

# RADIOAKTIVNO ZRAČENJE I IZVORI RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA

---

Ćukušić, Angelina

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:193953>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Angelina Ćukušić

# **RADIOAKTIVNO ZRAČENJE I IZVORI RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2022.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department  
Professional graduate study of Safety and Protection

Angelina Ćukušić

# **RADIOACTIVE RADIATION AND SOURCES OF RADIOACTIVE RADIATION**

Final paper

Karlovac, 2022.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Angelina Ćukušić

# **RADIOAKTIVNO ZRAČENJE I IZVORI RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr.sc. Slaven Lulić, prof. v. š.

Karlovac, 2022.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Specijalistički diplomski stručni studij: Sigurnost i zaštita

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, lipanj, 2022.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Angelina Ćukušić

Matični broj: 0415617052

Naslov: Radioaktivno zračenje i izvori radioaktivnog zračenja

Opis zadatka:

U završnom radu bit će govora o radioaktivnom zračenju kao i vrste radioaktivnog zračenja. Objasniti ćemo kako djeluje na čovjeka te koje su mjere zaštite od istog i s kojim se uređajima mjeri kao i zakonske propise koji su propisani za radioaktivno zračenje i odlaganje radioaktivnog otpada. Također ćemo navesti koji su to izvori radioaktivnog zračenja i bliže ih opisati.

Zadatak zadan:

02/2020

Rok predaje rada:

06/2020

Predviđeni datum obrane:

06/2020

Mentor:

dr.sc. Slaven Lulić prof. v. š.

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Ivan Štedul, v. pred.

## PREDGOVOR

*Zahvalila bih svom mentoru dr. sc. Slavenu Luliću prof. v. š. što mi je pristao biti mentor i voditi me kroz pisanje ovog rada, što mi je pružio podršku i znanje tijekom obrazovanja u Karlovcu. Hvala na svakoj šali tokom predavanja jer ste ih učinili zanimljivijima i što ste vjerovali, ne samo u mene, nego u sve nas. Jednom prilikom rekli ste: "Zvijezde nisu Vaše granice" i nadam se da se i Vi vodite tim sloganom, jer koliko vi vjerujete u mene, toliko i ja vjerujem u Vas. Neizmjereno hvala!*

*Hvala i svim profesorima koji su bili dio moga obrazovanja. Hvala što ste se nesebično trudili prenijeti mi svoje znanje na najbolje načine.*

*Veliku zahvalu želim uputiti svojim roditeljima, sestri i bratu i ostaloj obitelji koji su mi bili nevjerojatna podrška svih ovih godina i koji su vjerovali u mene da mogu uspjeti u bilo čemu, čak i onda kad ja nisam vjerovala.*

*Također bih zahvalila svojim, prvenstveno prijateljicama, i cimericama Antoneli i Luciji što su upotpunile i zaokružile cijeli doživljaj na fakultetu i u Karlovcu. Hvala Vam na svakoj podršci, vjerovanju, zagrljaju i smijehu. Bez Vas dani u Karlovcu ne bi bili isti!*

*I na kraju, hvala svima ostalima koji su bili dio fakultetskih dana. Uz Vas je svaki dan bio sve ljepši. Nadam se da ćemo se, bez obzira što nismo svi u istim gradovima, svi jednom vratiti u Karlovac i prisjećati se svih predivnih trenutaka!*

## **SAŽETAK**

Tema diplomskog rada je radioaktivno zračenje i izvori radioaktivnog zračenja. Radioaktivnost, kao i samo utjecanje radioaktivnog zračenja na čovjeka stalno je u središtu znanstvenih istraživanja. Dio su ionizirajućeg zračenja te zbog svojih specifičnih osobina imaju veliku primjenu u životu, kao što je na primjer medicina.

Na početku govorim općenito o radioaktivnom zračenju te o izvorima radioaktivnog zračenja dok u nastavku govorim njegovim negativnim posljedicama.

## **SUMMARY**

The topic of the thesis is radioactive radiation and the sources of radioactive radiation. Radioactivity, as well as the impact of radioactive radiation on humans, is constantly at the center of scientific research. They are part of ionizing radiation and, due to their specific properties, have great application in life, such as medicine.

At the beginning, I talk about radioactive radiation in general and about the sources of radioactive radiation, while below I talk about its negative consequences.

## **KLJUČNE RIJEČI**

Radioaktivno zračenje, alfa čestice, beta čestice, gama zrake, radon, kozmičke zrake

## **KEYWORDS**

Radioactive radiation, alpha particle, beta particle, gamma ray, radon, cosmic ray

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POJMOVNO ODREĐENJE RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA .....	3
2.1. Povijesni pregled .....	3
2.2. Pojam radioaktivnog zračenja .....	6
2.3. Izvori radioaktivnog zračenja .....	7
2.4. Radioaktivne emisije.....	9
3. IZVORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA.....	14
3.1. Alfa čestice.....	14
3.2. Beta čestice.....	14
3.3. Gama zrake.....	15
3.4. Umjetni izvori radioaktivnosti .....	16
4. PRIRODNI IZVORI.....	17
4.1.1. Kozmičke zrake .....	17
4.1.2. Zemaljsko zračenje .....	18
4.1.3. Unutrašnje zračenje.....	18
4.1.4. Radon .....	19
5. NEGATIVNE POSLJEDICE RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA .....	21
5.1. Izvori radioaktivnog zagađenja.....	21
5.2. Radioaktivno onečišćenje okoliša.....	23
5.3. Kontrola i zaštita od zračenja .....	25
6. ZAKLJUČAK .....	27
7. LITERATURA.....	29



## 1. UVOD

U ovom radu se obrađuje tematika vezana uz radioaktivno zračenje te izvore radioaktivnog zračenja. Uz dostupnu literaturu i relevantne internetske izvore definirani su glavni pojmovi. Pojam radio aktivnog zračenja označava emisiju zračenja ili čestica iz izvora. Zračenja vrlo visoke energije, koja mogu izravno ili neizravno stvarati ione, nazivaju se ionizirajućim zračenjem. Ionizirajuće zračenje glavni je uzrok "ozljeda" protoplazme koje nastaju u materiji koja ih apsorbira.

Ta se zračenja javljaju u nuklearnim reakcijama i procesima, kao i u posebnim laboratorijskim i industrijskim uređajima, a prisutna su i u kozmičkom zračenju. Radioaktivnost je svojstvo nekih kemijskih elemenata ili tvari da emitiraju nevidljive čestice ili zrake visoke energije.

Radioaktivnost je fenomen spontanog raspadanja nestabilnih atomskih jezgri na atomske jezgre kako bi se formirale energetski stabilnije atomske jezgre. Radioaktivni raspad je vrlo egzoergičan, statistički slučajaj proces prvog reda koji se događa s malom količinom mase koja se pretvara u energiju.

Budući da je riječ o procesu prvoga reda, svaka radioaktivna vrsta karakterizira svoj vlastiti poluživot, vrijeme u kojem će se u početku vrlo velik broj takvih jezgri raspasti na samo polovicu izvornog broja.

Zračenje se odnosi na čestice ili energiju oslobođenu tijekom radioaktivnog raspada. Emitirano zračenje može biti u obliku čestica, kao što su neutroni, alfa čestice i beta čestice, ili valovi čiste energije, kao što su gama i X-zrake.

Svaki radioaktivni element, odnosno radionuklid, ima karakteristično vrijeme poluraspada. Poluživot je mjera vremena koje je potrebno jednoj polovici atoma određenog radionuklida da se raspadne (ili raspadne) u drugi nuklearni oblik.

Poluživoti variraju od milijuntih dijelova sekunde do milijardi godina. Budući da je radioaktivnost mjera brzine raspada radionuklida (na primjer, raspada u sekundi), što je dulje vrijeme poluraspada radionuklida, to je manje radioaktivan za danu masu.

Radioaktivnost je pojam koji se daje za razbijanje (raspad) ili preuređenje atomske jezgre. Propadanje se događa prirodno i spontano na nestabilne jezgre. Ova nestabilnost obično je uzrokovana neusklađenošću između broja protona i neutrona.

Svatko je svakodnevno izložen zračenju, prvenstveno prirodnim kozmičkim zrakama, radioaktivnim elementima u tlu i radioaktivnim elementima ugrađenim u tijelo. Izvori zračenja koje je stvorio čovjek, kao što su medicinske X-zrake ili ispadi iz povijesnih testiranja nuklearnog oružja, također doprinose, ali u manjoj mjeri. Oko 80% pozadinskog zračenja potječe iz prirodnih izvora, a preostalih 20% proizlazi iz izvora koje je stvorio čovjek.

