



FIZIKA NA PRIJEDIPLOMSKOM STRUČNOM STUDIJU RADIOLOŠKE TEHNOLOGIJE

PHYSICS COURSE AT THE UNDERGRADUATE STUDY OF RADIOLOGICAL TECHNOLOGY

Lejla Jelovica^{1*}

1- Fakultet zdravstvenih studija Sveučilišta u Rijeci, Katedra za temeljne medicinske znanosti, Rijeka, Hrvatska

lejla.jelovica@uniri.hr

SAŽETAK

Tehnološki napredak i razvoj računala omogućili su proizvodnju složenih uređaja koji koriste ionizirajuće zračenje za elektroničko snimanje ljudskog tijela, kao i obradu slikovnih prikaza u dijagnostičke i terapijske svrhe. Studentima Prijediplomskog stručnog studija Radiološka tehnologija je neophodno temeljito poznavanje fizike za učinkovitu i sigurnu uporabu novih tehnologija, ali i za razumijevanje principa njihovog rada. Iako spomenuti studij povezuje znanja iz područja informatike i statistike s medicinskim, tek uz razumijevanje fizikalnih zakonitosti o konceptima koji se spominju u okviru medicinske radiologije, studenti postaju kompletni stručnjaci educirani za samostalan rad ili rad u timu u području radiografije, nuklearno-medicinske te radiološke dijagnostike i terapije.

Istovremeno, poznavanje i konceptualno tumačenje zakona fizike nužni su za razumijevanje temeljnih bioloških procesa unutar ljudskog tijela, poput rada srca ili prijenosa živčanih impulsa. Stoga se u okviru kolegija Fizika stavlja naglasak na poznavanje strukture tvari i građe atoma, elektromagnetizma, ultrazvuka, elementarne nuklearne fizike, prirode i ionizirajućeg zračenja te proizvodnje i primjene X zraka koje su temeljne za razumijevanje fizike medicinskog snimanja.

U radu su izdvojena neka područja koja su sastavni dio kolegija Fizika na Prijediplomskom stručnom studiju Radiološke tehnologije.

Ključne riječi: fizika, medicinska radiologija, radiološki tehnolozi, tehnologija

ABSTRACT

Technological advances and the development of computers have enabled the production of sophisticated devices that use ionizing radiation for electronic imaging of the human body and for image processing for the purpose of diagnosis and treatment of disease. Undergraduate students in radiological technology need a thorough knowledge of physics in order to use these new technologies efficiently and safely and to understand the fundamentals of their work. Although the undergraduate program in radiological technology combines knowledge from computer science and statistics with medical knowledge, it is only through an understanding of the physical laws of the concepts mentioned in the context of medical radiology that students become complete experts, able to work independently or as part of a team in the field of radiography, nuclear medicine, and radiologic diagnosis and therapy.

At the same time, knowledge and conceptual interpretation of the laws of physics are necessary for understanding basic biological processes in the human body, such as the cardiac activity or the transmission of nerve impulses. Therefore, the subject of physics focuses on knowledge of the structure of matter and the structure of atoms, electromagnetism, ultrasound, elementary nuclear physics, the nature of ionizing radiation and the generation and application of X-rays, which is fundamental to understanding the physics of medical imaging.

The paper introduces some areas of science that are an integral part of the Physics course at the Undergraduate Professional Study of Radiological Technology.

Keywords: medical radiology, physics, radiologic technologist, technology

UVOD

Primjena fizikalnih principa za otkrivanje unutarnjih struktura ljudskog tijela potaknuta je u drugoj polovici 19. stoljeća i brzo je postala temelj prakse dijagnostičke radiologije (1). Tijekom posljednjih 50 godina, slikovna dijagnostika prerasla je analognu metodologiju oslikavanja ljudskog tijela te su razvijeni novi načini snimanja (2). Upravo je razumijevanje ionizirajućeg zračenja i materije od temeljnog značaja za izradu dijagnostičkih slika (3).

Istovremeno, moderno medicinsko oslikavanje uključuje stvaranje slike, ali i obradu, kompjuterski potpomognutu dijagnostiku, snimanje i pohranjivanje te prijenos slike, od kojih je većina uključena u sustav za arhiviranje slika (PACS), (4). Najznačajnija prednost je mogućnost istovremenog pružanja slika većem broju korisnika u cijelom sustavu, čime se poboljšava skrb za pacijente (5). Kompetencije prvostupnika radiološke tehnologije podrazumijevaju ne samo rad s već spomenutim računalnim sustavima za komunikaciju i arhiviranje digitalnih radioloških slika, već i samostalno rukovanje svim vrstama radioloških uređaja konvencionalne i digitalne radiologije.

Uporaba digitalne radiografije iziskuje poznavanje širokog raspona tema, poput karakteristika digitalnih slika i računalnih komponenti, dok različiti modaliteti snimanja poput radionuklidnog snimanja, magnetske rezonancije, ultrazvuka ili kompjutorizirane tomografije zahtijevaju poznavanje osnova nuklearne fizike, akustike, te elektromagnetizma (6, 7). Budući da u svom radu koriste ionizirajuće rendgensko zračenje koje u tkivu može uzrokovati oštećenje, radiološki tehnolozi trebaju biti educirani za njegovu ispravnu uporabu i doziranje, ali i poznavati interakcije s materijom kao i njegove biološke učinke (1).

