

AGILNI PRISTUP U NASTAVI FIZIKE: LABORATORIJA ZA MODERNE TEHNOLOGIJE

Tomas Nemeš, Selena Samardžić

¹Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

nemes.tomas@uns.ac.rs, selena@uns.ac.rs

Kratak sadržaj: Fizički principi su široko rasprostranjeni i značajno utiču na različite aspekte tehnološkog napretka. Čitava oblast medicinskih nauka je doživela revoluciju primenom osnovnih fizičkih principa, usavršavajući metodologiju i tehniku u kliničkoj praksi i istraživanju, utičući na poboljšanje dijagnostičkih i terapijskih metoda u tom procesu. U ovom radu biće predstavljen razvoj eksperimentalnih vežbi koje se baziraju na Doplerovom efektu i magnetnoj rezonanci. Aparatura je originalno napravljena od komercijalno dostupnih magnetnih i elektronskih komponenti i tehnologije 3D štampanja. Ove laboratorijske vežbe imaju za cilj da unaprede nastavu fizike pružanjem primera praktične primene. Sa druge strane, studentima omogućavaju razumevanje osnovnih principa nuklearne magnetne rezonance i ultrazvučne sonografije u medicinskoj dijagnostici. Takođe, u radu će biti reči i o nekim drugim primenama ovih fenomena.

Ključne reči: nastava fizike, laboratorijske vežbe, Doplerov efekat, magnetna rezonanca

AGILE PHYSICS EDUCATION: LABORATORY FOR MODERN TECHNOLOGY

Abstract: Physics principles influence various aspects of science and technology significantly. The entire field of medical science has undergone a revolution with the application of physics principles, methodologies, and techniques to clinical practice and research, improving human health and well-being in the process. This paper presents and discusses the development of an experimental setup for the Acoustic Doppler Effect and Magnetic Resonance, made with commercially available magnetic and electronic components and 3D printing technology. These exercises aim to improve physics teaching by providing examples of practical applications in physics education. Specifically, these experimental exercises were developed to explain the fundamental principles of nuclear magnetic resonance and ultrasound sonography, basic diagnostic methods in medicine, to biomedical engineering students in a familiar way. Some other applications of these phenomena will also be discussed.

Key Words: physics education, laboratory exercise, Doppler effect, magnetic resonance

1. UVOD

Nuklearna magnetna rezonanca (NMR) se primenjuje u mnogim fundamentalnim istraživačkim i medicinskim granama. NMR je fizički fenomen u kojem se određena atomska jezgra (sa neparnim brojem protona ili neutrona) postavljaju u jaka magnetna polja i mogu selektivno da apsorbiraju energiju elektromagnetnih talasa u radio-frekventnom opsegu. Nakon relaksacije jezgara koja su praćena lokalnom magnetnom varijacijom, indukuje se signal u prijemnoj anteni za digitalnu obradu i na taj način se može dobiti slika ili izvršiti spektrometrijska analiza. Studenti mogu lako da shvate principe nuklearne magnetne rezonance kroz klasične efekte jer je pobuda klasičnog oscilatora veoma slična pobudi kvantnog oscilatora.

Klasična magnetna rezonanca je pojava koja se javlja kada je magnetni moment oscilatora izložen kombinovanim jakim, konstantnim spoljašnjim i slabim naizmeničnim magnetnim poljima. Pošto magnetni moment makroskopskog uzorka zavisi od primenjenog spoljašnjeg magnetnog polja, mogu se takođe meriti i neka magnetna svojstva materijala oscilatora. U svakom slučaju i NMR i klasična MR su zasnovane na istom principu, principu rezonancije. U NMR, se posmatra rezonancija nuklearnog spina jezgra u magnetnom polju, dok u klasičnoj MR se posmatra, konkretno u ovom primeru, rezonancija magnetne igle kompasa u promenljivom magnetnom polju.

Drugi fizički fenomen koji je našao mnoge primene u nauci, tehnici i medicini je Doplerov efekat, pojava koja se primećuje kada dođe do promene frekvencije talasa u odnosu na posmatrača koji se kreće u odnosu na izvor talasa. Ovaj efekat se obično javlja kod zvučnih talasa, ali se može javiti i kod drugih vrsta talasa, kao što su svetlosni talasi. Merenje Doplerovog pomeraja omogućava merenje brzina čestica fluida i čini osnovni princip na kojem se zasniva Doplerska sonografija. Ostale primene u medicini su ultrazvučna dijagnostika, ehokardiografija, kao i brojne primene u eksperimentalnoj fizici (anihilaciona spektroskopija, spektrometrija i dr).