## 2. POJMOVNO ODREĐENJE RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA

### 2.1. Povijesni pregled

Radioaktivnost su otkrili 1896. znanstvenici Henri Becquerel i Marie Curie, radeći s fosforescentnim materijalima. Ti materijali svijetle u mraku nakon izlaganja svjetlosti, a on je sumnjao da bi sjaj koji u katodnim cijevima proizvode rendgenske zrake mogao biti povezan s fosforescencijom. Umotao je fotografsku ploču u crni papir i na nju stavio razne fosforescentne soli. Svi rezultati su bili negativni dok nije upotrijebio uranove soli. Uranove soli uzrokovale su zacrnenje ploče unatoč tome što je ploča bila umotana u crni papir. Ta su zračenja dobila naziv "Becquerelove zrake" [2].

Ubrzo je postalo jasno da zacrnenje ploče nema nikakve veze s fosforescencijom, jer je zacrnenje također uzrokovano nefosforescentnim solima urana i metalnim uranom. Iz ovih je eksperimenata postalo jasno da postoji oblik nevidljivog zračenja koje može proći kroz papir i uzrokuje reakciju ploče kao da je izložena svjetlu.

Isprva se činilo kao da je novo zračenje slično tada nedavno otkrivenim rendgenskim zrakama. Daljnja istraživanja Becquerela, Ernesta Rutherforda, Paula Villarda, Pierrea Curiea, Marie Curie i drugih pokazala su da je ovaj oblik radioaktivnosti znatno kompliciraniji. Rutherford je prvi shvatio da se svi takvi elementi raspadaju u skladu s istom matematičkom eksponencijalnom formulom. Rutherford i njegov učenik Frederick Soddy prvi su shvatili da su mnogi procesi raspadanja rezultirali transmutacijom jednog elementa u drugi. Nakon toga, Fajansov i Soddyjev zakon radioaktivnog pomaka je formuliran da opiše produkte alfa i beta raspada [3].

Rani istraživači su također otkrili da mnogi drugi kemijski elementi, osim urana, imaju radioaktivne izotope. Sustavna potraga za ukupnom radioaktivnošću u uranovim rudama također je vodila Pierrea i Marie Curie da izoliraju dva nova elementa: polonij i radij. Osim radioaktivnosti radija, kemijska sličnost radija i barija otežava razlikovanje ova dva elementa.

Proučavanje radioaktivnosti Marie i Pierrea Curieja važan je čimbenik u znanosti i medicini. Nakon što ih je njihovo istraživanje Becquerelovih zraka dovelo do otkrića radija i polonija, skovali su pojam "radioaktivnost" kako bi definirali emisiju ionizirajućeg zračenja nekih teških elemenata.

Njihovo istraživanje prodornih zraka u uran i otkriće radija pokrenulo je eru korištenja radija za liječenje raka. Njihovo istraživanje radija moglo bi se smatrati prvom mirnom uporabom nuklearne energije i početkom moderne nuklearne medicine.

Otkriće X – zraka Wilhelma Röntgena 1895. dovelo je do široko rasprostranjenih pokusa znanstvenika, liječnika i izumitelja. Mnogi su ljudi počeli pričati priče o opeklinama, gubitku kose i još gore u tehničkim časopisima još 1896. U veljači te godine, profesor Daniel i dr. Dudley sa Sveučilišta Vanderbilt izveli su eksperiment koji uključuje rendgensko snimanje Dudleyeve glave koji je rezultirao njegovom kosom. gubitak. Izvješće dr. HD Hawksa, o njegovim teškim opeklinama šake i prsnog koša tijekom rendgenske demonstracije, bilo je prvo od mnogih drugih izvješća u Electrical Reviewu [2].

Drugi eksperimentatori, uključujući Elihua Thomsona i Nikolu Teslu, također su prijavili opekline. Thomson je namjerno izložio prst rendgenskoj cijevi tijekom određenog vremenskog razdoblja i pretrpio bol, oteklinu i pojavu mjehura. Za štetu su se ponekad okrivljavali i drugi učinci, uključujući ultraljubičaste zrake i ozon, a mnogi liječnici i dalje su tvrdili da izlaganje rendgenskim zrakama uopće nije imalo učinaka.

Unatoč tome, bilo je nekih ranih sustavnih istraživanja opasnosti, a već 1902. William Herbert Rollins je gotovo s očajanjem napisao da se na njegova upozorenja o opasnostima uključenim u neoprezno korištenje X-zraka ne obaziru, ni industrija ni njegovi kolege. Do tada je Rollins dokazao da X-zrake mogu ubiti pokusne životinje, mogu uzrokovati pobačaj trudnog zamorca i da mogu ubiti fetus [9].

Međutim, biološke učinke zračenja zbog radioaktivnih tvari bilo je teže procijeniti. To je dalo priliku mnogim liječnicima i korporacijama da prodaju radioaktivne tvari kao patentirane lijekove. Primjeri su bili tretmani klistirima s radijem i vode koje sadrže radij koje se piju kao tonici. Marie Curie je protestirala protiv ovakvog tretmana, upozoravajući da je "radij opasan u neobučanim rukama. Curie je kasnije umrla od aplastike, vjerojatno uzrokovana izlaganjem ionizirajućem zračenju. Do 1930-ih, nakon brojnih slučajeva nekroze kostiju i smrti ljubitelja liječenja radijem, lijekovi koji su sadržavali radij uvelike su uklonjeni s tržišta (radioaktivno nadriječništvo) [2].

Samo godinu dana nakon Röntgenovog otkrića X zraka, američki inženjer Wolfram Fuchs (1896.) dao je vjerojatno prvi savjet o zaštiti, ali je tek 1925. održan prvi

Međunarodni kongres radiologije (ICR) na kojem se razmatralo uspostavljanje međunarodne zaštite standardima. Učinci zračenja na gene, uključujući učinak rizika od raka, prepoznati su mnogo kasnije. Godine 1927. Hermann Joseph Muller objavio je istraživanje koje pokazuje genetske učinke, a 1946. je za svoja otkrića dobio Nobelovu nagradu za fiziologiju ili medicinu [9].

Drugi ICR održan je u Stockholmu 1928. i predložio usvajanje röntgen jedinice, a formiran je i Međunarodni komitet za zaštitu od rendgenskih zraka i radija (IXRPC). Rolf Sievert imenovan je za predsjednika, ali pokretačka snaga bio je George Kaye iz Britanskog nacionalnog fizikalnog laboratorija. Odbor se sastajao 1931., 1934. i 1937. godine [8].

Nakon Drugoga svjetskog rata, povećani raspon i količina radioaktivnih tvari kojima se rukuje kao rezultat vojnih i civilnih nuklearnih programa doveo je do toga da su velike skupine radnika na zanimanju i javnost potencijalno izloženi štetnim razinama ionizirajućeg zračenja. To se razmatralo na prvom poslijeratnom ICR-u sazvanom u Londonu 1950. godine, kada je rođena sadašnja Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (ICRP). Od tada je ICRP razvio sadašnji međunarodni sustav zaštite od zračenja, koji pokriva sve aspekte opasnosti od zračenja.

2020. Hauptmann i ostalih 15 međunarodnih istraživača iz osam zemalja, među kojima: Instituti za biostatistiku, Registry Research, Centre of Cancer Epidemiology, Radiation Epidemiology, a zatim i US National Cancer Institute (NCI), Međunarodna agencija za istraživanje raka (IARC) i Zaklada za istraživanje učinaka zračenja iz Hirošime kroz meta-analizu definitivno su proučili štetu koja je posljedica "niskih doza" koje su pogodile populacije preživjelih od atomskog bombardiranja Hirošime i Nagasakija, kao i brojnih nesreća nuklearnih elektrana koje su se dogodile u svijet.

Ti su znanstvenici izvijestili, u JNCI Monografijama: Epidemiološke studije niske doze ionizirajućeg zračenja i rizika od raka, da nove epidemiološke studije izravno podupiru višak rizika od raka od niske doze ionizirajućeg zračenja, radiocezija i rak gušterače s ulogom cezija u biologiji te u pankreatitisu i šećernoj bolesti gušterača.

## 2.2. Pojam radioaktivnog zračenja

Iako su ionizirajuće zračenje i radioaktivnost otkriveni krajem prošlog stoljeća, zračenje kao oblik onečišćenja okoliša počelo je zabrinjavati opći svijet tek nakon užasa atomskog bombardiranja Japana 1945. godine. Ovu zabrinutost pojačavaju testovi novog nuklearnog oružja i dosad gotovo nepoznata pojava radioaktivnih padavina. Široka uporaba zračenja i radioaktivnosti, korištenje nuklearne energije, ali i opasni kvarovi u nuklearnim elektranama u posljednje vrijeme, uz sve pozitivne pomake, alarmantno upućuju na ozbiljne ekološke i zdravstvene posljedice kontaminacije [2].

Pojam zračenja ili radijacija (lat. Radius – zrak) označava emisiju zračenja ili čestica iz izvora. Zračenja vrlo visoke energije, koja mogu izravno ili neizravno stvarati ione, nazivaju se ionizirajućim zračenjem. Ionizirajuće zračenje glavni je uzrok "ozljeda" protoplazme koje nastaju u materiji koja ih apsorbira [4].