Iz navedenog možemo zaključiti da je radiološkim tehnolozima nužno posjedovanje različitih vještina, od razumijevanja temeljnih principa rada modernih uređaja, do poznavanja bioloških procesa koji se odvijaju unutar ljudskog organizma. Budući da su spomenuti mehanizmi bazirani na istim fizikalnim zakonima, nužno ih je integrirati u smisleni i povezanu strukturu.

Stoga su u nastavku teksta prikazani i objašnjeni odabrani fizički koncepti iz Izvedbenog nastavnog plana kolegija Fizika (8), koji omogućuju dublje razumijevanje prirodnih mehanizama prisutnih u svijetu koji nas okružuje kao i u nama samima, te ukazuju na njihovu međusobnu povezanost.

TEMELJNI KONCEPTI: MATERIJ, SILA I ENERGIJA

Kako bi studenti Prijediplomskog stručnog studija Radiološka tehnologija razumjeli način na koji ionizirajuće zračenje djeluje s materijom, nužno je poznavati strukturu same materije, ali i prirodu radijacije.

Budući da veći dio studenata na spomenutom studiju ima opću gimnazijsku naobrazbu, u okviru koje nastavni kurikulum fizike podrazumijeva učenje fizike po modelu 4x70 (9), već imaju osnovna znanja o konceptima mase, sile i energije. Spomenute fizikalne veličine temeljne su za razumijevanje interakcije čestica tvari i zračenja koje se koriste u radiološkim dijagnostičkim postupcima i terapijskim tretmanima.

Obzirom da je u radiologiji ključna riječ „interakcija“, nužno je us-

vojiti temeljna znanja o elementarnim česticama (neutroni, elektroni, protoni...) i tipovima zračenja koji ju ostvaruju (10). Naime, moderna fizika razlikuje dvije vrste čestica kao dvije manifestacije materije: materijalne čestice koje se gibaju brzinama puno manjim od brzine svjetlosti i čestice koje su prijenosnici poznatih sila, a gibaju se brzinom svjetlosti (11). Prvu vrstu tvore atomi koji su izgrađeni od jezgre u kojoj su smješteni protoni i neutroni koje tvore kvarkovi (12) te elektronskog omotača u kojem se po stacionarnim stazama gibaju najpoznatiji leptoni - elektroni (10). Kako u svijetu atoma vrijede zakoni kvantne fizike koji su različiti od klasično mehaničkih pravila Newtonove fizike, studenti se u okviru kolegija Fizika upoznaju s temeljnim kvantno-mehaničkim konceptima, poput kvantiziranosti naboja i energije. Primjerice, u okviru predavanja o atomskoj strukturi, upoznaju se s različitim oblicima interakcija: spominju jaku i slabu nuklearnu silu (koje imaju kratak domet, reda veličine par fm) te gravitacijsku i elektromagnetsku silu koje imaju beskonačni doseg (6). Pri tome se naglašava da je gravitacijska sila na udaljenostima reda veličine 10-10 m, koliko iznosi promjer atoma, ili 10-15 m, koliki je promjer jezgre, zanemariva, dok je elektromagnetska interakcija prisutna kao odbojna između protona unutar jezgre, ali i kao privlačna između protona i elektrona unutar atoma (12). Slaba sila se objašnjava kao interakcija koja je odgovorna za uobičajeni oblik radioaktivnosti koji se naziva beta raspad u kojem se radioaktivna jezgra transformira prilikom pretvorbe neutrona u proton. Kao najznačajnija sila za razumijevanje mehanizama i zakonitosti koje vladaju u subatomskom svijetu navodi se jaka nuklearna sila koja utječe na stabilnost jezgre jer drži protone na okupu, koje bi inače elektrostatska sila razdvojila (1). Ona ujedno omogućava opstanak prirode i životnih procesa kakve mi danas poznajemo (12). Za fenomene koji se primjenjuju u medicinskoj radiologiji zanimljiv je i koncept energije. Energija kao i materija u prirodi se pojavljuje u različitim oblicima. U okviru kolegija se naglašava dio spektra elektromagnetskog zračenja koji se koristi u medicinskom oslikavanju X zrakama (10). X zrake nastaju tijekom naglog kočenja elektrona visoke energije i fotonskog su karaktera (13). Također se ističe kako ta energija prilikom emisije ili prolaska kroz tvar ionizira tvari s kojom dolazi u kontakt, pri čemu oštećuje stanice i tkiva te mijenja strukturu ozračenog materije (13). Pri tome, nastali ioni narušavaju biokemijske procese u stanicama što može dovesti do problema u njihovom funkcioniranju i dijeljenju, pa čak i do bolesti (1). Stoga se radiološki tehnolozi u okviru predavanja „Zaštita od ionizirajućeg zračenja“ upoznaju sa mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja te njegovim štetnim posljedicama na ljudski organizam (8).

