

Primjena zračenja u kemiji i medicini

Prugovečki, Jura

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:153837>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Jura Prugovečki
ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidat Jura Prugovečki

Predao je izrađen završni rad dana: 11. rujna 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Iva Movre Šapić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije

izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije

izv. prof. dr. sc. Marin Kovačić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 16. rujna 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Jura Prugovečki

PRIMJENA ZRAČENJA U KEMIJI I MEDICINI

ZAVRŠNI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Članovi ispitnog povjerenstva:

1. izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić
2. doc. dr. sc. Iva Movre Šapić
3. izv. prof. dr. sc. Ljerka Kratofil Krehula

Zagreb, rujan 2024.

Zahvale

Zahvaljujem se mentoru, izv. prof. dr. sc. Vladimiru Dananiću, na odabranoj temi i ukazanoj prilici za izradu završnog rada.

Zahvale Patriciji Klanac, univ. bacc. appl. chem. na pomoći, podršci i posvećenom vremenu tijekom izrade završnog rada.

Veliko hvala mojoj obitelji i prijateljima na podršci, motivaciji i ohrabrenju koja je bila ukazana tijekom studiranja.

SAŽETAK

Svrha ovog završnog rada je istražiti i objasniti ključne aspekte i primjene zračenja u poljima kemije i medicine, s posebnim fokusom na njegovu dvostruku ulogu kao neophodnog alata u znanstvenim i medicinskim istraživanjima te potencijalnih rizika za zdravlje i okoliš. Zračenje, iako je nevidljivo ljudskom oku, prisutno je u mnogim aspektima suvremenog života, od medicinske dijagnostike i terapije do kemijske analize i industrijskih procesa. U medicinskom kontekstu, zračenje se koristi za dijagnostiku bolesti putem tehnika poput rendgenskog snimanja, kao i u tretmanu određenih vrsta raka kroz radioterapiju. U kemiji, zračenje omogućuje detaljno proučavanje molekularnih struktura putem nuklearne magnetske rezonantne (NMR) spektroskopije i fluorescencije rendgenskim zrakama (XRF), što je ključno za razvoj novih materijala i lijekova.

Rad također naglašava važnost sigurnosnih mjera i regulative u radu s ionizirajućim zračenjem, kako bi se zaštitilo zdravlje ljudi i okoliš. Kroz analizu znanstvenih metoda i primjena, te razmatranje etičkih i sigurnosnih implikacija, rad predstavlja zračenje kao neizostavan, no bitan dio suvremene znanosti i tehnologije. Ovaj rad potvrđuje ključnu ulogu zračenja u napretku kemije i medicine te ističe potrebu za daljnjim istraživanjima kako bi se maksimizirale njegove koristi uz minimizaciju rizika. Daljnji napredak u tehnologiji i metodologiji mogao bi omogućiti još preciznije i sigurnije primjene zračenja u različitim znanstvenim i medicinskim disciplinama.

Ključne riječi: atom, zračenje, radioaktivnost, primjena zračenja u kemiji i medicini

SUMMARY

The purpose of this thesis is to explore and explain the key aspects and applications of radiation in the fields of chemistry and medicine, with a special focus on its dual role as an indispensable tool in scientific and medical research and potential health and environmental risks. Radiation, although invisible to the human eye, is present in many aspects of modern life, from medical diagnostics and therapy to chemical analysis and industrial processes. In a medical context, radiation is used for diagnosing diseases through techniques such as X-ray imaging, as well as in the treatment of certain types of cancer through radiotherapy. In chemistry, radiation enables the detailed study of molecular structures through nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy and X-ray fluorescence (XRF) analysis, which is crucial for the development of new materials and drugs.

This thesis also emphasizes the importance of safety measures and regulations in working with ionizing radiation, in order to protect human health and the environment. Through the analysis of scientific methods and applications, and consideration of ethical and safety implications, the thesis presents radiation as an indispensable, yet essential part of modern science and technology. This thesis confirms the key role of radiation in advancing chemistry and medicine and highlights the need for further research to maximize its benefits while minimizing risks. Further advancements in technology and methodology could enable even more precise and safer applications of radiation in various scientific and medical disciplines.

Key words: atom, radiation, radioactivity, application of radiation in chemistry and medicine

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆIDIO	2
2.1. Građa tvari.....	2
2.2. Modeli atoma i zračenja	6
2.3. Podjela zračenja.....	10
2.4. Neionizirajuće zračenje	11
2.5. Ionizirajuće zračenje.....	13
2.5.1. Oblici ionizirajućeg zračenja	13
2.5.2. Vrste ionizirajućeg zračenja.....	15
2.6. Nastajanje ionizirajućeg zračenja.....	17
2.7. Radioaktivnost.....	18
2.7.1. Načini radioaktivnog raspadanja.....	18
2.7.2. Zakon radioaktivnog raspadanja	19
2.8. Nuklearni procesi	20
2.8.1. Nuklearni raspadi	20
2.8.2. Nuklearne reakcije	20
2.9. Primjena zračenja u kemiji	21
2.9.1. Nuklearna magnetska rezonantna spektroskopija (NMR)	21
2.9.2. Sterilizacija medicinskog pribora.....	23
2.9.3. Flourescencija rendgenskim zrakama (XRF).....	23
2.10. Primjena zračenja u medicini	24
2.10.1. Rendgensko snimanje	24
2.10.2. Terapija zračenjem (radioterapija).....	25
2.10.3. Dozimetrija	26
3. ZAKLJUČAK.....	28
4. LITERATURA	29

1. UVOD

Zračenje predstavlja jednu od temeljnih pojava u našem materijalnom svijetu. Prema suvremenoj fizici, svemir je nastao Velikim praskom iz izuzetno guste materije prije otprilike 13,7 milijardi godina, čime su stvoreni prostor i vrijeme. U tom trenutku ogromna količina energije raspršila se novonastalim prostorom u obliku elementarnih čestica i fotonskih valova. Tako je zračenje bilo među prvim pojavama u svemiru. U početnim fazama nastali su jednostavni atomi, poput vodika i helija, dok elektromagnetsko zračenje tog praska i danas odjekuje svemirom. S vremenom su se, zgušnjavanjem materije u zvijezdama i njihovim eksplozijama, formirali ostali elementi koji čine naš svemir, a pritom su se pojavila i nova zračenja koja prožimaju svemir. Zračenje nas okružuje u svakom trenutku, djelujući na naš život na različite načine. Ljudska osjetila mogu percipirati samo mali dio spektra zračenja, poput svjetlosti i topline, dok ostale vrste zračenja ostaju nevidljive. Većina zračenja otkrivena je tijekom znanstvenih istraživanja u drugoj polovici 19. stoljeća, kada je čovjek naučio i umjetno proizvoditi različite vrste zračenja. Tako su otkrivene mnoge korisne, ali i neke štetne primjene prirodnog i umjetnog zračenja. Od samih početaka otkrića, ionizirajuće zračenje našlo je široku primjenu u medicini, posebice u dijagnostici i terapiji. U kemiji se zračenje koristi u tehnikama poput nuklearne magnetske rezonance za određivanje strukture molekula. Uz promišljenu upotrebu korisnih svojstava zračenja, ključno je zaštititi živa bića i okoliš od njegovih štetnih učinaka [1].

2. OPĆI DIO

Zračenje ili radijacija je prirodna pojava prijenosa energije kroz prostor elektromagnetskim valovima ili elementarnim česticama tvari. Od svih vrsta zračenja najčešće se govori o zračenju koje uzrokuje ionizaciju tvari – ionizirajuće zračenje. Zbog raznih primjena i učestalosti pojave, ionizirajuće zračenje se često naziva samo zračenje dok ostala zračenja često dobivaju specifična imena kao svjetlosno zračenje, toplinsko zračenje, infracrveno zračenje itd.

Kako bi se temeljne pojave zračenja i njegovog međudjelovanja mogle bolje razumjeti, potrebno je barem upoznati osnove građe tvari [2].

2.1. Građa tvari

Materijalni svijet opažamo u dva oblika. Jedan je tvar koja ga izgrađuje, a drugi je međudjelovanje tvari na daljinu tzv. fizikalna polja (gravitacijsko, elektromagnetsko, nuklearno) [2].

Zrnatost tvari

Danas je građa tvari prilično poznata, dok su kod fizikalnih polja poznate samo neke posebne pojave. Još nije ustanovljeno postojanje jedinstvenog polja niti njegove građe. Ljudi su od davnina pokušavali svrstati sve što nas okružuje i sve pojave te međudjelovanja u nekakav red. Još su antički mislioci sav materijalni svijet nastojali svesti na slogove nekih početnih, tzv. elementarnih tvari. Pretpostavili su da se neka tvar ne može usitniti do beskraja i da moraju postojati neke konačne najsitnije čestice. Njih su nazvali atomima. Tek su mnoge spoznaje fizike i kemije tijekom 19. st. znanstveno potvrdile zamisli o postojanju atoma te kasnije i o njihovoj građi [2].