Ta se zračenja javljaju u nuklearnim reakcijama i procesima, kao i u posebnim laboratorijskim i industrijskim uređajima, a prisutna su i u kozmičkom zračenju. Radioaktivnost je svojstvo nekih kemijskih elemenata ili tvari da emitiraju nevidljive čestice ili zrake visoke energije.

Iako su opća svojstva radioaktivnog zračenja bila poznata odmah nakon otkrića radioaktivnosti, tada se ništa nije znalo o njihovoj biti. Već 1900. godine bilo je poznato da se dio radioaktivnog zračenja može skretati u magnetskom polju. Istovremeno je Rutherford (Ernest Rutherford) na temelju ispitivanja prolaska radioaktivnih zraka kroz tanke aluminijske listove utvrdio da u zračenju spojeva urana postoje dvije vrste zraka. Rutherford je tip zraka koji nije mogao proći kroz aluminijsku ploču deblju od 0,002 cm nazvao  $\alpha$ -zrakama, a tip koji je prolazio kroz deblje slojeve nazvao je  $\beta$ -zrakama [2].

Godine 1900. francuski znanstvenik Willard otkrio je treću vrstu radioaktivnih zraka za koje je utvrdio da imaju veliku prodornu moć i da se ne odbijaju u magnetskom polju. Te se zrake nazivaju  $\gamma$ -zrake. Od tada je poznato da prirodne radioaktivne tvari emitiraju zrake tri vrste, koje se mogu odvojiti jedna od druge u jakom magnetskom ili električnom polju i označavaju se grčkim slovima  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ .

Naknadna ispitivanja ovih zraka otkrila su njihova druga svojstva i prirodu. Treba imati na umu da neki radioaktivni elementi emitiraju samo  $\alpha$  - zrake ili samo  $\beta$  - zrake, a  $\gamma$  - zrake samo neke elemente, dok ih drugi emitiraju ili s  $\alpha$  - zrakama ili s  $\beta$  - zrakama. Samo

nekoliko radioaktivnih elemenata emitira sve tri vrste zraka, kao što su RaC, ThC i AcC [9].

### **2.3. Izvori radioaktivnog zračenja**

Izotopi elemenata koji emitiraju ionizirajuće zračenje nazivaju se radioizotopi ili radionuklidi. Nuklearna energija se oslobađa u nuklearnim reakcijama pretvaranjem mase u energiju. Izvori ionizirajućeg zračenja su:

- Alfa čestice, velike, pozitivno nabijene čestice,
- Beta čestice, manje, negativno nabijene čestice (elektroni) i
- Gama zrake, neutralni elektromagnetski valovi vrlo kratkih valnih duljina [5].

Gama zrake su vrlo slične rendgenskim zrakama koje se dobivaju iz rendgenskih aparata. Važni su i neutroni, velike nenabijene elementarne čestice, komponente atomskih jezgri koje postaju radioaktivne kada su vani. Prema podrijetlu i izvoru zračenje može biti prirodno ili umjetno. Većina ukupnog zračenja koje prima svjetsko stanovništvo dolazi iz prirodnih izvora. Postoje tri osnovna izvora prirodnog ili osnovnog zračenja:

- kozmičko zračenje,
- zemaljska ili radijacija iz Zemljine kore i
- zračenje iz radioaktivnih izvora koji se nalaze u tkivima živih bića [1].

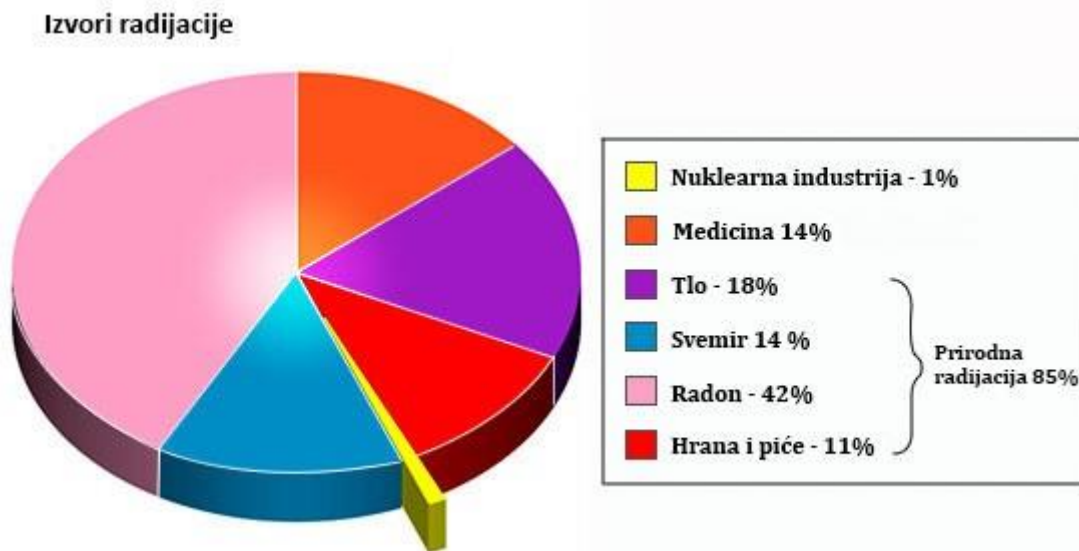
Prva dva nazivaju se vanjskim, a treći unutarnjim izvorom zračenja u odnosu na ljudsko tijelo. U cjelini, zemaljski izvori imaju najveći udio u izloženosti čovjeka prirodnom zračenju. Zemaljska radioaktivnost potječe od prirodnih radioaktivnih elemenata koji se nalaze u tlu, posebno u glinenim supstratima i stijenama, a različita je u različitim dijelovima Zemlje. Posebno je velika iznad ležišta rude urana.

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, čovjek je proizveo nekoliko stotina umjetnih radioizotopa nuklearnom fisijom (ili fisijom atomskih jezgri). Glavni izvori umjetnog zračenja su: nuklearni reaktori, nuklearne elektrane, zatim rendgenski aparati, kao i nuklearno oružje koje se koristi u testiranju [9].

Svi ovi umjetni izvori radioaktivnosti značajno su povećali ukupne doze zračenja koje prima svaki pojedinac i čovječanstvo u cjelini. Procjenjuje se da su čovjekove aktivnosti u nuklearnoj energiji već donijele Zemlji više radioaktivnosti nego njezina prirodna

atmosfera i hidrosfera, te da svi današnji nuklearni reaktori odgovaraju ukupnoj radioaktivnosti tla s kojim dolaze u izravan dodir.

Slika 1. prikazuje izvore radijacije, jasno je vidljivo da prirodna radijacija uzima 85% ukupne radijacije. Nuklearna industrija iznosi svega 1% dok na medicinu odlazi 15%.



Slika 1. Izvori radijacije

Izvor: [https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/radioaktivnost\\_7/](https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/radioaktivnost_7/)

Jedinica za mjerenje radioaktivnosti izvora naziva se bekerel (Bq). Jedan bekerel odgovara jednom raspadu bilo kojeg radionuklida u jednoj sekundi. Doze zračenja mjere se količinom energije koju apsorbiraju tkiva izložena zračenju. Jedinica za mjerenje apsorbirane doze ionizirajućeg zračenja, odnosno energije unesene zračenjem po gramu tkiva, naziva se sivo (Gy). Jedan sivi predstavlja količinu energije ionizirajućeg zračenja unesenu u jedinicu mase tvari [8].

Radioaktivnost je nuklearni fenomen, tj. svojstvo nekih kemijskih elemenata, odnosno njihovih izotopa (različite vrste atoma istog kemijskog elementa, imaju isti atomski broj – broj protona u atomskoj jezgri i broj elektrona u atomskoj ljusci, ali različit broj neutrona u jezgri i različite mase atomskih jezgri) emitirati nevidljive čestice i zrake visoke energije. Te čestice i zrake potječu iz atomske jezgre [5].

Općenito svojstvo radioaktivnih zraka je da djeluju na fotografsku ploču, prodiru u različite materijale određene debljine, uzrokuju ionizaciju plinova i fluorescenciju različitih tijela.



## 2.4. Radioaktivne emisije

Rani istraživači otkrili su da električno ili magnetsko polje može podijeliti radioaktivne emisije u tri vrste zraka. Zrake su dobile nazive alfa, beta i gama, prema rastućem redoslijedu njihove sposobnosti da prodiru u materiju (Slika 2).

Alfa raspad se opaža samo u težim elementima atomskog broja 52 (telur) i većeg, s izuzetkom berilija-8 (koji se raspada na dvije alfa čestice). Druge dvije vrste propadanja opažaju se u svim elementima. Olovo, atomski broj 82, je najteži element koji ima izotope stabilne (do granice mjerenja) na radioaktivni raspad. Radioaktivni raspad je vidljiv u svim izotopima svih elemenata atomskog broja 83 (bizmut) ili većeg. Bizmut-209 je, međutim, vrlo malo radioaktivan, s poluživotom dužim od starosti svemira; radioizotopi s iznimno dugim poluživotom smatraju se učinkovito stabilnima u praktične svrhe [8].