Nadalje, razumijevanje dualnosti prirode također je neophodno za konceptualno shvaćanje mehanizama koji se odvijaju tijekom interakcija zračenja i tvari. Stoga je tim konceptima posvećena pažnja u okviru predavanja „Elektromagnetsko zračenje“, predstavljajući mase i energije kao osnovnim svojstvima materije. Pri tome se njihov ekvivalentnost tumači Einsteinovom relacijom 1, budući je brzina svjetlosti c konstantna vrijednost:

$$E=mc^2 \dots\dots(1)$$

gdje je:

m – masa tijela

c – brzina svjetlosti gdje je: $(3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1})$

m – masa tijela

E – energija tijela

Dakle, materijalni oblik kojeg predstavlja masa kao temeljno svojstvo svakog tijela i zračenje kojeg karakterizira energijski ekvivalent, mogu se pretvarati jedan u drugi pod određenim okolnostima, i u okviru zakona fizike. Ova je činjenica prisutna kod interakcije tvari i gama zračenja, kada se primjerice, objašnjava mehanizam nuklearnog β^+ raspada u procesu pozitronske emisijske tomografije (PET), neinvazivne nuklearnomedicinske pretrage za određivanje funkcionalnost tkiva tj. stanični metabolizam (14).

Istovremeno, obzirom da radionuklidna slikovna dijagnostika ali i radioterapija spadaju u uže kompetencije prvostupnika radiološke tehnologije, u okviru kolegija stječu se i osnovna znanja o fizikalnim zakonitostima po kojima se spomenuti, ali i slični, procesi odvijaju. Naime, otkriće radioaktivnosti pokazalo je da se energija pohranjena u jezgri može osloboditi kao kinetička energija radioaktivnih čestica, npr. tijekom raspada jezgre kod alfa ili beta raspada. Intenzitet te energije ovisi o energiji vezanja određene jezgre (15). Nuklearna energija vezanja definirana je kao količina energije potrebna da se prilikom formiranja jezgre, protoni i neutroni unutar jezgre održe zajedno. Međutim, eksperimentalno je utvrđeno da je za svaku jezgru njezina masa manja od ukupne mase njenih protona i neutrona (15), a razlika se naziva defekt mase. U okviru kolegija Fizika, pomoću teorije relativnosti tumači se defekt mase određene jezgre kao posljedica pretvorbe dijela mase nukleona (protona i neutrona) u energiju veze nukleona prijenosnika jake sile (11, 15). Ovom teorijom je studentima objašnjen princip nastanka beta plus čestica (pozitronskih emitera) koji se koriste u radionuklidnoj slikovnoj dijagnostici, kao i beta minus gama emitera koji se koriste u radioterapiji (npr. brahiterapiji) i medicinskoj dijagnostici (obilježivači kod in-vitro mjerenja).

INTERAKCIJE FOTONSKOG ZRAČENJA I ELEKTRONA SA TVARI

U predavanju "Međudjelovanje fotoniskog zračenja i tvari", budući radiološki tehnolozi upoznaju se s fizikalnim konceptima o efektima koji nastaju prilikom interakcije ionizirajućeg zračenja s tkivima, odnosno organima. Tijekom osnovne i srednje škole, ali i na sveučilišnoj razini, standardni udžbenici iz fizike opisuju građu atoma, njegove temeljne karakteristike, ali i osnovne procese koji nastaju usljed vanjske pobude. Primjerice, u udžbeniku (12), se navodi da u fotoelektričnom efektu atom postaje pozitivno nabijeni ion ukoliko se izloži djelovanju elektromagnetskog zračenja. U okviru kolegija Fizika objašnjavamo načine na koje dolazi do predaje energije kroz različite procese kao što su spomenuti fotoelektrični učinak, ali i Comptonovo raspršenje te tvorba para pozitron-elektron (16). Naime, fotoni ionizirajućeg zračenja mogu na različite načine međudjelovati s atomima tvari. Pri tome slabi njihova energija koju tvar apsorbira, pa kažemo da tvar djeluje kao prigušivač, odnosno atenuator (10). Tijekom interakcija, foton može potpuno nestati (fotoelektrični efekt, proizvodnja para čestica-antičestica), a može se koherentno ili nekoherentno raspršiti kod Comptonovog učinka, što ovisi o energiji upadnog fotona i o atomskom broju atenuatora (6, 10).

Pri tome je energija E, kvantizirana i razmjerna frekvenciji ν , emitiranog odnosno apsorbiranog zračenja (12), a može se prikazati Planckovom relacijom 2:

$$E = h \cdot \nu \dots \dots \dots (2)$$

gdje je h – Planckova konstanta

Tijekom fotoefekta, ukoliko gama-foton, ili X zraka intereagira s elektronom koji je vezan unutar atoma, foton svu svoju energiju predaje elektronu i nestaje (16). Elektron na ovaj način dobije dovoljnu količinu energije za savladavanje izlaznog rada unutar matičnog atoma (minimalni iznos energije potreban elektronu da se oslobodi privlačnog djelovanja matične jezgre) te ga napušta, a tvar iz koje izlazi postaje ionizirana (1). Izvan atoma, elektron se kreće velikim brzinama i nastavlja ionizirati okolnu tvar (10, 16). S druge strane, budući da se u radioterapiji koriste visokoenergijske rendgenske zrake (do 5 MeV), u interakciji X zraka s tvari najzastupljenije je Comptonovo raspršenje (16). Comptonov učinak nastaje kada foton ionizirajućeg zračenja djeluje sa slobodnim elektronima, ili onima koji su u vanjskoj ljusci slabo vezani, tzv. orbitalni elektroni (6). Tada foton predaje elektronu samo dio svoje energije s kojom se elektron oslobađa utjecaja jezgre i napušta atom. Preostali dio energije očituje se kao foton čija je putanja otklonjena od putanje upadnog fotona (16).