Elementarne čestice

Od svih do danas poznatih elementarnih, odnosno subatomskih čestica, najvažniji su elektroni, protoni i neutroni koji grade atome. Suvremena fizika nalaže da ni to nisu konačne čestice, nego su to leptoni (elektroni i neke druge čestice) i hadroni (protoni i neutroni). S tim da su hadroni građeni od još sitnijih čestica, kvarkova. Međutim, pojave s kojima se najčešće bave znanstvenici mogu se dovoljno dobro opisati i pomoću elektrona, protona i neutrona.

Elektron je samostalna, trajna čestica vrlo male mase m_e , nositelj je elementarne količine negativnog elektriciteta ($e = -1,60217653 \times 10^{-19}$ C). Proton je samostalna, trajna čestica koja je nositelj elementarne količine pozitivnog elektriciteta mase m_p koja je oko 1836 puta veća od mase elektrona. Neutron je samostalna, u atomu trajna čestica, bez električnog naboja, mase m_n slične masi protona, ali ipak nešto veće od zbroja mase protona i elektrona, $m_n > m_p + m_e$. Osnovna svojstva elementarnih čestica prikazana su u **Tablici 1**.

Važno je naglasiti da se u mikrosvijetu mase, često izražavaju i ujednačenom atomskom jedinicom mase, vrijednosti $u = 1,66053886 \times 10^{-27}$ kg, određenom kao 1/12 mase atoma ugljika [2].

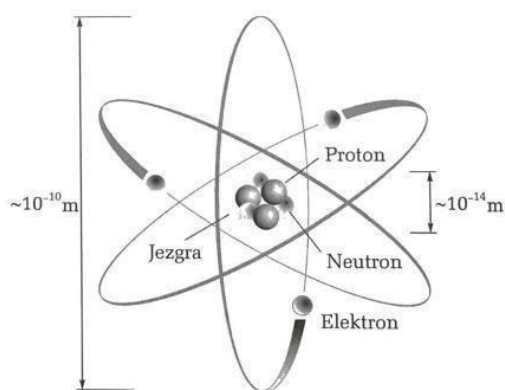
Tablica 1. Osnovna svojstva elementarnih čestica [2]

Čestica	Masa mirovanja / kg	Relativna masa / u	Električni naboj
Elektron	$9,1093826 \times 10^{-31}$	$5,4857990945 \times 10^{-4}$	- e
Proton	$1,67262171 \times 10^{-27}$	1,00727664688	+ e
Neutron	$1,67492728 \times 10^{-27}$	1,00866491560	0

Atomi

Atomi su osnovni dijelovi koji izgrađuju jednostavnu čistu tvar ili kemijski element. Atom čini njegova jezgra, izgrađena od protona i neutrona koji se nazivaju nukleonima, te omotač u kojem se nalaze elektroni.

Fizičari su krajem 19. st. i početkom 20. st. pokušali načiniti model atoma. Ernest Rutherford je 1911. godine predložio planetarni model atoma na osnovi sljedećih činjenica: atom izgrađuju protoni, neutroni i elektroni, gotovo sva masa se nalazi u središtu atoma, protoni i neutroni se ne mogu odvojiti od atoma jer ih zajedno drže nuklearne sile, dok se elektroni relativno lako odvajaju. Prema njemu su protoni i neutroni u jezgri, a elektroni kruže oko jezgre na velikoj udaljenosti (**Slika 1.**) [2].

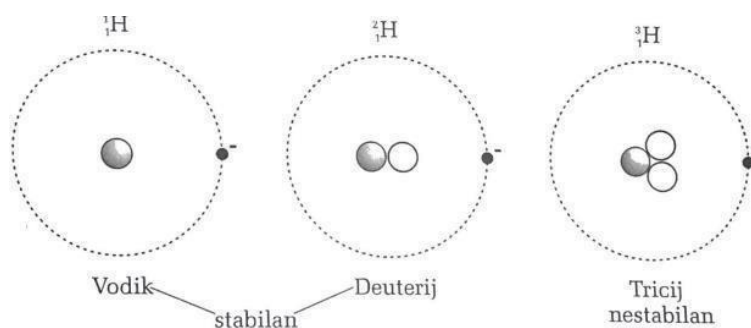


Slika 1. Planetarni model atoma [2]

U električno neutralnom atomu broj protona jednak je broju elektrona. Ovaj broj se naziva atomskim brojem (Z), a broj nukleona maseni, nukleonski ili barionski broj (A). Prema tome u jezgri je $A - Z$ neutrona. Atomi su veoma sitni, promjera oko 10^{-10} m, dok je jezgra još sitnija sa veličinom oko 10^{-14} m te sadržava gotovo svu masu atoma. S obzirom da elektron kruži oko jezgre na relativno velikoj udaljenosti te se atomi u tvarima gusto slažu, ispada da je svijet oko nas zapravo 99,99 % šupljina. Različitim kombinacijama elementarnih čestica dobivamo razne atome koji tvore mnoge molekule i mnoštvo različitih tvari oko nas s jedinstvenim svojstvima [2].

Nuklidi

Nuklidi su vrste atoma određene sastavom jezgre, atomskim brojem Z i masenim brojem A . Različiti nuklidi kojima je jedna od tih značajki jednaka imaju posebne nazive: izotopi su nuklidi koji imaju jednak broj protona ($Z = \text{konst.}$), a različit broj neutrona, izobari imaju jednak broj nukleona ($A = \text{konst.}$) te izotoni koji imaju jednak broj neutrona ($A - Z = \text{konst.}$) i različit broj protona. Nuklidi tokom vremena mogu biti stabilni ili nestabilni. Nestabilni se nazivaju radionuklidima jer pri raspadanju zrače. U prirodi postoji oko 280 stabilnih i 60 nestabilnih nuklida te je u zadnjih nekoliko desetljeća stvoreno više od 2000 nestabilnih nuklida. Kao jedan od primjera nuklida može se uzeti vodik sa svoja tri izotopa: vodik ili procij (${}^1_1\text{H}$), teški vodik ili deuterij (${}^2_1\text{H}$) i tricij (${}^3_1\text{H}$) (**Slika 2.**) [2].



Slika 2. Slikoviti prikaz građe triju izotopa vodika [2]

Kemijski elementi

Kemijski element je jednostavna tvar izgrađena od atoma s jednakim atomskim brojem Z . U prirodi se kemijski elementi pojavljuju s različitim obilnostima izotopa. Prirodnih kemijskih elemenata ima 88, od vodika ($Z = 1$) do uranija ($Z = 92$). U prirodi nisu pronađena u većim količinama 4 elementa iz ovog niza, tehnećij ($Z = 43$), prometij ($Z = 61$), astat ($Z = 85$) i francij ($Z = 87$). Prirodni kemijski elementi mogu se svrstati u dvije osnovne skupine: a) imaju barem po jedan stabilan izotop (od vodika do bizmuta ($Z = 83$)) i b) nemaju niti jedan stabilan izotop (od polonija ($Z = 84$) do uranija ($Z = 92$)). Jedina iznimka je bizmutov izotop ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ koji se tako sporo raspada da ga se može smatrati gotovo stabilnim.

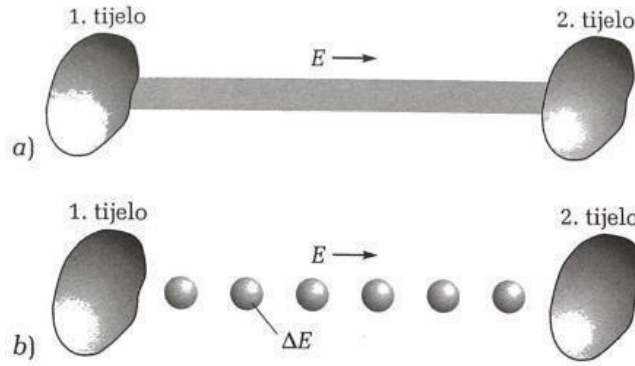
S vremenom su stvoreni i atomi s atomskim brojem većim od 92, tzv. transuranijski elementi kojih u prirodi nema, makar neka istraživanja pokazuju kako u prirodi ima plutonija ($Z = 94$). Stvoreni su elementi sve do $Z = 116$, ali su međunarodno priznati do $Z = 111$. Svi ovi elementi su nestabilni i svrstavaju se u Mendeljevljev periodni sustav elemenata [2].

2.2. Modeli atoma i zračenja

Do kraja 19. stoljeća, niz prirodnih pojava nije se mogao objasniti klasičnom fizikom. Zakoni koji su vrijedili za tadašnji svakodnevni svijet nisu se mogli primijeniti na mikrosvijet atoma. Nekoliko ključnih pojava koje su bile važne za razumijevanje tvari i zračenja zahtijevale su nove pojmove, često suprotne svakodnevnom iskustvu. U istraživanju materijalnog svijeta nailazi se na pojave koje se ne mogu objasniti poznatim zakonitostima. One uključuju masu tijela, temperaturu, djelovanje na daljinu (gravitacija, električne sile) i širenje elektromagnetskih valova u slobodnom prostoru. Toplinsko zračenje apsolutno crnog tijela bila je prva pojava koju klasična fizika nije mogla objasniti. Eksperimentalne činjenice o zračenju takvog tijela nisu se mogle uklopiti u postojeće teorije. Mnogi fizičari su krajem 19. stoljeća bezuspješno pokušavali riješiti taj problem [2].