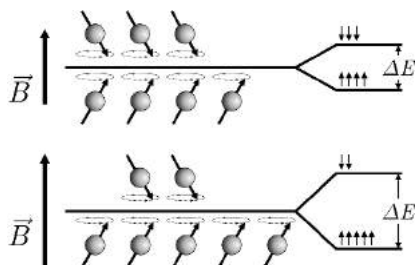
Ukratko, razumevanje MRI i Doplerovog efekta je dragoceno kako za studente inženjerskih struka, tako i fizike, medicinskih nauka, biologije i srodnih nauka. Ovi koncepti su temelj najsavremenijih tehnologija i igraju ključnu ulogu u unapređenju naučnih saznanja i poboljšanju prakse zdravstvene zaštite. Obe ove vežbe su osmišljene i razvijene na Katedri za fiziku, Fakulteta tehničkih nauka.

2. TEORIJSKA I EKSPERIMENTALNA POSTAVKA

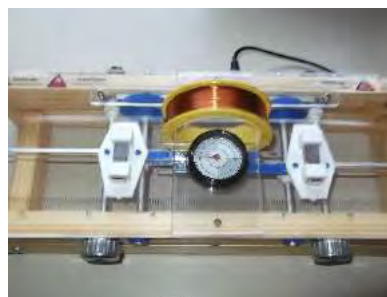
Magnetna rezonanca. U slučaju nuklearne magnetne rezonancije jezgra sa nenultnim spinom kada se nalaze u magnetnom polju apsorbiraju elektromagnetno zračenje određene frekvencije (rezonancija). U odsustvu spoljašnjeg magnetnog polja, magnetni momenti jezgara su nasumično orijentisani u prostoru. Međutim u homogenom magnetnom polju, magnetni momenat trpi moment sile, koji teži da magnetne momente pridružene jezgrima orijentiše u pravcu spoljašnjeg polja. U slučaju jezgra vodonika koji je 63% sadržan u ljudskom telu, magnetni moment jezgra je sopstveni magnetni moment protona, jer se jezgro sastoji od samo jednog protona. Protoni u spoljašnjem magnetnom polju mogu da se orijentišu paralelno ili antiparalelno u odnosu na pravac polja (Slika 1). U skladu sa principima kvantne mehanike ove se dve orijentacije nalaze na različitim energetske nivoima. Orijentacija suprotno od pravca spoljašnjeg magnetnog polja zahteva više energije i nalazi se na višem energetske nivou u odnosu na paralelnu orijentaciju. Razlika u energijama između ova dva stanja ΔE proporcionalna je jačini spoljašnjeg magnetnog polja.

$$\nu \sim B$$

Pokazalo se da apsorpcija fotona određene energije (u oblasti radio frekventnog (RF) zračenja $\approx$ MHz) može da izazove opisani prelaz. Apsorbovana energija elektromagnetnog talasa (radiofrekventni signal – RF) će služiti za pobuđivanje jezgara (protona) u stanja sa antiparalelnim spinovima, pri čemu će se elektromagnetno zračenje opet emitovati prilikom povratka jezgara u stanje sa nižom energijom (paralelni spinovi). Ovo zračenje se detektuje, a zatim analizira i obrađuje uz pomoć kompjutera i predstavlja u vidu slike (NMRI-Nuclear Magnetic Resonance Imaging). Upravo ova razmena energije između fotona i jezgara jeste nuklearna magnetna rezonanca.



Slika 1. Orijentacije jezgara u spoljašnjem magnetnom polju i odgovarajući energetske nivoi.



Slika 2. Aparatura za posmatranje klasične magnetne rezonance.