Osnovna je razlika između ova dva efekta u tome što je fotoefekt ovisan o atomskom broju elementa tvari i nastaje kao posljedica interakcije tvari i fotona manjih energija, dok Comptonov učinak ovisi o gustoći sredstva (16) i javlja se kod visokoenergijskih fotona. O tvorbi para studenti saznaju da visokoenergijski foton nestaje nakon međudjelovanja s teškom jezgrom te kao produkt nastaje par pozitron-elektron (6). Ovaj proces završava anihilacijom pozitrona te emisijom dva fotona što se koristi u formiranju raspodjele pozitronskih nuklida u tijelu, u okviru radionuklidne slikovne dijagnostike (16). Primjer je već spomenuta dijagnostička pretraga PET, u kojoj se koriste radiofarmaci (radioaktivne supstance u kombinaciji s glukozom) koji se injektiraju u organizam pacijenta te se nakon toga mjeri njihova potrošnja (14). Poznato je da bolesne stanice zbog svoje ubrzane diobe pojačano troše glukozu te imaju veću metaboličku aktivnost u organizmu pa se ovom metodom lako otkrivaju. Fizikalna podloga ove pretrage opisana je kroz primjer tvorbe para koja nastaje nakon interakcije gama fotona visokih energija i jezgre atoma tvari. Naime, kada se gama-fotoni nađu u blizini jezgre atenuatora mogu spontano nestati i stvoriti par čestica-antičestica, tj. elektron i pozitron. Nakon emisije iz svog izvora, visokoenergijski pozitron prelazi nekoliko milimetara kroz tkivo dok se ne spoji sa slobodnim elektronom iz matičnog atoma unutar tkiva, sa kojim formira pozitronij (17). Ovo vezano stanje elektron-pozitron raspada se anihilacijom, stvarajući par gama zraka energija od 511 keV koje putuju u gotovo suprotnim smjerovima, a što je posljedica zakona očuvanja količine gibanja (16, 17). Dobiveni fotoni iz raspada pozitrona lociraju se pomoću detektora koji okružuju pozitronski izvor, što omogućava mjerenje radioaktivnosti kroz promatrani organ pod velikim brojem kutova i radijalnih udaljenosti (17).

Treba napomenuti da fotonsko gama zračenje indirektno ionizira tvar jer svaki foton ionizira samo jedan atom uzorka, a tek nastale nabijene čestice lančanom reakcijom uzrokuju daljnju ionizaciju (10, 16). Na isti način tvar ionizira i rendgensko (X) zračenje pa se oba ubrajaju u indirektno ionizirajuća zračenja (1). Opisani učinci određuju sadržaj i kvalitetu rendgenske snimke u dijagnostičkoj radiologiji. Budući da su za kvalitetu radiograma potrebne monokromatske X zrake (iste valne duljine), koriste se filtri koji apsorbiraju dio elektromagnetskog spektra koji obuhvaća fotonsko zračenje malih energija proizvedeno u rendgenskim cijevima (10).

Obzirom da je rendgensko snimanje jedno od glavnih zaduženja radioloških tehnologa, poznavanje spomenutih mehanizama neophodno je za dobivanje kvalitetnih slika (16).

S druge strane, na kolegiju se tumači i način nastanka rendgenskog zračenja koje se koristi u radiografiji te radiološkoj dijagnostici i terapiji (6, 10) te principi proizvodnje zakočnog i karakterističnog X zračenja. Naime, kada elektron prolazi kroz neku tvar, on interagira s atomskim orbitalnim elektronima i atomskim jezgrama te izaziva ekscitaciju i ionizaciju (1). Tada su moguća dva ishoda: ili elektroni gube svoju kinetičku energiju u sudarima ili mijenjaju smjer gibanja (raspršenje) zbog elektrostatske Coulombove sile (6). Prilikom sudara, elektron može, ali i ne mora gubiti svoju energiju, što ovisi o vrsti sudara. U elastičnom sudaru, elektron skreće sa svoje izvorne putanje bez gubitka energije, dok u neelastičnom sudaru elektron skreće sa svoje prvobitne putanje uz gubitak energije. Prolaskom kroz tvar elektron se može otklanjati sa svoje putanje zbog utjecaja elektrostatske sile elektrona iz matičnih atoma unutar sredstva (6). Tada se elektroni usporavaju, tj. koče, emitirajući fotone različitih valnih duljina (18), što rezultira emisijom elektromagnetskog zračenja koje zovemo zakočno zračenje (6,18). Intenzitet novonastalog zračenja ovisi o energiji upadnih elektrona, a najčešće je prisutno u sredstvima s velikim atomskim brojem (6, 10). Usporeni elektroni se dalje nastavljaju gibati u novom smjeru sa promijenjenom kinetičkom energijom. Ta energija je manja od početne za energiju emitiranog elektromagnetskog zračenja (9). Ukoliko elektroni tijekom interakcije izgube svu svoju kinetičku energiju, tada nastali fotoni imaju maksimalnu energiju kojoj su pridružena određena frekvencija i valna duljina. Valna duljina će biti u tom slučaju minimalna za nastalo rendgensko zakočno zračenje, a može se izračunati Duane-Huntovim zakonom (17), prikazanim izrazom 3:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_A} \dots\dots\dots(3)$$