Hipoteza kvanta zračenja

Godine 1900., teoretski fizičar Max Planck predložio je matematički izraz za raspodjelu energije oplinskog zračenja po valnim duljinama. Utvrdio je da se energija prenosi u malim, konačnim "paketićima" energije, koje je nazvao kvantima (**Slika 3.**). Ova ideja bila je u suprotnosti s dotadašnjim shvaćanjem kontinuiranog prijenosa energije, ali se pokazala točnom u skladu s eksperimentalnim rezultatima. Tako je ukupna prenesena energija E zbroj energija svih kvanta ΔE koji sudjeluju u prijenosu [2].



Slika 3. Model prijenosa energije, a) neprekinutim tijekom, b) kvantima energije [2]

Energija koju prenosi pojedini kvant proporcionalna je frekvenciji f zračenja, što znači da je E a f . Planck je otkrio da je koeficijent proporcionalnosti jednak za sva zračenja, te se može izraziti kao:

$$E = hf$$

Taj koeficijent, poznat kao Planckova konstanta, vrijedi za cijeli materijalni svijet i iznosi

$$h = 6,6260693 \times 10^{-34} \text{ J s.}$$

Planckova konstanta predstavlja mjerilo za mikrosvijet. Kada se može zanemariti, prestaju vrijediti zakoni mikrosvijeta i primjenjuju se zakoni makroskopskog svijeta. Često se koristi i modificirana verzija Planckove konstante podijeljena s 2π , označena kao "h precrtano" (\hbar), čija je vrijednost

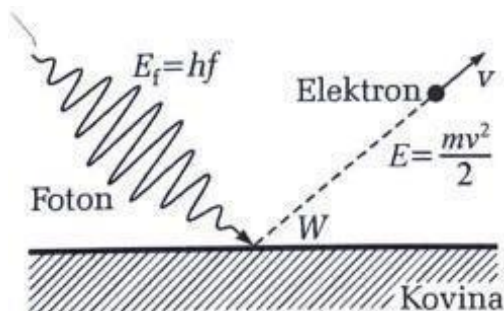
$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05457168 \times 10^{-34} \text{ J s.}$$

Hipoteza kvanta ima duboko značenje jer sugerira da je energija u mikrosvijetu diskretna, slično kao što su diskretni elektricitet i tvar. Kvantiziranost je univerzalna pojava u mikrosvijetu.

Ako se energija prenosi u kvantima, povećanje broja kvanta u interakciji s tvari neće povećati učinak, već će se samo povećati broj pojava. Fotoučinak (fotoefekt) je pojava koju klasična fizika nije mogla objasniti. Opažena je kada se površina metala ozrači svjetlom ili ultraljubičastim zračenjem, pri čemu se izbijaju elektroni. Elektroni se izbijaju tek pri određenoj frekvenciji svjetlosti. Eksperimenti su pokazali da povećanje intenziteta svjetla povećava broj izbijenih

elektrona, ali ne i njihovu energiju. Samo povećanjem frekvencije, elektroni dobivaju veću izlaznu energiju.

Albert Einstein je 1905. godine koristio Planckovu hipotezu kvanta za objašnjenje fotoučinaka. Ako se energija prenosi u kvantima, tada svaki kvant svjetlosti, koji je Einstein nazvao fotonom, može izbaciti jedan elektron iz metala pod uvjetom da je energija fotona veća od energije vezanja elektrona (**Slika 4.**) [2].



Slika 4. Shematski prikaz fotoefekta [2]

Energija upadnog fotona E_f raspoređuje se na rad W za izdvajanje elektrona iz kovine, a ostatak se predaje elektronu u obliku kinetičke energije

$$E_f = W + E_{kin}$$

ili detaljnije

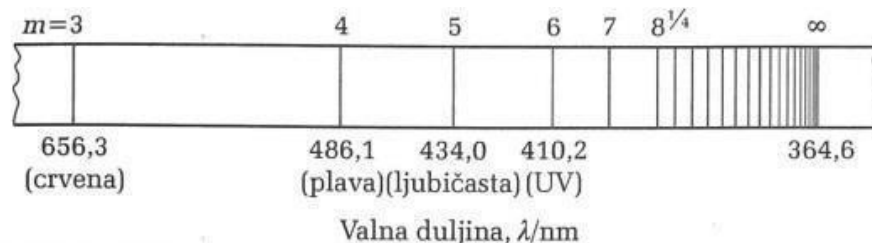
$$hf = W + \frac{mv^2}{2}$$

gdje je f frekvencija svjetlosti, m masa, a v brzina izbačenog elektrona.

Fotoučink nastaje ako je $hf \geq W$, a povećanjem frekvencije povećava se brzina izbačenih elektrona, što je bilo u skladu s pokusima. Einstein je detaljno objasnio pojavu fotoefekta, pokazujući da se hipoteza kvanta može primijeniti za tumačenje mikrosvjetskih pojava. Pojam foton, koji se koristi za kvant svjetlosti, proširio se i na druge vrste elektromagnetskog zračenja.

Optički spektar i rendgenski spektar predstavljaju treći izazov za klasičnu fiziku. Vrući plinovi emitiraju svjetlost na specifičnim valnim duljinama, stvarajući spektralne linije. Spektralne linije su jasno definirane i ponavljaju se s velikom preciznošću, što omogućuje identifikaciju elemenata

u različitim tvarima. Promatranjem svjetlosti koja prolazi kroz plin, vidljive su crne linije na spektru koje označavaju apsorpciju određenih valnih duljina. Ovaj fenomen, poznat kao spektralna analiza, omogućio je otkriće helija na Suncu prije nego što je pronađen na Zemlji. Unatoč preciznosti u određivanju spektralnih linija, nije pronađena očita pravilnost u njihovom rasporedu. Jedino je zapaženo grupiranje linija na kraćim valnim duljinama, što ukazuje na određene razine energije unutar atoma (**Slika 5.**) [2].



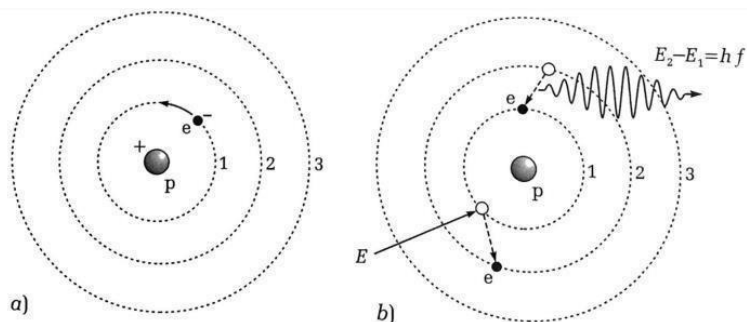
Slika 5. Spektar vodikovih linija [2]

Bohrov model atoma vodika

Jedna od glavnih poteškoća planetarnog modela atoma je ta što bi elektroni, kružeći oko jezgre, prema zakonima elektromagnetizma stvarali magnetsko polje i gubili energiju, što bi dovelo do njihovog pada u jezgru. Međutim, atomi su stabilni i čine svemir milijardama godina, što klasična fizika nije mogla objasniti. Godine 1913. fizičar Niels Bohr primijenio je kvantnu hipotezu na najjednostavniji atom, vodik (^1H), koji se sastoji od jednog protona u jezgri i jednog elektrona u omotaču. Bohr je pretpostavio da elektroni kruže po određenim stazama i ne gube energiju dok su na tim stazama, te se mogu premjestiti samo na druge određene staze. Time je uveo dvije ključne zakonitosti, poznate kao Bohrovi postulati:

- 1) Atomi mogu postojati samo u određenim kvantnim stanjima, pri čemu svako stanje ima specifičnu energiju. Elektroni kruže po određenim stazama bez gubitka energije.
- 2) Atom se nalazi u kvantnom stanju najniže energije (stabilno stanje) sve dok ne apsorbira energiju izvana. Ako atom primi dovoljno energije, elektron prelazi u stanje više energije, a zatim se brzo vraća u niže stanje emitirajući višak energije kao foton.

Ovaj model objašnjava stabilnost atoma i prijelaze između energetskih stanja, što je bio značajan napredak u razumijevanju atomske strukture (**Slika 6.**). Bohrov modela atoma ima nedostataka za tumačenje građe složenijih atoma, ali se i dalje koristi za jednostavno tumačenje mnogih pojava poput zračenja [2].



Slika 6. Bohrov model atoma vodika, a) shematski prikaz, b) pobuđivanje vanjskom energijom i odašiljanje fotona vraćanjem u stabilno stanje [2]

2.3. Podjela zračenja

Zračenje se može podijeliti u dvije glavne kategorije: neionizirajuće zračenje i ionizirajuće zračenje.