U analizi prirode produkata raspadanja, bilo je očito iz smjera elektromagnetskih sila primijenjenih na zračenje vanjskim magnetskim i električnim poljima da alfa čestice nose pozitivan naboj, beta čestice negativan, a gama zrake neutralne. Iz veličine otklona bilo je jasno da su alfa čestice mnogo masivnije od beta čestica.

Propuštanje alfa čestica kroz vrlo tanak stakleni prozor i njihovo zarobljavanje u cijevi za pražnjenje omogućilo je istraživačima proučavanje spektra emisije zarobljenih čestica i na kraju dokazalo da su alfa čestice jezgre helija. Drugi eksperimenti su pokazali da su beta zračenje, koje je rezultat raspadanja i katodnih zraka, bili elektroni velike brzine. Isto tako, utvrđeno je da su gama zračenje i X-zrake elektromagnetsko zračenje visoke energije [9].

Počeo se ispitivati i odnos između tipova raspadanja: na primjer, gotovo uvijek je otkriveno da je gama raspad povezan s drugim vrstama raspadanja, a dogodio se otprilike u isto vrijeme ili kasnije. Otkriveno je da je gama raspad kao zaseban fenomen, s vlastitim poluraspadom (koji se sada naziva izomerni prijelaz), u prirodnoj radioaktivnosti rezultat gama raspada pobuđenih metastabilnih nuklearnih izomera, koji su zauzvrat nastali iz drugih vrsta raspada.

Iako su najčešće pronađena alfa, beta i gama zračenja, na kraju su otkrivene i druge vrste emisije. Ubrzo nakon otkrića pozitrona u produktima kozmičkih zraka, shvatilo se da isti proces koji djeluje u klasičnom beta raspadu također može proizvesti pozitron (emisija pozitrona), zajedno s neutrina (klasični beta raspad proizvodi antineutrine).

U uobičajenijem analognom procesu, zvanom hvatanje elektrona, pronađeno je da neki nuklidi bogati protonima hvataju vlastite atomske elektrone umjesto emitiranja pozitrona, a zatim ti nuklidi emitiraju samo neutrin i gama zrake iz pobuđene jezgre (i često također Auger elektroni i karakteristične X-zrake, kao rezultat preuređivanja elektrona kako bi se popunilo mjesto nedostajućeg zarobljenog elektrona). Ove vrste raspada uključuju nuklearno hvatanje elektrona ili emisiju elektrona ili pozitrona, te tako djeluje na pomicanje jezgre prema omjeru neutrona i protona koji ima najmanju energiju za dani ukupan broj nukleona. To posljedično proizvodi stabilniju (nižu energiju) jezgru [8].



Slika 2. Radijacija tijekom čovjekovog života

Izvor: <https://www.radio-banovina.hr/odakle-dolazi-ionizirajuće-zračenje-i-koliko-je-bezopasno-za-čovjeka/>

Slika 2. prikazuje svu radijaciju tijekom života čovjeka. Također je prikazano da većina radijacija dolazi iz medicine odnosno medicinskih usluga i pregleda.

Hipotetski proces hvatanja pozitrona, analogan hvatanju elektrona, teoretski je moguć u atomima antimaterije, ali nije uočen, budući da složeni atomi antimaterije izvan antihelija

nisu eksperimentalno dostupni, kao berilij-7, koji je najlakši poznati izotop normalne materije koji se raspada hvatanjem elektrona.

Ubrzo nakon otkrića neutrona 1932., Enrico Fermi je shvatio da određene rijetke reakcije beta-raspada odmah daju neutrone kao dodatnu česticu raspada, takozvanu beta-odgođenu emisiju neutrona. Emisija neutrona obično se događa iz jezgri koje su u pobuđenom stanju, kao što je pobuđeni  $^{17}\text{O}$  koji nastaje beta raspadom  $^{17}\text{N}$ . Sam proces emisije neutrona kontrolira nuklearna sila i stoga je iznimno brz, ponekad se naziva "gotovo trenutni". Izolirana emisija protona na kraju je uočena u nekim elementima [2].

Također je utvrđeno da neki teški elementi mogu biti podvrgnuti spontanoj fisiji u produkte različitog sastava. U fenomenu zvanom raspad klastera, utvrđeno je da se specifične kombinacije neutrona i protona osim alfa čestica (jezgre helija) spontano emitiraju iz atoma.

Utvrđeno je da druge vrste radioaktivnog raspada emitiraju prethodno viđene čestice, ali putem različitih mehanizama. Primjer je unutarnja pretvorba, koja rezultira početnom emisijom elektrona, a zatim često daljnjim karakterističnim X-zrakama i emisijama Augerovih elektrona, iako unutarnji proces pretvorbe ne uključuje ni beta ni gama raspad. Neutrino se ne emitira, a niti jedan od emitiranih elektrona i fotona ne potječe iz jezgre, iako energija za emitiranje svih njih potječe tamo. Unutarnji pretvorbeni raspad, poput izomernog prijelaznog gama raspada i emisije neutrona, uključuje oslobađanje energije pobuđenim nuklidom, bez transmutacije jednog elementa u drugi.

Poznati su rijetki događaji koji uključuju kombinaciju dva događaja tipa beta-raspada koji se događaju istovremeno. Dopusšteno je da se dogodi bilo koji proces raspada koji ne krši zakone očuvanja energije ili količine gibanja (i možda druge zakone očuvanja čestica), iako nisu svi otkriveni.

Zanimljiv primjer o kojem se raspravlja u posljednjem odjeljku je beta raspad renija-187 u vezanom stanju. U ovom procesu, beta-elektronski raspad matičnog nuklida nije praćen emisijom beta-elektrona, jer je beta-čestica zarobljena u K-ljusku atoma koji emitira. Emitira se antineutrino, kao i kod svih negativnih beta raspada. Radionuklidi mogu proći kroz niz različitih reakcija. Jezgra s masenim brojem  $A$  i atomskim brojem  $Z$  predstavljena je kao  $(A, Z)$ . Stupac "Kćerinska jezgra" označava razliku između nove

jezgre i izvorne jezgre. Dakle,  $(A - 1, Z)$  znači da je maseni broj jedan manji nego prije, ali je atomski broj isti kao prije [8].

Ako su energetske okolnosti povoljne, određeni radionuklid može proći kroz mnoge konkurentne vrste raspada, pri čemu se neki atomi raspadaju jednim putem, a drugi drugim putem. Primjer je bakar-64, koji ima 29 protona i 35 neutrona, koji se raspada s vremenom poluraspada od 12,7004(13) sati. Ovaj izotop ima jedan nespareni proton i jedan nespareni neutron, dakle ili proton ili neutron se može raspasti na drugu česticu, koja ima suprotan izospin. Ovaj određeni nuklid vjerojatnije će se raspasti kroz beta plus raspad nego kroz hvatanje elektrona [9].

Pobuđena energetska stanja koja proizlaze iz tih raspada koji ne završavaju u osnovnom energetskom stanju, također proizvode kasniju unutarnju pretvorbu i gama raspad u gotovo 0,5% vremena.

Češće je kod teških nuklida natjecanje između alfa i beta raspada. Nuklidi kćeri će se tada normalno raspasti kroz beta ili alfa, da bi završili na istom mjestu.

Radioaktivni raspad rezultira smanjenjem zbrojene mase mirovanja, nakon što je oslobođena energija (energija dezintegracije) na neki način pobjegla. Iako se energija raspada ponekad definira kao povezana s razlikom između mase matičnih nuklidnih proizvoda i mase proizvoda raspada, to vrijedi samo za mjerenja mase mirovanja, gdje je dio energije uklonjen iz sustava proizvoda. To je točno jer energija raspada mora uvijek sa sobom nositi masu, gdje god se pojavila (vidi masu u specijalnoj relativnosti) prema formuli  $E = mc^2$  [1].

Radioaktivni raspad (također poznat kao nuklearni raspad, radioaktivnost, radioaktivni raspad ili nuklearna dezintegracija) je proces kojim nestabilna atomska jezgra gubi energiju zračenjem. Materijal koji sadrži nestabilne jezgre smatra se radioaktivnim. Tri najčešće vrste raspada su alfa raspad ( $\alpha$ -raspad), beta raspad ( $\beta$ -raspad) i gama raspad ( $\gamma$ -raspad), od kojih svi uključuju emitiranje jedne ili više čestica. Slaba sila je mehanizam koji je odgovoran za beta raspad, dok druge dvije upravljaju elektromagnetizam i nuklearna sila [13].

Radioaktivni raspad je stohastički (tj. slučajni) proces na razini pojedinačnih atoma. Prema kvantnoj teoriji, nemoguće je predvidjeti kada će se određeni atom raspasti, bez obzira na to koliko dugo atom postoji. može se izraziti kao konstanta raspada ili kao

vrijeme poluraspada. Vrijeme poluraspada radioaktivnih atoma ima ogroman raspon; od gotovo trenutnog do daleko duljeg od starosti svemira.