gdje je : h- Planckova konstanta (6,626 · 10⁻³⁴)s
 c- brzina svjetlosti (3·10⁸ms⁻¹)
 e- naboj elektrona (1,6·10⁻¹⁹C)
 U_A- anodni napon

Pri tome, u kontinuiranom spektru rendgenskog zakočnog zračenja, za odabrani anodni napon U_A, nema valnih duljina kraćih od granične minimalne valne duljine koja je prikazana Duane-Huntovim zakonom. Nadalje, postanak karakterističnih X zraka objašnjava se kroz lančani proces ekscitacije matičnih elektrona unutar tvari koja se javlja kada je energija koja je predana prilikom interakcije s upadnim elektronima manja od energije vezanja elektrona unutar atoma u apsorbirajućem materijalu. Tada dolazi do

izbacivanja matičnih elektrona u ljuske dalje od jezgre (tj. do viših energijskih razina), pri čemu se stvaraju prazna mjesta u nižem energijskom stanju (1). Na ovaj način dolazi do destabilizacije atoma koja se ispravlja tako što novostvoreno slobodno mjesto u unutarnjoj elektroničkoj ljusci, popunjava elektron iz udaljenije (vanjske) ljuske s većom energijom, što rezultira domino efektom čija je posljedica pojava karakterističnog X zračenja (19). Frekvencija nastalog zračenja se određuje prema izrazu 4:

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} \dots\dots\dots(4)$$

gdje je: E_n – energija višeg energetskog nivoa
 E_m – energija nižeg energetskog nivoa
 h – Planckova konstanta (6,626 · 10⁻³⁴)s
 ν – frekvencija

Oslobodena energija može se prenijeti i na neki drugi elektron unutar istog atoma. Taj novi elektron koji apsorbiranom energijom može savladati energiju vezanja i napustiti atom naziva se Augerov elektron (ima kratak domet i malu energiju), a proces njegovog nastanka Augerov učinak (19). Pri tome, emitirani foton elektromagnetskog zračenja odnosi dio energije upadnih elektrona te predstavlja karakteristično X zračenje, a dobiveni energijski spektar je linijski (10, 16). Iako ovaj učinak predstavlja neradijacijski proces, može dovesti do oštećenja bioloških molekula poput makromolekule DNA uključujući stvaranje dvolančanih lomova (19).

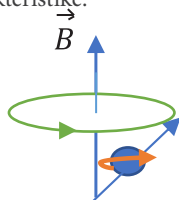
Treba naglasiti da se X zračenje koje ima energiju veću od 1 MeV koristi u radioterapiji, dok se rendgensko zračenje nižih energija koristi u dijagnostičke svrhe (16). Obzirom da je rendgensko zračenje uz fotonsko gama zračenje od osobitog značaja u medicinskoj radiologiji jer oba predstavljaju osnovni alat u dijagnostici i radiološkoj terapiji (10), u okviru navedenog kolegija posvećena je pažnja razumijevanju procesa nastanka X zraka. Stoga je u okviru predavanja „Rendgenska cijev“, detaljnije opisan postupak termionske emisije kao temeljnog mehanizma generiranja elektrona unutar rendgen uređaja (20).

U nastavku teksta, s fizikalnog aspekta, objašnjena je dijagnostička metoda koja ne koristi ionizirajuće zračenje, a koja također spada u uže kompetencije radioloških tehničara.

OSNOVNI FIZIKALNI KONCEPTI OSLIKAVANJA MAGNETSKOM REZONANCIJOM (MRI)

Jedna od kompetencija prvostupnika radiološke tehnologije samostalno je izvođenje oslikavanja tijela metodom magnetske rezonancije. To je dijagnostička neinvazivna pretraga koja ne koristi ionizirajuće zračenje (21). Ova radiološka metoda kombinira snažno magnetsko polje s radiovalovima za produkciju višedimenzionalnih slika ljudskog organizma te omogućava nastanak detaljnih slika organa, mišića, živaca, krvnih žila i ostalih struktura u tijelu i uočavanje eventualnih anomalija nastalih uslijed određenih bolesti (22). Treba napomenuti da se fizikalna metoda zove magnetska rezonancija (MR), a medicinska slikovna dijagnostika koja koristi ovu metodu nazvana je oslikavanje magnetskom rezonancijom (MRI) (16). Prvotni naziv nuklearna magnetska rezonancija (NMR) prestao se koristiti zbog pogrešne asocijacije na ionizirajuće zračenje