Pojam neionizirajućeg zračenja odnosi se na sve vrste elektromagnetskog zračenja koje ne nose dovoljno energije po kvantu da ioniziraju atome ili molekule apsorbira. Zračenje blisko ultraljubičastom, vidljiva svjetlost, infracrveni fotoni, mikrovalovi i radiovalovi primjeri su neionizirajućeg zračenja [3].

Ionizirajuće zračenje može ionizirati tvar izravno ili neizravno jer njegova kvantna energija premašuje ionizacijski potencijal atoma i molekula apsorbira. Ionizirajuće zračenje ima mnoge praktične primjene u industriji, poljoprivredi i medicini, ali također predstavlja zdravstveni rizik kada se koristi bezobzirno ili nepravilno. Medicinska fizika uglavnom, ali ne isključivo, temelji se na proučavanju i upotrebi ionizirajućeg zračenja u medicini. Zdravstvena fizika bavi se zdravstvenim rizicima koje postavlja ionizirajuće zračenje te sigurnosnim pitanjima vezanim uz upotrebu ionizirajućeg zračenja [3].

2.4. Neionizirajuće zračenje

Neionizirajuće zračenje obuhvaća elektromagnetsko zračenje koje nije dovoljno energično da ionizira atome ili molekule, odnosno ne može potpuno ukloniti elektron iz atoma ili molekule. Ovo zračenje uzrokuje samo pobudu, tj. premještanje elektrona u višu energetska razinu. Ne smatra se značajnim zdravstvenim rizikom za razliku od ionizirajućeg zračenja koje ima višu frekvenciju i kraću valnu duljinu, te može uzrokovati opekline, bolesti od zračenja, razne vrste raka i genetska oštećenja. Uobičajeno, za granicu između neionizirajućeg i ionizirajućeg zračenja smatra se 10 ili 33 elektronvolta (eV), gdje 33 eV predstavlja energiju potrebnu za ionizaciju molekula vode. Druga granica od 10 eV govori da svo zračenje koje je niže energije od 10 eV je neionizirajuće zračenje. Dok neionizirajuće zračenje uglavnom proizvodi termalne efekte, zanimanje za njegove potencijalne netoplinske učinke na živa tkiva je poraslo, posebice s obzirom na sveprisutnost izvora kao što su mobilni telefoni. Istraživanja su pokazala da postoji mogućnost bioloških učinaka na netermalnim razinama izlaganja, ali znanstveni dokazi o zdravstvenim rizicima još uvijek nisu jednoznačni. Znanstvena zajednica priznaje potrebu za daljnjim istraživanjima kako bi se bolje razumjeli potencijalni učinci i definirale sigurnosne smjernice [4, 5, 6, 7, 8].

Ultraljubičasto zračenje

Ultraljubičasto (UV) zračenje obuhvaća valne duljine od 10 do 400 nm, između vidljive svjetlosti i rendgenskih zraka. Sunčeva svjetlost je primarni izvor UV zračenja, čineći oko 10 % ukupne elektromagnetske emisije Sunca, a proizvodi se i umjetnim putem kroz električne lukove i specijalizirane svjetiljke. UV fotoni imaju više energije od vidljive svjetlosti, od 3,1 do 12 elektronvolta, što je dovoljno za pokretanje kemijskih reakcija i fluorescencije, iako dugovalni UV nije ionizirajuće zračenje. Kratkovalni UV, s druge strane, je ionizirajući i može oštetiti DNA. Izloženost UV zračenju može uzrokovati opekline od sunca i povećati rizik od kožnog raka. Bez atmosferskog filtriranja, UV zračenje bi onemogućilo život na kopnu [9].

Vidljiva svjetlost

Svjetlost, ili vidljiva svjetlost, je vrlo uski raspon elektromagnetskog zračenja vidljiv ljudskom oku (oko 400–700 nm). Detaljnije, fizičari svjetlost definiraju kao elektromagnetsko zračenje svih valnih duljina, bilo vidljivo ili ne. Visokoenergetska vidljiva svjetlost je plavo-ljubičasta svjetlost s većim potencijalom za oštećenje [8].

Infracrveno zračenje

Infracrvena (IR) svjetlost je elektromagnetsko zračenje s valnom duljinom između 0,7 i 300 mikrometara, što odgovara frekvencijskom rasponu od približno 1 do 430 THz. Valne duljine IR zračenja su duže od vidljive svjetlosti, ali kraće od mikrovalova terahercijskog zračenja. Jako sunčevo svjetlo na morskoj razini pruža ozračenje od nešto više od 1 kilovata po kvadratnom metru [8].

Mikrovalovi

Mikrovalovi su elektromagnetski valovi s valnim duljinama od 1 m do 1 mm, odnosno s frekvencijama između 0,3 GHz i 300 GHz. Primjene mikrovalova uključuju mobilne telefone, radare, skenere na aerodromima, mikrovalne pećnice, satelite za daljinsko zemaljsko promatranje te radio i satelitske komunikacije [8].

Radiovalovi

Radiovalovi su vrsta elektromagnetskog zračenja s valnim duljinama dužima od infracrvene svjetlosti. Kao i svi drugi elektromagnetski valovi, putuju brzinom svjetlosti. Prirodno nastale radiovalove proizvode munje ili astronomski objekti. Umjetno generirani radiovalovi koriste se za komunikaciju, emitiranje, radare i navigacijske sustave, satelitsku komunikaciju, računalne mreže i brojne druge primjene. Različite frekvencije radiovalova imaju različita svojstva širenja u Zemljinj atmosferi, ovisno o njihovoj duljini vala [10].

Termalna radijacija

Toplinsko zračenje, poznato i kao infracrveno zračenje na temperaturama koje su uobičajene na Zemlji, je proces emitiranja toplinske energije objekta u obliku elektromagnetskih valova. Ovo zračenje uključuje IR zračenje koje emitiraju kućni grijači, pećnice te svjetlo koje emitiraju žarulje s žarnom niti. Toplinsko zračenje se generira kada se energija pokreta nabijenih čestica unutar molekula pretvori u elektromagnetske valove [11].

Zračenje crnog tijela

Zračenje crnog tijela odnosi se na zračenje idealiziranog izvora koji na bilo kojoj temperaturi emitira maksimalnu moguću količinu zračenja na bilo kojoj valnoj duljini. Crno tijelo također apsorbira maksimalnu moguću količinu upadnog zračenja na bilo kojoj valnoj duljini. Emitirano zračenje pokriva cijeli elektromagnetski spektar, a intenzitet na određenoj frekvenciji određen je Planckovim zakonom zračenja. Teoretski, crno tijelo emitira elektromagnetsko zračenje preko cijelog spektra, od vrlo niskih radiofrekvencija do X-zraka [12].

2.5. Ionizirajuće zračenje

Izvori ionizirajućeg zračenja i razvoj tehnologija koji je proizašao iz istraživanja plinova u staklenim cijevima obilježili su 19. stoljeće. Znanstvenici poput Geisslera i Plückerera otkrili su kako električna struja kroz plin proizvodi svjetlucaje, a kasniji eksperimenti su doveli do otkrića katodnih zraka i njihovih svojstava. Ovo razdoblje je također vidjelo razvoj rendgenskih zraka od strane Röntgena, čime je otvoren put za napredak u medicinskoj dijagnostici i nuklearnoj fizici. Henri Becquerel, Marie i Pierre Curie te drugi istraživači proširili su granice znanja o radioaktivnosti, što je dovelo do otkrića polonija, radija i neutrona. Razvoj čestičnih ubrzivača poput ciklotrona i betatrona omogućio je daljnje istraživanje atoma, a sve to je kulminiralo u upotrebi nuklearne energije tijekom i nakon Drugog svjetskog rata, uz važne implikacije za energetska industriju i medicinu [13].

2.5.1. Oblici ionizirajućeg zračenja

Ionizirajuće zračenje, ključno za promjene na atomskoj razini, rezultira izmjenom energijskog stanja i kemijskog sastava materije. U procesu interakcije, zračenje prenosi ili oslobađa energiju, mijenjajući tako svojstva i stanja materije. To može imati korisne ili štetne posljedice za okoliš i ljudsko zdravlje. Primjeri ionizirajućeg zračenja uključuju fotone i subatomske čestice kao što su elektroni ili jezgre helija. Razlikuje se elektromagnetsko i čestično ionizirajuće zračenje, a način na koji se zračenje očituje ovisi o njegovoj prirodi i sastavnicama [13].