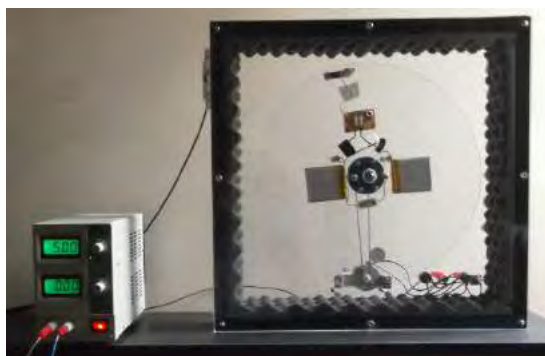
Sa druge strane, klasična magnetna rezonanca je sličan fenomen koji se može posmatrati pomoću jednostavne laboratorijske opreme [1, 2, 3]. U našoj varijanti [4], napravljena je aparatura kojom se lako može menjati magnetna indukcija podešavanjem rastojanja između permanentnih magneta. Prethodno je pomoću teslametra [5] kalibrisana skala: rastojanje-magneta indukcija. Frekvencija prinudnog polja se može menjati kontinualno pomoću ton generatora ili računara. U realizovanoj aparaturi (Slika 2) ulogu klasičnog oscilatora u kombinovanom magnetnom polju igra igla kompasa, magnetni dipol koji u prisustvu homogenog magnetnog polja $\vec{B}$ poseduje sopstvenu frekvenciju oscilovanja koja zavisi od primenjenog homogenog polja:

$$\nu_0 \sim \sqrt{B}$$

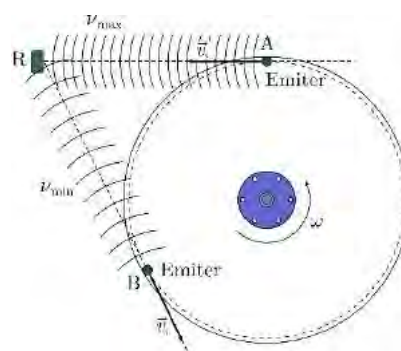
Ako se na konstantno polje $\vec{B}$ superponira prostoperiodično polje $\vec{B}_p$, frekvencije ν_p , koje je normalno na konstantno polje $\vec{B}$ i harmonijski osciluje, na magnetni dipol će delovati prinudni moment sile, što će rezultovati superpozicijom dva harmonijska oscilovanja. Kada se frekvencija prinudnog polja poklopi sa sopstvenom frekvencijom igle kompasa, igla će početi da osciluje sa vidljivim porastom amplitude, što predstavlja pojavu rezonancije [6]. Pored posmatranja pojave magnetne rezonancije u ovoj vežbi je moguće izračunati remanentnu magnetizaciju, inicijalnu susceptibilnost i Rejljevu konstantu za datu magnetnu iglu kompasa [7, 8].

Doplerov efekat. Monohromatski talasi nastaju od izvora koji osciluje određenom frekvencijom. Frekvencija koju registruje prijemnik u opštem slučaju različita je od sopstvene frekvencije izvora što zavisi od brzine izvora, brzine prijemnika i brzine medijuma kroz koji se talas prostire. Ovaj efekat poznat je kao Doplerov efekat [9, 10]. Ukoliko se meri pomak frekvencije, indirektno se pomoću odgovarajuće formule određuje brzina kretanja izvora ili prijemnika. Efekat je prisutan kako za mehaničke tako i za elektromagnetne talase. Zbog toga Doplerov efekat je našao široku primenu u raznim oblastima tehnike, medicine, meteorologije [11] kao i fundamentalnim istraživanjima [12]. Spektralne linije u elektromagnetnom spektru astronomskih objekata pomerene su ka kraćim ili dužim talasnim dužinama što ukazuje na brzinu kretanja ovih objekata – približavaju se ili udaljavaju [13]. Takođe profil spektralnih linija (širina na polovini visine i sam oblik) zavisi od temperature na kojoj se nalazi izvor, jer atomi koji emituju elektromagnetno zračenje, na većim temperaturama imaju veće termalne brzine, odnosno Doplerov efekat je izraženiji. Ovo omogućava određivanje temperatura udaljenih zvezda, ali i laboratorijsku dijagnostiku plazme [14].

Ispitivanje defekata u materijalima moguće je vršiti takozvanom pozitron anhilacionom spektroskopijom koja se opet bazira na Doplerovom efektu [15].



Slika 3. Aparatura za posmatranje Doplerovog efekta i određivanje brzine izvora na osnovu spektralne analize zvučnih talasa.



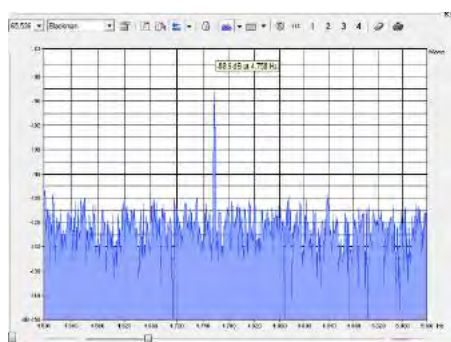
Slika 4. Princip merenja brzine rotirajućeg izvora na bazi Doplerovog efekta.