(16). Iako su osnovni principi magnetske rezonancije otkriveni još 1946., zaslugom fizičara Purcella (s Harvarda) i Blocha (sa Stanforda) koji su do otkrića došli neovisno jedan o drugome i koji su za taj izum dobili Nobelovu nagradu, prve primjene počele su tek sedamdesetih godina prošlog stoljeća (22, 23). Fizika ove radiološke pretrage počiva na interakciji vanjskih magnetskih polja i magnetskih svojstava jezgre atoma vodika kao najzastupljenijeg elementa u ljudskom organizmu (21, 24). Naime, vodik je najvažniji atom za MR ne samo zato što je najzastupljeniji u tkivu, već i zbog toga što proizvodi najjači signal na pobudu izazvanu vanjskim magnetskim poljem (22, 23). Kako bi razumjeli mehanizam na kojem se zasniva magnetska rezonancija, studenti se najprije upoznaju s fizičkim konceptima iz magnetizma poput magnetske sile, jakosti magnetskog polja koje stvara naboj u gibanju, gustoće magnetskog toka i magnetskih silnica te elektromagnetske indukcije. Nadalje, u udžbeniku (23) koji predstavlja obveznu literaturu na kolegiju Fizika, opisana su tri načina gibanja električnog naboja: gibanje elektrona po stacionarnoj stazi, vrtnja elektrona oko svoje osi te gibanje jezgre oko svoje osi. Kao rezultat navedenih gibanja, svakoj čestici pridružen je spin, kvantno-mehanička fizička veličina koja se definira kao vlastita kutna količina gibanja promatrane čestice, a koja je uz masu i naboj temeljno svojstvo svake čestice. Posljedično, svaka subatomska čestica ima svoj magnetski moment. Kad se atom s magnetskim momentom stavi u vanjsko magnetsko polje, magnetski momenti njegovih elektrona i jezgre će nastojati uskladiti se s primijenjenim vanjskim poljem. To poravnanje će ovisiti o jakosti magnetskog polja i termičkih smetnji nastalih nasumičnim termičkim gibanjem atoma (23). Magnetizacija jezgre je temeljni koncept neophodan za razumijevanje ove slikovne metode, stoga je detaljnije objašnjen u spomenutom udžbeniku (23). Naime, ukoliko jezgra ima paran broj protona, odnosno neutrona, čiji su magnetski momenti istog iznosa, ali suprotne orijentacije, jezgra će biti neutralna, bez magnetskih svojstava. U suprotnom, jezgra se ponaša kao mali magnet koji ima vlastite magnetske karakteristike.



Slika 1. Precesijsko gibanje

Kada ovu magnetiziranu jezgru, kao što je vodikova, koja ima samo jedan proton, stavimo u nepromjenjivo vanjsko magnetsko polje, njezin magnetski moment se orijentira u istom ili suprotnom smjeru od spomenutog magnetskog polja. Pri tome, vektor magnetskog momenta jezgre nije apsolutno paralelan s vektorom magnetskog polja jer jezgra izvodi gibanje oko osi primijenjenog polja u obliku stošca, koje se opisuje fizikalnim konceptom precesijskog gibanja (slika 1). Tada je, prema (24), frekvencija precesijskog gibanja proporcionalna s jakosti magnetskog polja (B) i prikazana izrazom 5, tzv. Larmorovom jednadžbom:

$$\omega = \gamma \cdot B \dots\dots\dots(5)$$

gdje je γ giromagnetski koeficijent proporcionalnosti

Ovaj koeficijent konstantan je za svaki element, primjerice, za vodik iznosi 42,6 MHz/T (31). Ujedno svaka promjena vanjskog magnetskog polja, rezultira modifikacijom u frekvenciji precesije.

Na dalje, prema autorima udžbenika (23), zbog kvantno-mehaničkih razloga, jezgra atoma vodika može se nalaziti u dva energijska stanja koja su determinirana njezinim spinskim magnetskim momentom (koji poprima vrijednosti $\pm 1/2$): u stanju niže energije koje pretpostavlja istu orijentaciju vektora spina (paralelna orijentacija) i vanjskog magnetskog polja te u stanju više energije koje podrazumijeva njihovu obrnutu orijentaciju (antiparalelna orijentacija), (16, 24, 25). Budući da se magnetski momenti suprotno orijentiranih jezgri vodika poništavaju, od interesa za signal koji mjerimo su samo preostale jezgre, kojih ima više u uzorku. Obzirom da je u homogenom vanjskom magnetskom polju uzorak u stanju ravnoteže te da su u takvim uvjetima više zaposjednuta stanja niže energije, jezgre u paralelnoj orijentaciji su zastupljenije u uzorku. Pri tome, ukupni zbroj vektora magnetskih momenata ovih jezgri određuje karakteristike i intenzitet rezultantnog vektora makroskopske magnetizacije, uzorka koji se može regulirati primjenom različitih intenziteta vanjskog magnetskog polja. Ujedno, prelaskom jezgri između navedenih energijskih stanja dolazi do promjene u njihovoj energiji koja je proporcionalna jakosti primijenjenog vanjskog polja (21, 25), što odgovara frekvencijama radiovalnog dijela elektromagnetskog spektra. Stoga, upravo radiosignal koristimo za indukciju rezonancije magnetskih momenata jezgri (16, 21, 22).