Elektromagnetsko zračenje

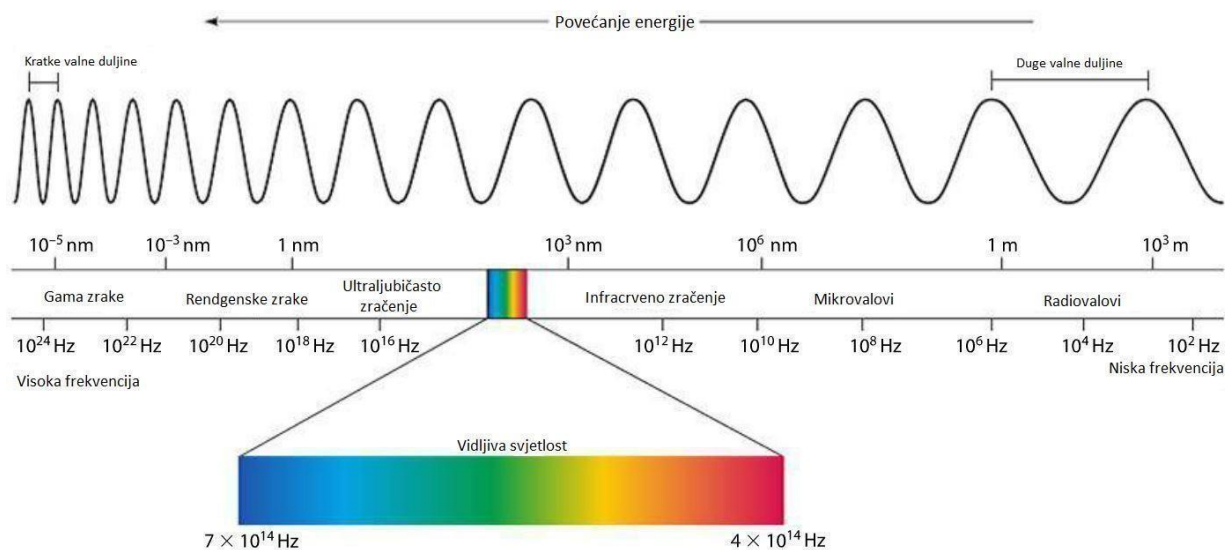
Elektromagnetsko zračenje obuhvaća brze fotone, uključujući rendgenske i gamma zrake, koje su sposobne za ionizaciju materijala. Gamma zračenje karakteriziraju vrlo kratke valne duljine, a naziv se odnosi na njegovo podrijetlo. Zračenje se generira kada elektron prelazi iz viših u niže energetske razine unutar atoma ili tijekom nuklearnih procesa. Prijelaz može biti spontan, rezultirajući spontanom oslobađanjem fotona, ili induciran, gdje se emitiraju dva identična fotona. Elektromagnetsko zračenje karakteriziraju frekvencija, valna duljina i energija fotona. Brzina širenja je konstantna i jednaka brzini svjetlosti. Energija fotona E veže se uz frekvenciju f preko Planckove relacije:

$$E = hf$$

gdje je h Planckova konstanta. Valna duljina λ izračunava se kao:

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

gdje c označava brzinu svjetlosti [13].



Slika 7. Spektar elektromagnetskog zračenja [14]

Čestično zračenje

Čestično zračenje uključuje subatomske čestice poput alfa i beta čestica, te protona i neutrona, koje nastaju raspadom atomske jezgre ili ubrzavanjem u elektromagnetskom polju. Osnovne značajke čestičnog zračenja uključuju brzinu, masu, električni naboj i energiju čestica. Čestice se mogu kretati blizu brzine svjetlosti, ali uvijek nešto sporije [13].

2.5.2. Vrste ionizirajućeg zračenja

Pojedine vrste ionizirajućeg zračenja nazivaju se posebnim imenima koja su povijesno i neustavno nastajala [13].

Rendgensko zračenje

Rendgensko zračenje ili X-zrake proizvode se kada brzi elektroni udare u metu unutar rendgenske cijevi, rezultirajući emisijom zračenja koje uključuje kako kontinuirani tako i karakteristični spektar. Kontinuirani spektar nastaje kada elektroni usporavaju unutar mete, pri čemu se njihova kinetička energija oslobađa kao fotoni. Ova komponenta spektra karakterizirana je fotonskim energijama koje mogu dostići maksimalne vrijednosti određene primijenjenim naponom ubrzanja. S druge strane, karakteristično zračenje rezultat je internih elektronskih tranzicija unutar atoma mete. Kada se elektron izbacila iz niže energetske razine, elektron s višeg energetskog nivoa popunjava nastalu prazninu, emitirajući foton čija energija odgovara razlici između dvije energetske razine [13].

Gama-zračenje

Gama zračenje predstavlja vrstu elektromagnetskog zračenja s izuzetno kratkim valnim duljinama što ga svrstava u područje najenergičnijeg ionizirajućeg zračenja. Gama fotoni su poznati po svojoj iznimno visokoj energiji, često premašujući nekoliko desetaka MeV. Nastaju kroz razne nuklearne i subatomarne procese, uključujući nestabilne atomske prijelaze, anihilaciju čestica i usporavanje brzih čestica. Također, zvijezde i nuklearni procesi u svemiru su značajni izvori gama fotona, koji zatim putuju kroz svemir noseći velike količine energije [13].

Alfa-zračenje

Alfa zračenje sastoji se od alfa čestica, koje su zapravo helijeve jezgre s dva protona i dva neutrona, te stoga imaju dvostruki pozitivni naboj. Ove čestice se oslobađaju iz nestabilnih atomskih jezgara tijekom alfa raspada. Alfa čestice su poznate po svojim visokim energijama, koje mogu doseći nekoliko MeV. Najčešće se javljaju prirodno kao dio kozmičkog zračenja, dok se u laboratorijskim uvjetima mogu proizvesti korištenjem čestičnih ubrzivača. S obzirom na to da su relativno velike i teške, alfa čestice su visoko ionizirajuće, ali imaju ograničen domet od nekoliko centimetara u zraku [13].

Beta-zračenje

Beta zračenje se sastoji od beta čestica, koje su ustvari elektroni ili pozitroni oslobođeni iz nestabilnih atomskih jezgara tijekom beta raspada. Ove čestice se kreću s brzinama koje sežu od 30 % do 90 % brzine svjetlosti. Beta zračenje karakterizira kontinuirani energetska spektar koji se proteže od niskih do vrlo visokih energija, omogućavajući česticama da dosegnu energije dovoljne za sekundarnu ionizaciju materijala. Beta zračenje može se također proizvesti indukcijski u čestičnim ubrzivačima, gdje su energije čestica slične onima prirodnog beta zračenja, što se koristi u uređajima poznatim kao betatroni [13].

Elektronsko zračenje

Elektronsko zračenje obuhvaća emisiju elektrona iz atomskog omotača ili njihovo ubrzavanje u čestičnim ubrzivačima. Ova vrsta zračenja usporediva je s beta zračenjem zbog svojih karakteristika i načina nastanka. Specifičan oblik ovog zračenja su konverzijski elektroni koji nastaju kada pobuđena atomska jezgra predaje energiju elektronu [13].

Neutronska zračenje

Neutronska radijacija sastoji se od brzih neutrona koji su primarni sastavni dijelovi atomske jezgre. Prirodno su nestabilni i mogu se raspasti na proton, elektron, i antineutrino. Neutroni su otporni na djelovanje električnih i magnetskih polja zbog svoje neutralnosti, ali snažna magnetska polja mogu utjecati na njih zbog dipolnih momenata. Bez interakcije s elektronima, neutroni mogu lako prodrijeti unutar atomskih jezgara, gdje tek tada podliježu nuklearnim silama. Neutronska

radijacija je česta u nuklearnim procesima i pri cijepanju teških jezgara u nuklearnim reaktorima, gdje je ključna za lančane reakcije. Energija neutrona varira, krećući se obično od 10 MeV pa naniže. Neutroni niske energije, poznati kao termički neutroni, igraju ključnu ulogu u nuklearnoj fisiji zahvaljujući svojoj sposobnosti da iniciraju i održavaju nuklearne lančane reakcije [13].

Ostala čestična zračenja

Čestično zračenje kategorizirano je prema vrsti čestica koje ga čine, uključujući protonska, deuteronska, tritonska i zračenja teških iona. Ove vrste zračenja proizlaze iz prirodnih nuklearnih procesa kao što su kozmička zračenja, ali i iz umjetno induciranih uvjeta u nuklearnim reaktorima i tijekom nuklearnih eksplozija. Karakteristike tih zračenja usporedive su s karakteristikama nekih drugih opisanih čestičnih zračenja, kao što su alfa ili beta zračenje [13].

2.6. Nastajanje ionizirajućeg zračenja

Ionizirajuće zračenje nastaje tijekom nuklearnih procesa kao što su raspadanje atomskih jezgara, elektronski prijelazi, i akceleracija naelektriziranih čestica. Ovi procesi mogu biti prirodnog ili umjetnog porijekla, ovisno o specifičnom izvoru zračenja. Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja uključuju radioaktivne elemente i kozmičko zračenje koje dolazi iz svemira. Ovo zračenje potom generira sekundarno zračenje kad dolazi u kontakt s materijom u Zemljinoj atmosferi. Prirodni izvori zrače autonomno, vođeni zakonima radioaktivnog raspada ili nuklearnih reakcija. Umjetni izvori uključuju radioaktivne materijale korištene u medicinskim i industrijskim aplikacijama, nuklearne reaktore i ubrzivače čestica. Ovi izvori omogućuju kontrolirano korištenje zračenja, na primjer, u medicinskim uređajima za slikovnu dijagnostiku ili u terapijske svrhe [13].