Nasuprot tome, postoje procesi radioaktivnog raspada koji ne rezultiraju nuklearnom transmutacijom. Energija pobuđene jezgre može se emitirati kao gama zraka u procesu koji se naziva gama raspad, ili se ta energija može izgubiti kada jezgra stupi u interakciju s orbitalnim elektronom uzrokujući njegovo izbacivanje iz atoma, u procesu koji se naziva unutarnja pretvorba. Druga vrsta radioaktivnog raspada rezultira proizvodima koji variraju, pojavljujući se kao dva ili više "fragmenata" izvorne jezgre s nizom mogućih masa [8].

Ovaj raspad, nazvan spontana fisija, događa se kada se velika nestabilna jezgra spontano podijeli na dvije (ili povremeno tri) manje jezgre kćeri, i općenito dovodi do emisije gama zraka, neutrona ili drugih čestica iz tih proizvoda. Nasuprot tome, proizvodi raspada iz jezgre sa spinom mogu biti raspoređeni ne - izotropno u odnosu na taj smjer vrtnje. Bilo zbog vanjskog utjecaja kao što je elektromagnetsko polje, ili zbog toga što je jezgra nastala u dinamičkom procesu koji je ograničavao smjer njezina okretanja, anizotropija se može detektirati. Takav proces mogao bi biti prethodni raspad ili nuklearna reakcija.

Energija raspada se u početku oslobađa kao energija emitiranih fotona plus kinetička energija masivnih emitiranih čestica (odnosno čestica koje imaju masu mirovanja). Ako te čestice dođu u toplinsku ravnotežu sa svojom okolinom i fotoni se apsorbiraju, tada se energija raspada pretvara u toplinsku energiju, koja zadržava svoju masu.

Energija raspada, dakle, ostaje povezana s određenom mjerom mase raspadnog sustava, koja se naziva nepromjenjiva masa, koja se ne mijenja tijekom raspada, iako je energija raspada raspoređena među česticama raspada. Energija fotona, kinetička energija emitiranih čestica, a kasnije i toplinska energija okolne tvari, sve doprinosi nepromjenjivoj masi sustava [8].

Dakle, dok se zbroj masa mirovanja čestica ne čuva u radioaktivnom raspadu, masa sustava i invarijantna masa sustava (i također ukupna energija sustava) se čuvaju tijekom bilo kojeg procesa raspada. Ovo je ponavljanje ekvivalentnih zakona održanja energije i održanja mase.

### 3. IZVORI IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

#### 3.1. Alfa čestice

Utvrđeno je da su  $\alpha$  zrake slične kanalnim zrakama, stoga su korpuskularne prirode. Budući da se sastoje od pozitivno nabijenih čestica, razumljivo je da se odbijaju u električnom i magnetskom polju prema istim zakonima kao i kanalne zrake. Rutherford je to zaključio na temelju činjenice da je primjenom Thomsonove metode mogao odrediti njihov specifični naboj  $q_\alpha / m_\alpha$ , gdje je  $q_\alpha$  naboj jedne  $\alpha$  - čestice, a  $m_\alpha$  njegova masa  $4,822.104 \text{ C / g}$ , odnosno  $m_\alpha = 6,636 \cdot 10^{-34} \text{ g}$  i  $m_\alpha = 4m\text{H}$  [1].

Dakle, masa jedne  $\alpha$  - čestice jednaka je četiri puta masa atoma vodika, što odgovara masi jednog atoma helija. Identitet  $\alpha$  - čestica s helijem eksperimentalno su dokazali Rutherford i Royds 1909. godine.

Riječ je o česticama koje se sastoje od dva protona i dva neutrona, što znači da je naboj  $+ 2e$ , a masa im je četiri puta veća od mase protona ili neutrona. Izlaskom iz tvari  $\alpha$  - čestice ioniziraju zrak i tako usporavaju. Imaju relativno nisku prodornu moć pa se mogu zaustaviti listom papira ili aluminijskom folijom debljine 0,06 mm.

Zbog velike mase i relativno male brzine,  $\alpha$  - čestice tvore veliki broj ionskih parova na svom putu kroz zrak uz utrošak određene energije. Put u kojem se ioniziraju naziva se raspon  $\alpha$  - čestica. Na kraju raspona (koji iznosi 3-4 cm)  $\alpha$  - čestice se pretvaraju u neutralne atome helija. Raspon  $\alpha$ -čestica također ovisi o vrsti radioaktivne tvari koja ih emitira [11].

#### 3.2. Beta čestice

Sva ispitivanja su pokazala da se  $\beta$  - zrake ponašaju slično kao i katodne zrake. To je ukazivalo da je njihova priroda ista. Kako bi dokazao sličnost između  $\beta$  i katodnih zraka, Becquerel je izmjerio odklon zraka u električnom i magnetskom polju, te na temelju toga odredio njihovu brzinu kao i naboj. Prema Becquerelu, "ovi rezultati su potpuno iste veličine kao i za katodne zrake." Naknadni rad je pokazao da su  $\beta$  - zrake istovjetne katodnim zrakama struja brzih elektrona [6].

Radioaktivni izvori emitiraju  $\beta$  - čestice brzinom bliskom brzini svjetlosti. Brzine  $\beta$  - čestica su različite ovisno o prirodi radioaktivnog elementa. Oni su znatno propusniji od

$\alpha$  - čestica, pa mogu proći kroz list papira debljine 1 mm dok ih zaustavlja aluminijska ploča debljine 5 mm. Raspon  $\beta$  - čestica u zraku je oko 100 puta veći od  $\alpha$  - čestica. Zanimljivo je da su  $\beta$ -čestice slabiji plinski ionizatori. Njihov je trag na fotografskoj ploči mnogo tanji i duži, pa se po tome lako prepoznaju.

S obzirom na velike brzine kojima se kreću, njihova je masa znatno veća od mase u mirovanju elektrona  $m_0$ , a izračunava se pomoću Einsteinove relacije:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- gdje je:

$m_0$  – masa tijela u mirovanju (kg)

$v$  – brzina tijela koja se giba (m/s)

$c$  - brzina svjetlosti ( $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s)

Energije  $\beta$  - čestica su vrlo različite i ovise o vrsti radioaktivne tvari koja ih emitira. Zbog svoje manje mase odstupaju više od  $\alpha$  - čestica u električnim i magnetskim poljima [11].

### 3.3. Gama zrake

Za razliku od  $\alpha$  i  $\beta$  - zraka, koje imaju korpuskularnu prirodu,  $\gamma$  - zrake su elektromagnetski valovi male valne duljine. Priroda ovog zračenja je ista kao i priroda svjetlosti, samo razlika u valnoj duljini i svojstvima koja su njome uvjetovana. Ove zrake su mnogo prodornije od X-zraka. Mogu proći i kroz olovnu ploču debljine 20 cm. Njihov domet u zraku je mnogo veći od  $\alpha$  i  $\beta$  - zraka, ali je njihova ionizacijska moć mnogo manja. I te su zrake podijeljene na fotografskoj ploči [6].

Iz prethodnog se izlaganja može zaključiti da su  $\alpha$  i  $\beta$  - zrake korpuskularne prirode,  $\alpha$  - zrake su analogne kanalnim zrakama, a  $\beta$  - zrake su katodne. Ova se analogija odnosi samo na njihovu prirodu, ali među njima postoje važne razlike.  $\gamma$  - zrake su analogne X - zrakama, ali među njima postoje značajne razlike.

Radioaktivno zračenje je složene prirode, naime neke su zrake valne, a neke korpuskularne prirode.

### **3.4. Umjetni izvori radioaktivnosti**

U prirodnoj radioaktivnosti imamo primjer spontane transmutacije jednog elementa u drugi. Odmah se postavilo pitanje može li se transmutacija (transformacija) nekog elementa postići na umjetan način.

Rutherford je bio prvi u povijesti koji je napravio takvu promjenu. Istraživao je ovisnost raspona  $\alpha$  - čestica o tlaku i vrsti plina. Godine 1934. bračni par Curie prvi je primio umjetne radioaktivne elemente nakon nuklearnih reakcija. Riječ je o izotopima nekih elemenata kojih u prirodi gotovo da i nema jer im je vrijeme poluraspada vrlo kratko i brzo se pretvaraju u stabilne jezgre [1].

Umjetni radioaktivni elementi imaju primjenu u medicini (radioaktivni jod), poljoprivredi, šumarstvu, prehrambenoj industriji te općenito u znanosti i tehnologiji.



## 4. PRIRODNI IZVORI

Daleko najveći dio zračenja koje prima svjetsko stanovništvo dolazi iz prirodnih izvora. Izloženost većini ovog zračenja je neizbježna. Kroz povijest našeg planeta zračenje na njegovu površinu dolazi iz svemira i iz radioaktivnih materijala koji se nalaze u Zemljinoj kori. Ljudi su ozračeni na dva načina.