Radiovalovi imaju još jednu ulogu: zakreću rezultantni vektor magnetnog momenta jezgri uzorka u željenom smjeru. Naime, bez primijenjenog vanjskog radiosignala, smjer makroskopske magnetizacije je paralelan sa smjerom vanjskog stalnog magnetskog polja, pa je uzorak u longitudinalnoj magnetizaciji, a ako su navedeni smjerovi međusobno okomiti tada je magnetski moment uzorka transverzalan magnetiziran (24). Međutim, zbog paralelnosti vektora longitudinalne magnetizacije sa smjerom vanjskog stalnog magnetskog polja, nemoguće ih je razlikovati te se stoga primjenjuje vanjski periodički radiovalni signal koji proizvodi transverzalnu magnetizaciju jezgri promatranog uzorka tkiva kako bi signal bio mjerljiv (23). Izlaganjem odabranog uzorka tkiva, ili organa promjenjivom radiovalnom zračenju frekvencija jednakih onoj kojom precesiraju jezgre u smjeru okomitom na vanjsko magnetno polje (25), jezgre atoma vodika iz uzorka apsorbiraju energiju fotona zračenja te iz stanja niže energije prelaze u stanje više energije (24, 25). Na taj se način smanjuje neto magnetizacija uzorka (16, 21). Pod utjecajem ovog zračenja, vektor magnetizacije uzorka mijenja smjer i postaje sve više okomit na ravninu vanjskog magnetskog polja te se poravnava sa smjerom polja primijenjenog radiovalnog zračenja. Kažemo da se povećava transverzalna komponenta magnetizacije uzorka, a smanjuje longitudinalna (16). Radiovalno polje obično se primjenjuje u kratkim impulsima, svaki u trajanju od nekoliko mikrosekundi (25). Pri tome, polje stvara periodički promjenjivu makroskopsku magnetizaciju uzorka s kojom je u rezonanciji (16). Posljedično, u skladu sa zakonom elektromagnetske indukcije, inducira se napon (MR signal) u zavojnici koja je postavljena oko promatranog uzorka. Proizvedeni signal detektira se i računalno pretvara u sliku (24). Kvaliteta dobivenog signala ovisi o intenzitetima stalnog vanjskog magnetskog polja i promjenjivog radiovalnog zračenja, ali i vremenima relaksacije (T1 i T2). Ovo su vremenski parametri koji opisuju kako se ponašaju protoni, tj. jezgre atoma vodika, unutar

uzorka između dva radiovalna signala kada se sustav nastoji vratiti u ravnotežno stanje (22, 24). Za njih vrijedi:

1. T_1 je vrijeme potrebno da vektor longitudinalne magnetizacija postigne 63% početnog stanja (u longitudinalnoj magnetizaciji), (21). To vrijeme će biti kraće ukoliko jezgre vodika koji su apsorbirale energiju radiovalnog zračenja i prešle u stanje više energije, brže predaju energiju okolnim atomima.

2. T_2 je vrijeme potrebno da vektor transverzalne magnetizacije postigne 37% svoje maksimalne ostvarene vrijednosti (21). Dakle, T_2 je vrijeme za koje se 37% protona iz uzorka, nakon prestanka primjene radiovalnog signala, nije vratilo u polazno, vanjsko magnetsko polje.

Ujedno, navedeni parametri ovise o strukturi i vrsti tkiva, količini vode unutar tkiva te različitim patološkim stanjima (22), npr. zdravo tkivo sadrži manje vode nego tumorsko tkivo (23, 24). Kombinacijom relaksacijskih vremena dobiva se jasna slika o stanju promatranog dijela tijela: zdrava i bolesna tkiva ne emitiraju signale istog intenziteta, jer zbog različitih patoloških procesa prisutnih u bolesnom uzorku, imaju različitu magnetizaciju, a u skladu s tim i različit odgovor na vanjsku pobudu (21, 25). Budući da magnetska rezonancija predstavlja temelj za medicinsko oslikavanje unutarnjih struktura organizma MRI dijagnostikom, detaljnije je objašnjena u sklopu predavanja „*Elektromagnetizam*“.

ZAKLJUČAK

Napredak i razvoj novih tehnologija omogućio je proizvodnju sofisticiranih uređaja koji se koriste u medicinskoj dijagnostici i terapijskim postupcima na radiološkim odjelima. Principi rada takvih modernih uređaja počivaju na fizikalnim zakonitostima koji se objašnjavaju i uče u okviru nastavnog predmeta Fizika. Obzirom da je rad na spomenutim uređajima jedna od užih kompetencija radioloških tehnologa, studenti trebaju biti dobro educirani za njihovo pravilno korištenje. Budući da je osnovni alat u medicinskom oslikavanju tijela ionizirajuće zračenje, neophodno je da radiološki tehnolozi poznaju različite vrste interakcija zračenja i tvari kroz koju zračenje prolazi te načine njegovog nastanka. Također, nužno je poznavati tehnike, principe i zakonitosti na kojima počivaju radionuklidne slikovne pretrage, ali i dijagnostika koja ne koristi ionizirajuće zračenje, poput magnetske rezonancije. Fizika je stoga, neizostavan kolegij na Prijediplomskom stručnom studiju Radiološke tehnologije, jer budućim stručnjacima u području medicinske radiologije omogućava stjecanje potrebnih kompetencija u skladu sa smjernicama struke.