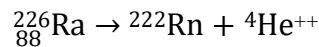
Za praktične primjene, izvori zračenja se klasificiraju kao stalni ili povremeni. Stalni izvori, poput radioaktivnih materijala, kontinuirano emitiraju zračenje, dok povremeni izvori, poput rendgenskih aparata, emitiraju zračenje samo kad su aktivirani [13].

2.7. Radioaktivnost

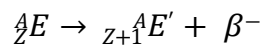
Radioaktivnost obuhvaća emisiju ionizirajućeg zračenja od strane nestabilnih atomskih jezgara. Razlikuju se prirodna radioaktivnost iz prirodnih izotopa i umjetna radioaktivnost iz izotopa proizvedenih u nuklearnim reaktorima ili znanstvenim eksperimentima. Termin "radioaktivnost" također opisuje karakteristike materijala koji emitira zračenje, kao što su radioaktivni uzorci ili otpad. Radioaktivni procesi uključuju raspadanje atomskih jezgara s emisijom čestica (alfa, beta) i gama zračenja, koje često dovodi do transformacije u stabilnije izotope [13].

2.7.1. Načini radioaktivnog raspadanja

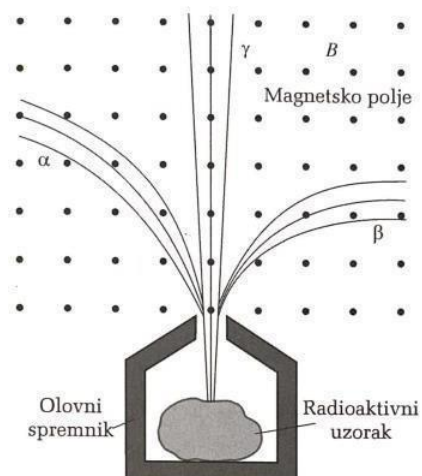
Radioaktivni raspad uključuje emisiju čestica iz nestabilnih atomskih jezgara, uključujući alfa i beta čestice, kao i gama zračenje. Raspad može rezultirati stvaranjem novih nuklida s manjim atomskim ili masenim brojem. Alfa raspad uključuje emisiju alfa čestica, koje su helijeve jezgre s dva protona i dva neutrona manje od originalnog nuklida. Primjerice, raspad radija $^{226}_{88}\text{Ra}$ u radon $^{222}_{86}\text{Rn}$ prati oslobađanje alfa čestice. Ovaj proces se može izraziti reakcijom [13]:



Beta raspad podrazumijeva promjenu u atomskom broju bez promjene masenog broja, gdje neutron unutar jezgra postaje proton, oslobađajući elektron (beta minus) ili pozitron (beta plus). Primjer je transformacija [13]:



Ovi raspadni procesi mogu dovesti do promjena u periodnom sustavu elemenata, gdje nuklidi postaju novi elementi ili izotopi, što se naziva radioaktivni pomak. Ovi procesi su ključni za razumijevanje kako elementi evoluiraju i raspadaju se u prirodi i umjetnim uvjetima [13].



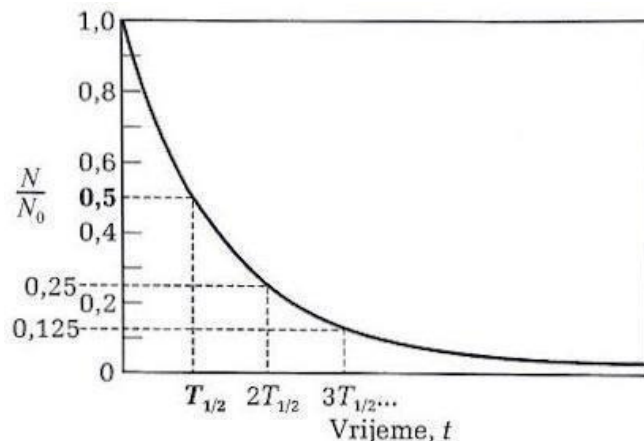
Slika 8. Iz uskog otvora olovnog spremnika, u kojem se nalazi grumen radioaktivne tvari, izlazi mlaz ionizirajućeg zračenja, koji se u magnetskom polju rastavlja na tri dijela: α -zračenje, β -zračenje i γ -zračenje [13]

2.7.2. Zakon radioaktivnog raspada

Radioaktivni raspad je stohastički proces koji nije predvidljiv na pojedinačnoj razini, već na razini velikih skupina nestabilnih nuklida. Proces raspada nije ovisan o fizikalnim ili kemijskim utjecajima, poput temperature ili magnetskih polja. Broj neraspadnutih nuklida, N , s vremenom eksponencijalno opada prema jednadžbi:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

gdje je N_0 početni broj nestabilnih nuklida, λ konstanta raspada (izražena u recipročnim sekundama), a t vrijeme. Nakon jednog poluraspada preostaje polovica nuklida, nakon dva poluraspada četvrtina, a nakon tri poluraspada osmina početnog broja. Takav deterministički opis omogućava precizno predviđanje preostalog broja nuklida u uzorku na temelju poznatih vremena poluraspada [13].



Slika 9. Grafički prikaz poluraspada nekog elementa [13]

2.8. Nuklearni procesi

Nuklearni procesi promjene su stanja ili sastava atomske jezgre, a većinom su popraćeni odašiljanjem različitih vrsta ionizirajućeg zračenja. Odvijaju se na dva načina: nuklearnim raspadima ili nuklearnim reakcijama [13].

2.8.1. Nuklearni raspad

Nuklearni raspad karakterizira prirodni proces pri kojem atomska jezgra prelazi iz višeg energijskog stanja u niže, uz izbacivanje različitih čestica. Ovaj proces uključuje emisiju beta-čestica (elektrona), protona te alfa-čestica, koje su u suštini jezgre helija. U prirodnim uvjetima, spontana nuklearna fisija, tj. raspadanje jezgre na dva manja dijela, izuzetno je rijetka [13].

2.8.2. Nuklearne reakcije

Nuklearne reakcije su procesi gdje se atomska jezgra bombardira s česticama poput neutrona koji su često nestabilni i mogu se raspasti tijekom ili nakon sudara. Ove reakcije stvaraju novu, izmijenjenu jezgru i ponekad oslobađaju jednu ili više čestica. Te reakcije mogu biti egzoenergetske, gdje se oslobađa energija, ili endoenergetske, gdje je potrebno uložiti energiju. Dvije glavne vrste nuklearnih reakcija su fisija, gdje jezgra se raspada na manje dijelove, i fuzija, gdje se manje jezgre spajaju stvarajući veću jezgru. Nuklearna fisija je proces cijepanja jezgre na dva manja dijela uz oslobađanje neutrona i gama zračenja. Neutroni koji se oslobode mogu izazvati

daljnje fizijske reakcije, stvarajući lančanu reakciju. Nuklearna fuzija je spajanje lakih jezgri poput vodikovih izotopa deuterija i tricija, što dovodi do oslobađanja značajne količine energije i nastanka težih elemenata kao što je helij. Fuzijske reakcije se odvijaju na ekstremno visokim temperaturama i glavni su izvor energije u zvijezdama [13].

2.9. Primjena zračenja u kemiji

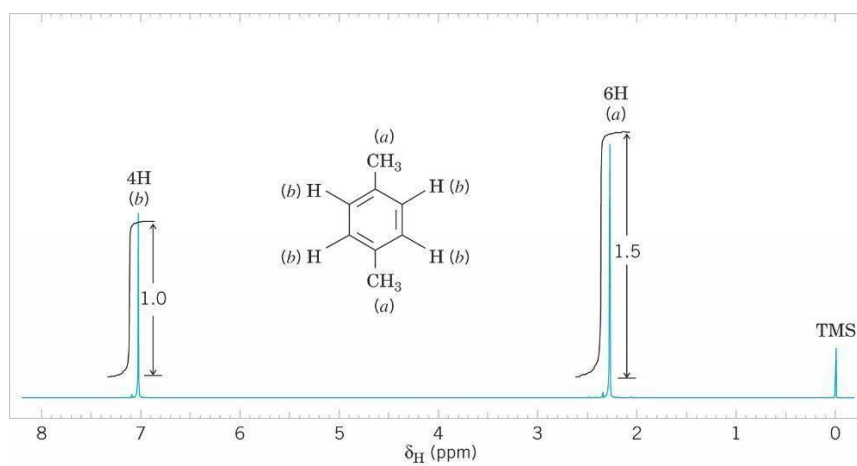
Od otkrića zračenja pa sve do danas, njegova upotreba je zastupljena u raznim granama medicine, kemije i industrije (poljoprivreda, rudarstvo, arheologija itd.). Primjena zračenja se može naći u području radiokemije, analitičke kemije, nuklearne magnetske rezonance (NMR), polimerizacijskih procesa, sterilizacije i dr. [15].