Radioaktivne tvari mogu ostati izvan tijela i ozračiti ga izvana, "izvana", ili se mogu udahnuti sa zrakom i progutati s hranom i vodom i tako ozračiti ljude iznutra, "iznutra". No, dok svi stanovnici Zemlje primaju prirodno zračenje, neki apsorbiraju mnogo veće količine od drugih. Može ovisiti o tome tko gdje živi [11].

Doze su na nekim mjestima s posebno radioaktivnim stijenama ili tlom znatno veće od prosjeka; na drugim mjestima su mnogo niže. Koliko će doza netko primiti ovisi o njegovom načinu života. Korištenje posebnih građevinskih materijala za kuće, kuhanje na plin, otvoreni kamin na kojem gori ugljen, izolacija kuće, pa čak i letovi avionom - sve to povećava prirodno zračenje.

U ovom poglavlju prvo se razmatra vanjsko zračenje iz kozmičkih i zemaljskih izvora. Zatim će poglavlje baviti unutarnjim zračenjem, pri čemu će se posebna pozornost posvetiti radonu, radioaktivnom plinu koji je najveći pojedinačni izvor prosječnih doza dobivenih iz prirodnog zračenja. Na kraju će se fokus usmjeriti na neke aktivnosti, počevši od izgaranja ugljena do korištenja gnojiva, koji ispuštaju radioaktivne tvari iz tla i time povećavaju izloženost ljudi zemaljskim izvorima.

### 4.1.1. Kozmičke zrake

Nešto manje od polovice ljudske izloženosti vanjskom prirodnom zračenju dolazi od kozmičkih zraka. (Tako su izračunate doze kozmičkih zraka koje prima osoba koja preleti Atlantik sa nadzvučnim avionom od 40 milisiverta, a podzvučnim avionom prima 50 milisiverta). Većina tih zraka do nas dopire iz dubina međuzvezdanog prostora; neke emitiraju Suci tijekom svojih eksplozija. Kozmičke zrake izravno zrače Zemlju, u interakciji s atmosferom, stvarajući ove vrste zračenja i razne radioaktivne materijale [13].

Nijedno mjesto na Zemlji ne može izbjeći ovaj univerzalni, nevidljivi pljusak. Ali neke dijelove svijeta pogađa jače od drugih. Polovi primaju više zračenja od ekvatorijalnih područja, jer zemaljsko magnetsko polje odbija nabijene čestice sadržane u zračenju. I, što je još važnije, razina zračenja raste s visinom, jer na velikim visinama ima manje zraka koji također djeluje kao štit.

#### **4.1.2. Zemaljsko zračenje**

Glavni radioaktivni materijal u stijenama su kalij-40, rubidij-87 i dvije obitelji radioaktivnih elemenata nastalih raspadom urana-238 i torija-232, dva dugovječna radionuklida koja su ostala na Zemlji od njenog nastanka. Naravno, razine zemaljskog zračenja razlikuju se od mjesta diljem svijeta, jer se koncentracija tih materijala u Zemljinoj kori mijenja. Za većinu ljudi te razlike nisu osobito dramatične [11].

Studije u Francuskoj, Njemačkoj, Italiji, Japanu i Sjedinjenim Državama, na primjer, pokazuju da oko 95 posto ljudi živi u područjima gdje prosječna doza varira od 0,3 do 0,6 milisiverta (tisućinki siverta) godišnje. Ali neki ljudi primaju znatno veće doze; oko 3 posto ljudi izloženo je dozi od jednog milisiverta godišnje, a polovica njih primi više od 1,4 milisiverta godišnje. Postoje mjesta na Zemlji gdje je zračenje sa zemlje još veće. U blizini grada Pisos de Caldas u Brazilu nalazi se brdo na kojem su istraživači izmjerili doze zračenja oko 800 puta veće od prosjeka, mjereći dozu zračenja od 250 mikrosiverta godišnje [6].

Srećom, ovo brdo je nenaseljeno. U Guarapariju na plaži registrirano je zračenje od 175 mikrosiverta godišnje. Radijacija od 17 mikrosiverta godišnje izmjerena je na plaži u Kerali i Tamil Naduu u Indiji, a 400 mikrosiverta godišnje izmjereno je u Ramasaru u Iranu.

#### **4.1.3. Unutrašnje zračenje**

U prosjeku, dvije trećine efektivne ekvivalentne doze koju ljudi primaju iz prirodnih izvora dolazi od radioaktivnih tvari u zraku koji udišu, hrani koju jedu i vodi koju piju. Doista, vrlo malo ove unutarnje doze dolazi od radioaktivnih materijala - kao što su ugljik

i tricij, koji nastaju kozmičkim zračenjem. Gotovo cijela unutarnja doza dolazi iz zemaljskih izvora [1].

Deseci tisuća ljudi na krajnjem sjeveru hrane se uglavnom mesom sobova (ili karibua). Ove koncentracije ova dva radioaktivna materijala, posebice polonija, nalaze se u tijelu ovih životinja, jer zimi pasu lišajeve u kojima se te radioaktivne tvari nakupljaju.

Događa se da tijelo stanovnika ovih krajeva prima količine polonija koje su i do 35 puta veće od normalnih. U međuvremenu, na drugom kraju svijeta, ljudi koji žive u uranom bogatom području zapadne Australije primaju doze zračenja i do 75 puta veće od uobičajenih jedući meso i iznutrice ovaca i klokana [6].

Radioaktivne matrice poput ovih često prolaze obilaznim putevima kroz prirodni okoliš prije nego dođu do ljudi. Takvi se putovi ili putovi često uzimaju u obzir pri izračunu doza primljenih iz pojedinačnih izvora.

#### **4.1.4. Radon**

Znanstvenici su tek nedavno počeli shvaćati da je najvažniji od svih izvora prirodnog zračenja nevidljivi plin bez okusa i mirisa, sedam i pol puta teži od zraka, nazvan radon. Procjenjuje se da, zajedno sa svojim "kćerima" - radionuklidima nastalim tijekom njegovog radioaktivnog raspada - radon normalno doprinosi oko tri četvrtine godišnje efektivne ekvivalentne doze koju pojedinci primaju iz zemaljskih izvora - i oko polovice tih doza koje primaju iz svojih prirodnih kombinirani izvori. Većinu tih doza primaju udisanjem radionuklida, osobito u zatvorenom prostoru [11].

Širom svijeta radon izbija iz zemlje, ali razina zračenja na otvorenom znatno varira od mjesta do mjesta. Ipak, koliko god to paradoksalno izgledalo, ljudi su najviše izloženi radonu u zatvorenom prostoru. U dijelovima svijeta s umjerenom klimom koncentracije radona su oko osam puta veće u zatvorenom prostoru nego na otvorenom. U tropskim zemljama nisu vršena mjerenja, ali kako je tamo topla klima, zgrade su puno otvorenije, pa vjerojatno nema velike razlike između koncentracija radona iznutra i izvana.

U kasnim 1970-ima zabilježene su koncentracije 5000 puta veće od tipičnih razina vanjskog zračenja u stanovima u Švedskoj i Finskoj. Postoje primjeri koncentracija 500 puta viših od tipičnih vanjskih razina u Britaniji i Sjedinjenim Državama, a razine radona

od tada su zabilježene u nekim od dviju zemalja, najviše u Skandinaviji. Uz povećanje broja stanova u kojima su obavljena takva mjerenja, porastao je i broj onih za koje je utvrđeno da sadrže ekstremne koncentracije radona.

## 5. NEGATIVNE POSLJEDICE RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA

### 5.1. Izvori radioaktivnog zagađenja

Radioaktivnost je svojstvo jezgri atoma nekih elemenata da spontano emitiraju složeno zračenje, pri čemu jezgre koje zrače prelaze u druge, tako da na kraju nastaje stabilan element. Ova se definicija odnosi i na prirodnu i na umjetnu radioaktivnost. Kad je riječ o prirodnoj radioaktivnosti, čovjek je promatrač, utvrđuje i analizira pojavu, dok je umjetna radioaktivnost uzrokovana eksperimentiranjem [11].

Radioaktivnost je nuklearni, a ne atomski fenomen, jer se odvija u jezgri atoma. Do danas je poznato šezdesetak prirodno radioaktivnih elemenata i svi imaju atomski broj veći od 84 (polonij).

Radioaktivnost je spontana i jezgre se raspadaju u jedinici vremena. Ovo razdoblje je različito za različite elemente. Emisija zračenja traje sve dok jezgra ne zrači, a kada postane stabilna, proces se zaustavlja, jer jezgra više ne zrači. Čovjek i priroda u cjelini nalaze se u stalnom radioaktivnom okruženju. To je posljedica prirodne radioaktivnosti.