Doplerov efekat najjednostavnije je posmatrati na zvučnim talasima. Jedna od najznačajnijih primena Doplerovog efekta u medicini se bazira na promeni frekvencije između odaslatog ultrazvučnog signala i reflektovanog ultrazvučnog signala od krvne ćelije koja se nalazi u pokretu. Pri tome je moguće odrediti brzinu eritrocita i njihov smer kretanja u vaskularnom sistemu, odnosno, može se dobiti kolorni prikaz smera i brzine krvnog toka, tehnika poznata kao *color Doppler sonography* [16].

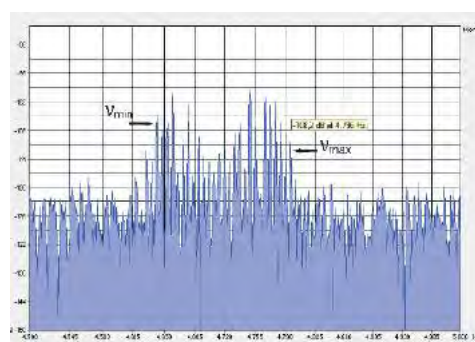
U laboratorijskim uslovima rotirajući izvor ima nekoliko prednosti u odnosu na translatorni jer obezbeđuje da se postignu relativno velike brzine izvora ali i merenje može trajati neograničeno dugo. Komercijalna aparatura bazirana na rotirajućem izvoru ne postoji [17, 18, 19, 20]. Zbog toga je realizovana aparatura sa rotirajućim zvučnim izvorom podesive frekvencije [21, 22, 23] i statičnim prijemnikom koji je povezan na računar (Slika 3). Pomoću računara i odgovarajućeg programa može se vršiti spektralna analiza zvuka u realnom vremenu. U realizovanoj aparaturi može se meriti linijska brzina izvora koji se kreće po kružnici. U tačkama A i B (Slika 4), gde je pravac koji spaja izvor i prijemnik tangenta na kružnicu, brzina približavanja, odnosno udaljavanja je jednaka perifernoj brzini izvora v_i . S obzirom na smer rotacije, frekvencija zvučnog talasa odaslatog iz položaja A koju registruje prijemnik je maksimalna, dok je za položaj B registrovana frekvencija minimalna. Merenjem ovih frekvencija, smatrajući da je brzina zvuka poznata (v_0), moguće je izračunati brzinu izvora na osnovu sledeće relacije:

$$v_i = \frac{v_{max} - v_{min}}{v_{max} + v_{min}} v_0$$

Praktična realizacija aparature sa rotirajućim izvorom i korišćenje softvera omogućava nam da jednostavno proučavamo Doplerov efekat. Analiza zvučnog talasa daje rezultate neophodne za merenje brzine zvuka i za verifikaciju Doplerove jednačine na osnovu koje može da se izračuna i frekvencija emitira zvuka (Slika 5). Takođe, pošto se izvor kreće po kružnici, udaljenost izvora od prijemnika se kontinualno i periodično menja. Zbog toga intenzitet zvuka koji registruje prijemnik je periodična funkcija. Analizom intenziteta zvuka moguće je odrediti period rotacije, a za dati poluprečnik i brzina izvora – što je metod nezavisan od Doplerovog efekta. Upoređivanjem izmerenih brzina analizom intenziteta zvuka i Doplerovim efektom, neposredno stičemo utisak o važnosti Doplerovog efekta.



Izvor miruje



Izvor rotira konstantnom brzinom

Slika 5. Izgled spektralne analize zvuka u programu Sound Forge.

3. ZAKLJUČAK

U cilju unapređenja nastave i praćenja savremenih trendova u nauci i inženjerstvu u laboratoriji za fiziku su razvijene i uspešno implementirane eksperimentalne vežbe koje studentima omogućavaju da na praktičan način razumeju osnovne fizičke principe funkcionisanja savremene tehnologije. Pokazalo se, na osnovu rezultata višestrukih merenja, da realizovana aparatura može da ispuni sve standarde renomiranih proizvođača laboratorijske opreme sa značajno manje utrošenih sredstava. Pored upoznavanja fizičkih fenomena i provere osnovnih fizičkih zakonitosti, u toku izvođenja eksperimenata studenti pored kvantitativnih merenja vrše i obradu podataka korišćenjem naprednih programa, kao što je spektralna analiza zvuka u realnom vremenu. Takođe, u izradi aparatura, tehnologija 3D štampe se pokazala kao nezamenjiva alatka za izradu specifičnih komponenti, što nam je omogućilo izradu laboratorijske opreme koja se ne može, ili se teško može naći, na tržištu.

4. ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija kroz projekat broj 451-03-47/2023-01/200156 "Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN-a" i Departmana za opšte discipline u tehnici, Fakulteta tehničkih nauka u okviru projekta "Unapređenje nastavnog procesa na engleskom jeziku u opštim disciplinama".

5. LITERATURA

- [1] J. A. Olson, K. J. Nordell, M. A. Chesnik, C. R. Landis, A. B. Ellis, M. S. Rzchowsky, S. M. Condren, G. C. Lisensky, J. W. Long, Simple and inexpensive classroom demonstration of nuclear magnetic resonance and magnetic resonance imaging, *J. Chem. Educ.* 77, 7(2000).
- [2] S. Murphy, D.L. Jones, J. Gross, D. Zollman, Apparatus for investigating resonance with application to magnetic resonance imaging, *Am. J. Phys.* 83, 942(2015).
- [3] E. Cookson, D. Nelson, M. Anderson, D. L. McKinney, I. Barsukov, Exploring magnetic resonance with a compass, *Phys. Teach.* 57, 633(2019)
- [4] T. Nemeš, S. Samardžić, M. Milutinov, Investigation of magnetic resonance in the domain of variable magnetization, *Phys. Educ.* 56, 055019(2021)
- [5] <https://datasheet.octopart.com/5080-F.W.-Bell-datasheet-43726.pdf>
- [6] D. Krpić, Fizička mehanika, University of Belgrade, 1996
- [7] B. Barman, A. Petrou, Measuring the magnetization of a permanent magnet, *Am. J. Phys.* 87, 276(2019)
- [8] J. M. D. Coey, Magnetism and magnetic materials, Cambridge University Press, 2009, pp258-260
- [9] A. Roguin, Christian Johann Doppler: the man behind the effect, *Br. J. Radio.* 75 615-619 (2002)
- [10] H. Breuer, dtv-Atlas Physik (Belgrade: Gradjevinska Knjiga a.d.) p 91(2007)
- [11] P. Kollias, S. Tanelli, A. Battaglia, A. Tatarevic, Evaluation of EarthCARE Cloud Profiling Radar Doppler Velocity Measurements in Particle Sedimentation Regimes, *J. Atm. Oc. Tech.* 31 336-386(2014)
- [12] H. P. Donald, Particle Astrophysics (Oxford: Oxford University Press) p 37(2003)
- [13] S. J. Eldberg, What the Doppler Effect Tells Us About Distant Stars and Planets Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology(2005)
- [14] M. Bitter, S. von Goeler, R. Horton, M. Goldman, K. W. Hill, N. R. Sauthoff, W. Stodiek, Doppler-Broadening Measurements of X-Ray Lines for Determination of the Ion temperature in Tokamak Plasmas, *Phys. Rev. Lett.* 42 304-307(1979)
- [15] Meola M, Ibeas J, Lasalle G, Petrucci I. Basics for performing a high-quality color Doppler sonography of the vascular access. *The Journal of Vascular Access.* 2021;22(1_suppl):18-31. doi:10.1177/11297298211018060
- [16] R. W. Siegel, Positron Annihilation Spectroscopy, *Ann. Rev. Mater. Sci.* 10 393-425(1980)
- [17] R. W. Wood, Demonstration of the Doppler Effect, *Phys. Rev.* 4 504(1897)
- [18] T. J. Bensky, S. E. Frey, Computer sound card assisted measurements of the acoustic Doppler effect for accelerated and unaccelerated sound sources, *Am. J. Phys.* 69 1231-1236(2001)
- [19] A. Azooz, Experimental demonstration of Doppler spectral broadening using the PC sound card, *Am. J. Phys.* 75 184-188(2003)
- [20] M. A. Dias, P. S. Carvalho, D. Carvalho, D. R. Ventura, How to study Doppler effect with Audacity software, *Phys. Educ.* 51 035002(2016)
- [21] T. Nemeš, S. Ilić, Lj. Budinski-Petković, M. Veselinović, Experimental analysis of Doppler effect using the rotating sound emitting source, *Rom. Rep. Phys.* 71, 904(2019)
- [22] M. M. F. Saba, R. A. da Rosa, The Doppler Effect of a Sound Source Moving in a Circle, *Phys. Teach.* 41 89-91(2003)
- [23] 555 timerIC (Wikibook).