkiva.

Knjiga je namijenjena prvenstveno fizičarima, inženjerima i ljekarima, kao podsjetnik i uvod za proučavanje, primjenu i razvoj mnoštva aspekata ove složene pojave i metode. Jedan od primjera uspješne primjene magnetnog rezonantnog slikanja u medicini su radovi, koje je objavio, Gradimir Dragutinović iz Kliničkog centra Srbije.

Radni materijal knjige su recenzirali Prof. Dr Šerif Bešlić, profesor radiologije, bivšei šef Klinike za radiologiju Kliničkog centra Univerziteta u Sarajevu (Podgoričanin) i Dr Zoran Popović, naučni savetnik Instituta za fiziku Univerziteta u Beogradu, akademik i podpredsednik SANU. Zahvalnost je mala riječ za pomoć koju su mi dali.

Pripremanje knjige, očekivano, nesebično je pomogla i dr Vesna Sarajlić, radiolog, subspecijalista vaskularne i interventne radiologije Kliničkog centra Univerziteta u Sarajevu.

Slike, korišćene u ovoj knjizi, preuzeo sam sa Interneta, pomoću referenci, koje sam naveo.

*Autor*

Podgorica, 22. mart 2019. godine

## ISTORIJA

1922 – Otto Stern i Wolfgang Gerlach su otkrili spin elektrona (rotaciju elektrona oko sopstvene ose), odnosno da elektroni, u orbitama atoma, imaju mehanički i magnetni moment (ponašaju se kao mali magneti)

1924 – Wolfgang Pauli je postulirao je postojanje nuklearnog spina (postojanje mehaničkog i magnetnog momenta jezgra).

1930 – Isidor Isak Rabi je proučavao sile koje povezuju protone u jezgru atoma.

1933 – Otto Stern je izmjerio magnetni moment protona (atomske jezgre vodonika).

1938 – Isidor Isak Rabi je izveo prve eksperimente s molekulskim snopovima (kondenzovanom materijom).

1943 – Otto Stern je dobio Nobelovu nagradu za fiziku „za doprinos razvoju metode molekularnog zraka i otkriće magnetnog momenta protona“). Nagrada mu je uručena sledeće, 1944. godine.

1944 – Isidor Isak Rabi je dobio Nobelovu nagradu za fiziku „za rezonantnu metodu snimanja magnetnih svojstava atomskih jezgara“.

1946 – Felix Bloch i Edward Mils Parcell su otkrili nuklearnu-magnetnu-spektroskopiju u kondenzovanoj materiji.

1949 – Otkriveno je da nuklearni magnetni momenti metala zavise od hemijskih osobina sredine u kojoj se nalaze. To je otkriveno, za soli metala i alkohole, 1951. godine.

1951 – Otkrivena fina struktura NMR linija.

1952 – Felix Bloch i Edward Mils Parcell su dobili Nobelovu nagradu za fiziku, za njihov „razvoj novih metoda

za nuklearna magnetna precizna mjerenja i otkrića u vezi s njom“.

1953 – Objavljeni su prvi rezultati sistematske primjene NMR u analizi strukture organskih jedinjenja. Kompanija „Varian“ je konstruisala prvi komercijalni NMR uređaj.

1966 – Počeo je da se primjenjuje, komercijalno, uređaj s impulsnom stimulacijom. Do tada su korišćeni, isključivo, sistemi s kontinualnom stimulacijom. Ispostavilo se da NMR frekvencije zavise od hemijske prirode uzorka. Zbog toga su, glavni razvoj metode, preuzeli fiziko-hemičari.

1984 – Američko udruženje radiologa je htjelo da otkloni asocijacije na nuklearne reakcije i atomske bombe, pominjanjem izraza NMR. Zbog toga je izostavilo pojam nuklearna, iz naziva. Od tade se, NMR, u medicini, naziva magnetna rezonancija.

1991 – Richard Ernst je dobio Nobelovu nagradu za hemiju, za „razvoj metodologije nuklearne magnetne rezonantne (NMR) spektroskopije visoke rezolucije“.

1998 – Razvijaju se aparati za MRI, s jačinom magnetne indukcije glavnog polja 3Tesla (3T), i uvode se kao standard u svijetu.

2000 – Počeo je da se koristi prvi aparat za magnetno rezonantno slikanje u Kliničko-bolničkom centru (KBC) u Podgorici.

2002 – Kurt Wütrich, biofizičar, je dobio Nobelovu nagradu za hemiju, zajedno sa G.B.Fenonom i K. Tanakom, za „doprinos razvoju i primjeni NMR u određivanju trodimenzijalne strukture bioloških makromolekula“.

2003 – Paul Laterbur i Peter Mansfield – dobili Nobelovu nagradu za medicinu „za otkrića vezana za vizuelni prikaz dijagnostike magnetnom rezonancijom“.

2019 – Đorđije Šćepanović – „Novi vijek u primjeni magnetne rezonancije: šta su donijeli aparati jačine 3T?“.

## I – NUKLEARNI SPIN I MAGNETNA REZONANCIJA

### 1 – OPŠTA DEFINICIJA SPINA

SPIN je fizička veličina kao što su masa i naelektrisanje. Ne proizilazi iz više osnovnih mehanizama. Imaju ga atomi i subatomske čestice (protoni, neutroni, cijelo jezgro i elektroni). Analogan je ugaonom momentu u klasičnoj fizici. Opisuje pojavu uzajamnog djelovanja magneta, koji rotira oko sopstvene ose, sa spoljašnjim poljem, kao i ugaonog momenta s gravitacionim poljem. Može da ima ograničen skup diskretnih vrijednosti. Svaka moguća diskretna vrijednost spina je kvantovana. Njegove vrijednosti su cijeli ili polucijeli brojevi. (0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2...) Protoni, neutroni i elektroni imaju spin, koji se označava slovom S i ima vrijednost 1/2. Na vrlo visokim temperaturama, tri spina kvaraka, od kojih je sastavljen proton, mogu da se spoje (grupišu), dajući protonu spin vrijednosti 3/2.

### 2 – OPŠTA DEFINICIJA NUKLEARNOG SPINA

Nuklearni spin ili spin jezgra, označava se slovom l. Može da ima vrijednost od  $l=0$  do  $l=8$ , s jedinicom priraštaja 1/2. Vektorska je veličina, slično vektoru u klasičnoj fizici i mehaničkom ugaonom momentu (L).