Četiri su glavna faktora radioaktivnosti: kozmičko zračenje (fotoni, protoni, elektroni, mezoni); onečišćenje u tlu i atmosferi (prirodne radioaktivne stijene); tvari sadržane u ljudskom tijelu (kalij-40, tragovi radija i njegovih produkata i ugljik-14) i nuklearni otpad (nastao nuklearnim eksplozijama). Imaju, uglavnom, kratko vrijeme poluraspada, ali ima i onih s dugim periodom, kao što su ugljik-14 (5700 godina), cezij-137 (30 godina), stroncij-90 (28 godina), prometeum-147 (dvije godine), rutenij-106 (jedna godina) [6].

Za radioaktivne pojave vrijede sljedeći zakoni:

- I zakon – Ljudska osjetila ne mogu otkriti radioaktivnost.
- Zakon II – Biološki učinci zračenja nisu trenutni. Održavaju se na organizmima i primjećuju se promjene na ozračenoj jedinki ili se taj učinak uočava samo na potomstvu.
- Zakon III – Radioaktivnost opada s vremenom. Vrijeme poluraspada (period T) radioaktivnog elementa je vrijeme potrebno da se aktivnost smanji za polovicu. Razdoblje T može biti od djelića sekunde do nekoliko milijardi godina. Svaki radioaktivni element ima svoje karakteristično razdoblje T po kojem se identificira. Nestabilne jezgre nazivaju se radionuklidi [1].

Globalna radioaktivna kontaminacija biosfere uzrokovana je brojnim nuklearnim pokusima. Od 1945. do 1963. izvedeno je oko 365 nadzemnih nuklearnih pokusa. Procjenjuje se da je u tom razdoblju emitirano 217 Mg fisijskog materijala. Između 1957. i 1985. dogodila se 151 nuklearna nesreća u četrnaest zemalja u energetske i eksperimentalnim nuklearnim postrojenjima. No, četiri nuklearne nesreće ističu se po posljedicama na širi okoliš i opasnosti od zračenja za stanovništvo: Windscale - Engleska, 1957.; Kišinjev - SSSR, 1957.; Otok tri milje - SAD, 1979.; i Černobil - SSSR, 1986 [11].

Pedesetih godina ovog stoljeća američki, a potom i sovjetski autori započeli su istraživanje radionuklida u tlu. U Commonwealthu nezavisnih država otvorena je posebna škola koja se bavi podijatrijskom radioekologijom.

Ispitivanja radionuklida u mnogim područjima bivše Jugoslavije pokazala su da je nakon černobilske katastrofe došlo do kontaminacije pojedinih područja, ali se to za sada ne smatra alarmantnim. No, potrebno je stalno pratiti sve radioaktivne elemente, pogotovo jer oni mogu dospjeti u biljke koje se koriste za prehranu ljudi i životinja. Posljedice takvog unosa mogu biti nesagledive ne samo za izravne konzumente nego i za potomstvo [11].

Danas se mnogo govori i piše o povećanju radioaktivnog radija koji dopiše u tlo gnojidbom mineralnim gnojivima, posebice fosforom. Do ovog zaključka došlo se nakon saznanja da prirodni fosforiti koje uvoze tvornice mineralnih gnojiva sadrže radioaktivni radij. Međutim, također je poznato da je radioaktivni radij prisutan u različitim količinama u pojedinim fosforitima, ovisno o mjestu.

Smatra se da neki uvozni fosforiti nisu sadržavali velike količine radioaktivnog radija, pa su količine unesene gnojivima zanemarive. Sigurno je da su ti testovi i dalje aktualni na svim područjima i da ih je još potrebno provesti.

## 5.2. Radioaktivno onečišćenje okoliša

Biološki učinci zračenja uzrokovani su apsorpcijom energije u tkivima, a uzrokovani su ionizacijom tkiva, odnosno stanica kroz koje zračenje prolazi. Štetno djelovanje je dvojako: jedno se odnosi na izravno ozračeni organizam (somatski učinci), a drugo na potomstvo (nasljedni ili genetski učinci). Zračenje je štetno za živu tvar [13].

Pri razmatranju učinaka zračenja treba imati na umu da su radioaktivne tvari najotrovnije tvari u prirodi. Čak i pri malim dozama zračenje uzrokuje promjene koje dovode do raka. U malim dozama zračenje može uništiti stanice, oštetiti organe i uzrokovati smrt. Štetni učinci visokih doza zračenja očituju se u roku od nekoliko sati ili dana. Međutim, potrebne su godine, čak i desetljeća da se rak pojavi.

Kada radioaktivni izotopi dospiju u okoliš, vrlo se brzo raspršuju i razrjeđuju, te se mogu koncentrirati u živim organizmima, a zatim dalje prenijeti u lance ishrane ili uključiti u ciklus unutar prirodnih biokemijskih ciklusa. Radioaktivne tvari se mogu nakupljati u vodi, tlu, sedimentima ili zraku. Koncentracije su općenito veće u vodenim nego u kopnenim ekosustavima, jer je protok hranjivih tvari u vodi brži nego u tlu [11].

Dodatno radioaktivno zračenje javlja se kao posljedica eksperimentalnih eksplozija atomskih bombi, posebice onih u atmosferi. Radioaktivna prašina koja pada na tlo nakon atomske eksplozije naziva se radioaktivnim padavinama. Te se tvari miješaju s prirodnim tvarima u obliku čestica i onečišćenja zraka čovjeka, dopirući izravno ili neizravno, putem prehrambenih lanaca, do čovjeka. Na dodatno radioaktivno zračenje utječu i nuklearne elektrane. Iz njih, putem ispuštenog zraka, vode ili čvrstog radioaktivnog otpada, radioaktivne tvari mogu dospjeti u okolni okoliš.

Posebnu opasnost za živi svijet predstavljaju nuklearne nesreće (nuklearni incidenti), koji se najčešće događaju zbog iznenadnih kvarova ili slučajnih oštećenja nuklearnih elektrana. U većini slučajeva nastaju pukotine u samom nuklearnom reaktoru, ali može doći do pukotina u rashladnim cijevima u parogeneratoru ili korozije parnih cijevi koje spajaju parogenerator i turbinu. U sva tri slučaja radioaktivna para i voda dospiju u okoliš.

Usljed neposrednih posljedica nesreće u Černobilu život je izgubilo tridesetak ljudi, a ozračeno je oko pet milijuna ljudi. Od tog broja, najmanje 100.000 ljudi našlo se na izravnom putu radioaktivnog oblaka i zbog naknadnih posljedica zračenja morat će doživotno biti pod zdravstvenom kontrolom. Procjenjuje se da će više od 70.000 ljudi biti

žrtve raka i leukemije. Tijekom ove nesreće zatrovano je (kontaminirano) oko 8.000 km<sup>2</sup> zemljišta [7].

Od radioaktivnih izotopa koji nastaju bilo tijekom pokusa s nuklearnim oružjem ili tijekom nesreća na nuklearnim reaktorima, određeni broj dospijeva, izravno ili neizravno, kroz prehrambeni lanac u ljudsko tijelo. Tijekom nuklearne reakcije velika količina radionuklida s dovoljno dugim poluživotom lako se apsorbira u tkiva organizma.

Činjenica da do danas u svijetu postoji više od 450 nuklearnih elektrana i preko 300 eksperimentalnih reaktora ozbiljno upozorava na potencijalne opasnosti od slučajnih oštećenja.

Uklanjanje nuklearnog otpada koji nastaje korištenjem nuklearne energije veliki je ekološki, tehnološki i zdravstveni problem. Postoje tri osnovne skupine radioaktivnog otpada:

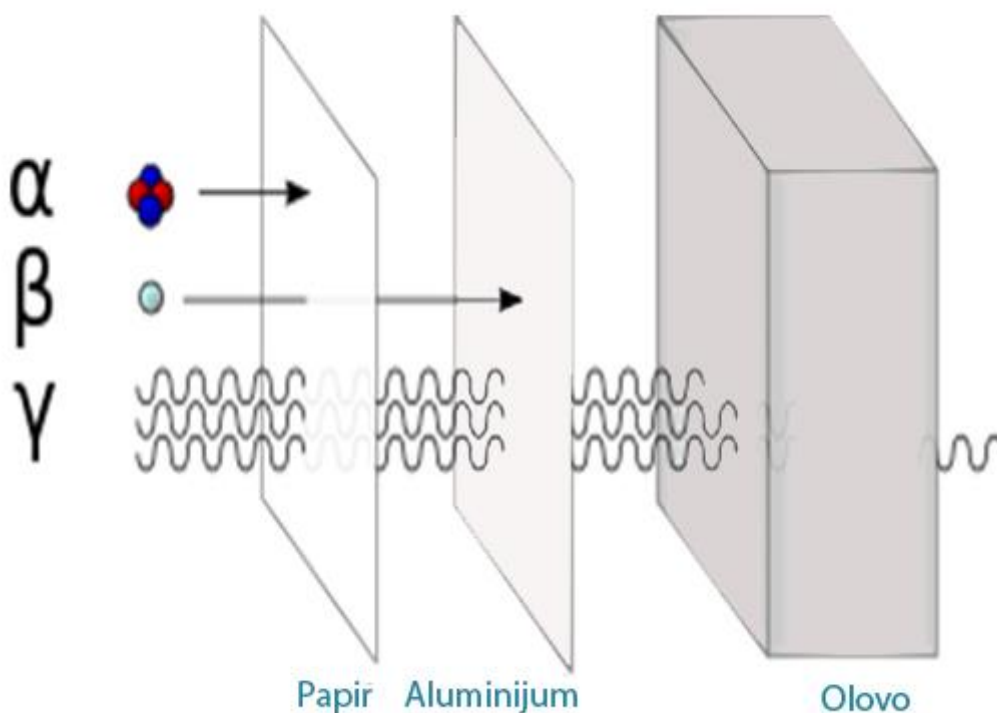
- visokoaktivan otpad u tekućem ili krutom stanju, vrlo opasan za žive organizme i okoliš zbog ogromne energije koju oslobađaju (npr. istrošeno nuklearno gorivo i reaktori);
- otpad srednje aktivnosti, koji može uzrokovati lokalnu štetu, ali čije je odvajanje i korištenje radioaktivnih sastojaka neisplativo (iskorišteni izvori ionizirajućeg zračenja - radioaktivni gromobrani, medicinski i industrijski izvori zračenja);
- niskoaktivni otpad velikog volumena u tekućem, krutom ili plinovitom stanju, što otežava njihovo skladištenje, a najčešće se ispušta u okoliš (mulj, filteri, kontaminirana odjeća i obuća i sl.) [11].