2.9.1. Nuklearna magnetska rezonantna spektroskopija (NMR)

NMR analiza predstavlja sofisticiranu metodu zasnovanu na magnetskim svojstvima atomskih jezgara koja se koristi za razjašnjavanje strukture i dinamike molekula. Kada se određena jezgra, s magnetskim momentom različitim od nule (npr. ^1H i ^{13}C) stavi u snažno magnetsko polje, ona rezonira na karakterističnim frekvencijama. Te frekvencije su unutar radiofrekvencijskog raspona elektromagnetskog spektra i vrlo su indikativne za molekularno okruženje koje okružuje jezgru (**Slika 11.**). Jezgre koje rotiraju i imaju kvantni broj spina jezgre različit od nule, ponašaju se kao mali magneti, tj. magnetni dipoli. Osnovno djelovanje NMR-a uključuje usklađivanje magnetskih momenata atomskih jezgara s vanjskim magnetskim poljem. Nakon usklađivanja, jezgre precesiraju oko smjera magnetskog polja. NMR-om se može pratiti nuklearna apsorpcija (potrebna veća količina uzorka) ili nuklearna indukcija (potrebna manja količina uzorka). Do apsorpcije dolazi kada se oscilirajuća električna komponenta ulaznog zračenja izjednači s frekvencijom električnog polja generiranog vrtnjom jezgre te je tu riječ o rezonanciji – jezgra rezonira sa dolazećim elektromagnetskim valom. Ovom metodom se mogu odrediti brojni organski spojevi te se vrlo često koristi u području kemijskih analiza [16, 17].



Slika 10. Prikaz spektrometra Bruker 300 MHz [17]



Slika 11. Primjer prikaza NMR spektra za spoj p-ksilen [17]

2.9.2. Sterilizacija medicinskog pribora

Sterilizacija, definirana kao potpuno uništenje ili uklanjanje svih oblika kontaminirajućih mikroorganizama, značajno se razvila, osobito uvođenjem sterilizacije zračenjem sredinom 20.st. Pojava ionizirajućeg zračenja, poznatog po sposobnosti uništavanja bakterija, ponudila je pouzdanije rješenje te sterilizacija zračenjem postaje sve više i više ključan proces u suvremenoj medicinskoj praksi. Općenito se kao pristupi sterilizacije koriste fizički agensi poput topline i kemikalija, ali porast korištenja sintetičkih plastičnih materijala koji ne mogu podnijeti takve vrste sterilizacije čini ih idealnim materijalima za sterilizaciju zračenjem. Izvori ^{60}Co pretežno se koriste u te svrhe [18].

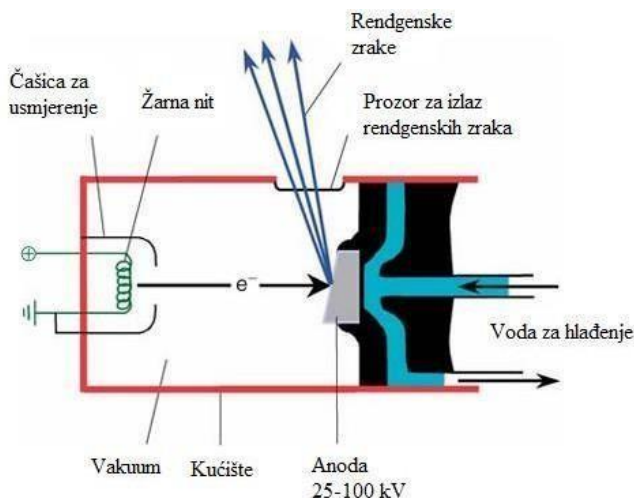


Slika 12. Izvor ^{60}Co okružen materijalom kojeg treba sterilizirati [19]

2.9.3. Fluorescencija rendgenskim zrakama (XRF)

Rendgenska fluorescencijska analiza (XRF) ističe se kao istaknuta nedestruktivna analitička tehnika koja nudi kvalitativne i kvantitativne uvide u elementarni sastav materijala bez potrebe za opsežnom pripremom uzorka jer se isti tretiraju u svojim prirodnim stanjima. Ova tehnika je iznimno jednostavna uključujući samo izvor rendgenskih zraka, analizirani uzorak i detektor rendgenskih zraka. Kada rendgenske zrake imaju interakciju s ciljanim materijalom, mogu izbaciti elektrone iz unutarnjih orbitala atoma u uzorku što dovodi do emisije fluorescencijskih rendgenskih zraka karakterističnih za elemente te tako možemo odrediti sastav i količinu

elemenata u uzorku. Najčešće korišteni izvor rendgenskih zraka je rendgenska cijev, koja se sastoji od vakumirane cijevi, katode i anode. Katoda unutar cijevi emitira elektrone koji kada se sudare s anodom stvaraju rendgensko zračenje. Anoda je najčešće izrađena od metala kao što je bakar ili molibden [20].



Slika 13. Poprečni prikaz zatvorene rendgenske cijevi [20]

2.10. Primjena zračenja u medicini

Radioaktivnost ima ključnu ulogu u modernoj medicini, počevši od dijagnosticiranja bolesti pa do njihovog liječenja te sudjeluje u razvitku daljnjih medicinskih istraživanja. Primjenjuje se u medicinskom snimanju (rendgen, kompjuterizirana tomografija, pozitronska emisijska tomografija, magnetska rezonancija), terapiji zračenjem i u nuklearnoj medicini [21].

2.10.1. Rendgensko snimanje

Rendgenske zrake su oblik elektromagnetskog zračenja čija svojstva omogućuju prodiranje kroz različite materijale, što ih čini neprocjenjivima za medicinsko snimanje i industrijske primjene. Njihova sposobnost interakcije s materijom uglavnom ovisi o atomskom broju materijala, gustoći materijala i energiji rendgenskih zraka. Ključni koncepti u rendgenskom snimanju su apsorpcija rendgenskih zraka, snimanje faznog kontrasta, refrakcija rendgenskih

zraka i fazni pomak. Apsorpcija rendgenskih zraka uključuje kontrast apsorpcije i koeficijent apsorpcije. Kontrast apsorpcije govori kako različiti dijelovi objekta apsorbiraju rendgenske zrake u različitoj mjeri. Materijali s višim atomskim brojem apsorbiraju više rendgenskih zraka, što rezultira svjetlijim područjima na slici. Koeficijent apsorpcije definira koliko rendgenskih zraka se apsorbira dok prolazi kroz materijal te je ključan za prilagodbu postavki rendgenskog snimanja. Snimanje faznog kontrasta je tehnika koja poboljšava kontrast rendgenskih slika koristeći fazni pomak rendgenskih zraka uzrokovan različitim materijalima. Posebno je koristan za snimanje mekih tkiva i drugih materijala koji imaju slična svojstva apsorpcije, ali se razlikuju po gustoći ili atomskom broju. Do refrakcije dolazi kada rendgenske zrake prolaze kroz materijale s različitim indeksima loma, uzrokujući promjenu smjera dok se fazni pomak odnosi na promjenu faze rendgenskih zraka prilikom prolaska kroz različite materijale, što se može koristiti za poboljšanje kontrasta slike [22].



Slika 14. Rendgenska snimka pluća [23]

2.10.2. Terapija zračenjem (radioterapija)

Kako rak (karcinom) ostaje jedan od vodećih uzroka smrtnosti širom svijeta tako se radioterapija (RT) istaknula se kao temelj u upravljanju rakom, pružajući kurativne i palijativne koristi milijunima ljudi širom svijeta. Izražena prednost RT-a leži u njegovoj sposobnosti da cilja bolesne stanice učinkovitije nego normalne stanice, minimizirajući štetu na zdravim tkivima i poboljšavajući ishode za pacijente. RT se može primjenjivati kao jedini oblik terapije ili u kombinaciji s drugim metodama poput kirurgije i kemoterapije [24]. Inovacije u planiranju i

primjeni liječenja, kao što su intenzitetno modulirana radioterapija (IMRT) i stereotaktička radioterapija, optimizirale su učinkovitost liječenja i smanjile toksičnost povezanu s tretmanom. Napredak u tehnologiji također potiče trend prema personaliziranim planovima liječenja te kraćim i intenzivnijim tečajevima liječenja [25].