Zahvala

Zahvaljujem doc. dr. sc. Andrici Lekić na korisnim sugestijama i pomoći pri izradi članka

LITERATURA

1. Dance DR, Christofides S, Maidment ADA, McLean ID, Ng KH. Diagnostic Radiology Physics: A Handbook for Teachers and Students, Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014.
2. Kunio D. Diagnostic imaging over the last 50 years: research and development in medical imaging science and technology, *Phys. Med. Biol.* 2006; 51(13): 5-28.
3. Fosbinder K, Orth D. Essentials of radiological science, Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins; 2011.
4. Goske MJ, Charkot E, Herrmann T, John SD, Mills TT, Morrison G, Smith SN. Image Gently: Challenges for radiologic technologists when performing digital radiography in children, *Pediatr Radiol* 2011; 41: 611–619.
5. Charkot E. Impact of digital radiography on the radiographer. *SIIM* 2009; 21:9–17.
6. Podgorsak EB. Radiation oncology physics: A Handbook for Teachers and Students, Vienna: International Atomic Energy Agency; 2005.
7. Huda W, Slone RM. Review of Radiologic Physics. 2nd ed. Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins; 2003.
8. INP za kolegij Fizika na Prijediplomskom sveučilišnom studiju Radiološka tehnologija; Dostupno na URL adresi: https://fzsri.uniri.hr/files/NASTAVA/Preddiplomski/RT/Izvedbeni_nastavni_plan/1god-red/Fizika_RR1.pdf
Datum pristupa: 27. studenoga 2022.
9. MZO, Odluka o donošenju kurikuluma za nastavni predmet Fizike za osnovne škole i gimnazije u Republici Hrvatskoj, 2019; Dostupno na URL adresi: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_01_10_210.html
Datum pristupa: 27. studenoga 2022.
10. Bushong SC. Radiologic Science for Technologists: Physics, Biology and Protection. 12th ed. St. Louis, Missouri: Elsevier; 2021.
11. Zaškodny P. Physics for radiological workers, *J Appl Biomed* 2003;1: 41–48.
12. Young HD, Freedman RA. Sears and Zemansky University Physics With Modern Physics. 14th ed. Santa Barbara: Pearson Education; 2016.
13. Carlton RR, Adler AM. Principles of Radiographic Imaging: An Art and a Science, Clifton Park, NY: Delmar; 2013.
14. Saha GB. Basics of PET Imaging: Physics, Chemistry and Regulations. 3rd ed. Switzerland: Springer International Publishing; 2016.
15. Paraschiv LS, Paraschiv S, Dragan M. A web application to calculate the mass defect and nuclear binding energy per nucleon, *Energy Rep.* 2022; 8(9):342 – 350. doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.087
16. Eterović D. Fizikalne osnove i klinički aspekti medicinske dijagnostike, Zagreb: Medicinska naklada; 2002.
17. Ziegler SI. Positron Emission Tomography: Principles, Technology and Recent Developments, *Nucl. Phys.* 2005; 752: 679–687. doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.02.067
18. Šolić F, Žauhar G. Fizika za medicinare. Rijeka: Medicinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; 2013.
19. Higashi Y, Ma Y, Matsumoto K, Shiro A, Saitoh H, Kawachi T, Tamanoi F. The Enzymes: Chapter Seven - Auger electrons and DNA double-strand breaks studied by using iodine-containing chemicals (Vol.51), London: Elsevier; 2022.
20. Nascimento MLE. Brief history of X-ray tube patents. *World Pat. Inf* (2014); 37:48 – 53. doi:10.1016/j.wpi.2014.02.008
21. Brown M, Semelka R. MRI: Basic Principles and Applications. 4th ed. New Jersey: John Wiley&Sons; 2003.
22. Vlaardingerbroek MT, den Boer JA. Magnetic Resonance Imaging: Theory and Practice. 3rd ed. NY: Springer; 2004.
23. Balter S. An introduction to the physics of magnetic resonance imagin, *Radiographics*, 1987; 7(2):371–383. doi.org/10.1148/radiographics.7.2.3448640
24. Brnjas-Kraljević J, Krilov D. Fizika za studente medicine, Zagreb: Medicinska Naklada; 2007.
25. Grover VPB, Tognarelli JM, Crossey MME, Cox IJ, Taylor-Robinson SD, McPhail MJW. Magnetic Resonance Imaging: Principles and Techniques: Lessons for Clinicians. *J Clin Exp Hepat* 2015; 5(3):246–255. doi:10.1016/j.jceh.2015.08.001