Radioaktivni otpad obično se odlaže u zaštićene spremnike i skladišti u dubljim slojevima Zemljine kore ili na morskom dnu. No, sve su to samo privremene mjere, dok se intenzivno radi na pronalaženju trajnih rješenja za njihovo sigurno zbrinjavanje.



### 5.3. Kontrola i zaštita od zračenja

Valja istaknuti da nema bezazlenih zračenja, ali i da se posljedice zračenja mogu pojaviti tek nakon dužeg vremena ili naslijeđem, u sljedećim generacijama. Razumljivo je da se čovjek može osloboditi utjecaja svih zračenja, posebno onih koja dolaze iz prirode.



Slika 3. Prikaz zračenja kroz materijale

Izvor: <http://www.fizika5.net/index.php/linkovi/35-kategorije/izrada-skolskih-panoa/63-pano-radioaktivnost>

Slika 3. prikazuje zračenja kroz materijale, jasno je vidljivo da zračenje najlakše prodire kroz papir, zatim kroz aluminij, a najteže prolazi kroz olovo.

Međutim, za osobe koje su profesionalno izložene manjim ili većim dozama zračenja treba poduzeti sve mjere za smanjenje rizika i štetnih posljedica. Radi bolje kontrole najčešće se određuju najveće dopuštene doze za osobe koje su profesionalno izložene zračenju.

Metode apsorpcije (inhalacija, dermalna ili dermalna probava) također treba uzeti u obzir prilikom procjene rizika od izlaganja, kako bi se poduzele odgovarajuće mjere opreza.

Zaštita od zračenja ostvaruje se unutar dvije osnovne vrste - zaštite od zračenja i zaštite od radioaktivne kontaminacije [11].

Zaštita od vanjskog zračenja u principu se provodi smanjenjem doze zračenja na minimum. To se može postići:

zaštitom od vremenskih nepogoda (tj. što kraće u blizini izvora zračenja),

zaštitom na daljinu (ostajanje što dalje od izvora) ili

zaštitom apsorbera (koristeći deblje zaštitne slojeve, od zemlje, beton, olovo itd.) [10].

Zaštita od radioaktivne kontaminacije (onečišćenja) sastoji se u poduzimanju odgovarajućih mjera kojima se osigurava da radioaktivne tvari ne dođu u izravan dodir sa živim organizmima i ne prodiru u okolni okoliš.

Budući da čovjek ne može osjetiti zračenje, potrebno je uvesti mjere redovite kontrole životinja (monitoring sustav) pri radu s radioaktivnim tvarima, kao i apsorbiranih doza kod osoba izloženih zračenju. Osim navedenog, potrebno je koristiti osobnu opremu i zaštitne uređaje, a gdje je to moguće, ljude treba izložiti zračenju povećanjem korištenja automatike i robotike.

## 6. ZAKLJUČAK

Pojam zračenja označava ionizirajuće i neionizirajuće (UV, elektromagnetno, lasersko) zračenje. Čovjek je oduvijek živio u uvjetima izloženosti zračenju kozmosa, sunca, zemlje, pa čak i vlastitog tijela. U prošlom stoljeću ljudi su naučili koristiti zračenje u medicini, industriji i znanosti.

Radioaktivnost je izraz koji se koristi za opisivanje prirodnog procesa kojim se neki atomi spontano raspadaju, emitirajući i čestice i energiju dok se transformiraju u različite, stabilnije atome. Ovaj proces, koji se također naziva radioaktivni raspad, događa se jer se nestabilni izotopi teže transformirati u stabilnije stanje.

Zračenje je zapravo energija i može doći od nestabilnih atoma koji su podvrgnuti radioaktivnom raspadu ili ga mogu proizvesti strojevi. Zračenje putuje od svog izvora u obliku energetske valova ili čestica pod energijom. Postoje različiti oblici zračenja i imaju različita svojstva i učinke.

Postoje dvije vrste zračenja: neionizirajuće zračenje i ionizirajuće zračenje.

Neionizirajuće zračenje ima dovoljno energije da pomiče atome u molekuli okolo ili uzrokuje njihovo vibriranje, ali ne dovoljno da ukloni elektrone iz atoma. Primjeri ove vrste zračenja su radio valovi, vidljiva svjetlost i mikrovalovi.

Ionizirajuće zračenje ima toliko energije da može izbaciti elektrone iz atoma, što je proces poznat kao ionizacija. Ionizirajuće zračenje može utjecati na atome u živim bićima, pa predstavlja zdravstveni rizik oštećujući tkivo i DNK u genima.

Ionizirajuće zračenje dolazi od rendgenskih strojeva, kozmičkih čestica iz svemira i radioaktivnih elemenata. Radioaktivni elementi emitiraju ionizirajuće zračenje dok njihovi atomi prolaze radioaktivno raspadanje.

Radioaktivnost se mjeri u smislu dezintegracije, odnosno raspada, po jedinici vremena. Uobičajene jedinice radioaktivnosti su Becquerel, jednak 1 raspadu u sekundi, i Curie, jednak 37 milijardi raspada u sekundi.

Pokazalo se da, osim velike koristi, zračenje može predstavljati opasnost za ljude i okoliš. Stoga je potrebno poduzeti odgovarajuće mjere zaštite

Područje zaštite od zračenja u svijetu se neprestano razvija. Postoji nekoliko važnih međunarodnih institucija koje se bave ovim područjem, kao što su Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (ICRP), Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA), Znanstveni odbor Ujedinjenih naroda za učinke atomskog zračenja (UNSCEAR) i Svjetsko zdravstvo Organizacija (WHO). Postavili su moderni koncept zaštite od zračenja koji je prihvaćen u našoj zemlji.

## 7. LITERATURA

- [1] Brenner, D.J. and Hall, E.J. (2007) Computed Tomography – An Increasing Source of Radiation Exposure. *New England Journal of Medicine*, str. 357-387
- [2] Brodsky, A. (1978) *Handbook of Radiation Measurement and Protection*, Boca Raton, CRC Press,
- [3] Eisenbud M. and T. Gesell. (1997) *Environmental Radioactivity From Natural, Industrial and Military Sources*, 4th Edition, Academic Press,
- [4] Boban M. (2014) *Biološki učinci i frakcioniranje radioterapije*. Odjel zdravstvenih studija Split,
- [5] Cherry, R. S., Sorenson, J. A., Phelps, M. E. (2003) *Physics in Nuclear Medicine*, Saunders,
- [6] Grasty, R.L. and LaMarre, J.R. (2004) The Annual effective dose from natural sources of ionizing radiation in Canada. *Radiation Protection Dosimetry* 108, str. 215-226.
- [7] Dželalija M. (2006) *Ionizirajuće zračenje u biosferi*, Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet,
- [8] Hebrang, A., Klarić-Čustović, R. (2007) *Radiologija*, Medicinska naklada, Zagreb,
- [9] Jakobović Z. (1991) *Ionizirajuće zračenje i čovjek*, Školska knjiga, Zagreb,
- [10] Janković S. (2014) *Biološki učinci ionizirajućeg zračenja*. Medicinski fakultet u Splitu,
- [11] Novaković M. (2001) *Zaštita od ionizirajućih zračenja: propisi u Republici Hrvatskoj s komentarima*, Ekoteh-dozimetrija, Zagreb,
- [12] Weitz, L. (2009) *An Introduction to Radioactivity*, Nuclear Medicine Department, Manchester Royal Infirmary.

Popis slika

Slika 1. Izvori radijacije.....	8
Slika 2. Radijacija tijekom čovjekovog života.....	10
Slika 3. Prikaz zračenja kroz materijale.....	25