Slika 15. Linearni akcelerator korišten u Zadarskoj bolnici kao izvor zračenja za radioterapiju [26]

2.10.3. Dozimetrija

Radijacijska dozimetrija kvantificira energiju prenesenu na materiju ionizirajućim zračenjem, što ima ključnu ulogu u različitim primjenama od medicinskih tretmana do monitoringa okoliša. Razumijevanje transfera i apsorpcije te energije temeljno je za optimizaciju sigurnosti ljudi i učinkovitosti upotrebe zračenja. Osnovni koncepti u radijacijskoj dozimetriji su fluencija čestica, koeficijenti interakcije, kinetička energija oslobođena u materijalu, apsorbirana doza i izloženost. Fluencija čestica definira gustoću čestica koja ulazi u volumen ciljanog materijala kako bi se procijenio potencijal za interakciju s materijalom. Koeficijenti interakcije opisuju kako zračenje reagira s materijom, uključujući procese ionizacije i ekscitacije. Ti koeficijenti su ključni za izračunavanje koliko energije se prenosi na materijal i koliko isti apsorbira. Kinetička energija oslobođena u materijalu predstavlja početnu kinetičku energiju prenesenu na nabijene čestice od nenabijenih, isključujući bilo koju energiju kasnije izgubljenu radijativnim procesima. Apsorbirana doza je energija po jedinici mase koju materijal apsorbira, što je ključno za procjenu potencijalnih bioloških učinaka. Izloženost se odnosi na ionizaciju proizvedenu zračenjem u zraku i posebno se koristi u monitoringu okoliša. Tehnike mjerenja u dozimetriji su kalorimetrija i

komore za ionizaciju. Kalorimetrija se koristi za mjerenje porasta temperature uzrokovanog apsorbiranom radijacijom, pružajući izravno mjerenje prenesene energije. Komore za ionizaciju koriste se za kvantifikaciju naboja proizvedenog ionizirajućim zračenjem, pomažući izračunati apsorbiranu dozu na temelju ionizacije plinova. Precizna dozimetrija neophodna je u medicinskim područjima kao što su radiologija, radioterapija i nuklearna medicina, osiguravajući da su tretmani i učinkoviti i sigurni. U istraživanjima, precizna dozimetrija omogućuje kontrolirano proučavanje učinaka zračenja na biološke sustave i materijale, olakšavajući razvoj u sigurnosti zračenja i tehnologiji [27].



Slika 16. Pasivni dozimetar [28]

3. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad istražio je kako zračenje utječe na brojne aspekte kemije i medicine, osvjetljajući njegovu neizmjernu važnost i dvostruku prirodu. Dok je ionizirajuće zračenje iznimno korisno u medicinskim dijagnosticiranjima i tretmanima, kao i u raznim kemijskim analizama i industrijskim primjenama, njegovi potencijalni rizici zahtijevaju stroge mjere opreza i kontrolu. U medicini, upotreba zračenja u dijagnostičkim tehnikama kao što su rendgensko snimanje, te u terapijskim pristupima poput radioterapije, pokazuje kako moderno liječenje ne može biti zamislivo bez ove tehnologije. S druge strane, u kemiji, tehnike poput NMR spektroskopije i fluorescencije rendgenskim zrakama (XRF) neophodne su za razumijevanje molekularnih struktura i sastava materijala, čime se dodatno potvrđuje nezamjenjiva uloga zračenja u znanstvenim istraživanjima. Iako zračenje pruža brojne prednosti, važno je naglasiti potrebu za njegovom regulacijom i pravilnim upravljanjem kako bi se minimizirali rizici za ljudsko zdravlje i okoliš. Primjerice, propisi o zaštiti od zračenja i stalna edukacija zdravstvenih radnika i tehničara ključni su za osiguravanje sigurnosti i efikasnosti u primjeni ove moćne tehnologije. Zračenje, unatoč svojim izazovima i rizicima, nezamjenjiv je alat u mnogim granama znanosti, posebice u kemiji i medicini. Buduća istraživanja i tehnološki napredak mogli bi dodatno proširiti granice njegove primjene, otvarajući nova vrata u liječenju i znanstvenim otkrićima.

4. LITERATURA

- [1] Z. Jakobović, *Fizika zračenja*, Zdravstveno veleučilište, Zagreb, 2007, str. XIII
- [2] Z. Jakobović, *Fizika zračenja*, Zdravstveno veleučilište, Zagreb, 2007, str. 1-27
- [3] Ervin B. Podgoršak, *Radiation physics for medical physicists*, Third edition, Graduate texts in physics, Faculty of Medicine, Department of Oncology and Medical Physics Unit, Mc Gill University, Montreal, QC, Canada, str. 11
- [4] https://web.archive.org/web/20140711115413/http://www.epa.gov/radiation/understand/ionize_nonionize.html, pristupljeno 12.8.2024.
- [5] *Helvetica Chimica Acta*, Vol 83., 2000, str. 1766.
- [6] *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2004, 3, str. 337-340, doi: 10.1039/b316210a
- [7] <https://web.archive.org/web/20140902054000/http://www.mcw.edu/radiationoncology/ourdepartment/radiationbiology/Static-Electric-and-Magnetic-F.htm>, pristupljeno 12.8.2024.
- [8] K.-H. Ng, *Non-Ionizing Radiations – Sources, Biological Effects, Emissions and Exposures*, 2003
- [9] https://web.archive.org/web/20110127004149/http://missionscience.nasa.gov/ems/10_ultravioletwaves.html, pristupljeno 12.8.2024.
- [10] S. W. Ellingson, *Radio Systems Engineering*, Cambridge University Press, 2016.
- [11] J. R. Howell, M. P. Mengüç, R. Siegel, *Thermal radiation heat transfer* (6th ed.). Boca Raton, Fla. London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.
- [12] R. Loudon, *The Quantum Theory of Light*, 3rd ed., Cambridge University Press, 2000.
- [13] Z. Jakobović, *Fizika zračenja*, Zdravstveno veleučilište, Zagreb, 2007, str. 29 - 70
- [14] <https://kb.descarteslabs.com/knowledge/introduction-to-remote-sensing>, pristupljeno 14.8.2024.
- [15] <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/uses-radiation.html>, pristupljeno 15.8.2024

- [16] N. E. Jacobsen, *NMR Spectroscopy Explained*, 2007.godina, str. 1-12
- [17] Prof. dr. sc. I. Škorić, *Nuklearna magnetska rezonancija (NMR) kao spektroskopska metoda za određivanje strukture (organskih) spojeva*, Prezentacija za studente Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb
- [18] R. N. Mukherjee, *Radiation: A means of sterilization*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1975.
- [19] <https://www.hop.com.hr/2022/07/09/ekskluzivno-afera-institut-ruder-boskovic-zagreb-na-nuklearnoj-bombi/>, pristupljeno 15.8.2024
- [20] G. Gauglitz, D. S. Moore, *Handbook of Spectroscopy*, Second, Enlarged edition, 2014, str. 451-487
- [21] *Medical Uses of Radioactivity*, Division of Environmental Health, Office of Radiation Protection, Washington State Department of Health, 2003, https://doh.wa.gov/sites/default/files/legacy/Documents/Pubs/320-072_meduserad_fs.pdf, pristupljeno 17.8.2024
- [22] T. Hiroyuki, *X-Ray CT Hardware and Software techniques*, Fukuoka, 2021, str. 17-48
- [23] <https://medlineplus.gov/xrays.html>, pristupljeno 17.8.2024.
- [24] H. Gelband, P. Jha, R. Sankaranarayanan, S. Horton, *Disease Control Priorities*, Third Edition (Volume 3): Cancer, 2015, str. 239-241
- [25] Thariat J., Hannoun-Levi J.-M., Sun Myint A., Vuong T., Gérard J.-P., *Past, present and future of radiotherapy for the benefit of patients*, Nature Reviews Clinical Oncology, 2012, 10(1), str. 52–60
- [26] <https://zadarski.slobodnadalmacija.hr/zadar/4-kantuna/ministarstvo-zdravstva-konacno-pokrece-nabavu-linearnih-akceleratora-a-jedan-sigurno-dolazi-u-zadar-evo-do-kada-mora-biti-u-funkciji-1270858>, pristupljeno 18.8.2024.
- [27] A. J. J. Bos, *Fundamentals of Radiation Dosimetry*, Delft Univesity of Technology, Delft, 2011

[28] I. Softić, *Personalne i ambijentalne doze zračenja u trima laboratorijama za fiziku na Univerzitu Crne Gore*, specijalistički rad, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 2015.

ŽIVOTOPIS

Zovem se Jura Prugovečki. [REDACTED] Pohađao sam Osnovnu školu Augusta Harambašića u Zagrebu od 2008. do 2016. godine. Nakon završene osnovne škole, upisujem se u srednju školu "Prirodoslovna škola Vladimira Preloga" u trajanju od 2016. do 2020. godine. Tijekom školovanja sam sudjelovao u brojnim izvan nastavnim aktivnostima poput različitih sportskih natjecanja, ponajviše atletika kojom se idalje bavim. Također sam sudjelovao i na županijskom natjecanju iz biologije u osnovnoj školi kao i na međunarodnom ispitu latinskog jezika 2018. godine gdje sam i stekao certifikat za znanje klasičnoga jezika. 2020. godine upisujem Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, smjer Primijenjena kemija. Na tom smjeru sam bio do sada te ga završavam ovim završnim radom. Odradio sam i obaveznu stručnu praksu 2024. godine na Institutu Ruđer Bošković u Zagrebu na Zavodu za kemiju materijala u laboratoriju za radijacijsku kemiju i dozimetriju.