

# Radioaktivnost

---

**Rabak, Valentina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:981302>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Valentina Rabak**

**Radioaktivnost**

**Završni rad**

**Rijeka, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski sveučilišni studij građevinarstva  
Fizika**

**Valentina Rabak  
JMBAG: 0082056668**

**Radioaktivnost**

**Završni rad**

**Rijeka, srpanj 2024.**

## **IZJAVA**

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Valentina Rabak

U Rijeci, 15. srpnja 2024.



## **SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI**

Radioaktivnost je pojava u kojoj dolazi do spontanog raspada atomskih jezgri radioaktivnih elemenata u energetski stabilnije atomske jezgre, uz oslobađanje energije. Takva je energija važan čimbenik u reakcijama poput nuklearne fisije i fuzije koje će u budućnosti imati veliku primjenu za proizvodnju električne energije. Postoje prirodni izvori radioaktivnosti kojima su svakodnevno izloženi svi ljudi, ali oni nisu toliko štetni za ljudsko zdravlje jer se pojavljuju u malim količinama. Umjetni izvori radioaktivnosti rezultat su napretka tehnologije te imaju važnu primjenu u medicini, industriji i ostalim granama tehnike i tehnologije te su osmišljene u svrhu poboljšanja kvalitete ljudskog života.

Ključne riječi: radioaktivnost, fisija, fuzija, prirodni izvori radioaktivnosti, umjetni izvori radioaktivnosti

## **ABSTRACT AND KEY WORDS**

Radioactivity is a phenomenon in which the atomic nuclei of radioactive elements spontaneously decay into energetically more stable atomic nuclei, with the release of energy. Such energy is an important factor in reactions such as nuclear fission and fusion, which will be widely used in the future for the production of electricity. There are natural sources of radioactivity to which all people are exposed on a daily basis, but they are not so harmful to human health because they appear in small amounts. Artificial sources of radioactivity are the result of technological progress and have important applications in medicine, industry and other branches of technique and technology, and are designed for the purpose of improving the quality of human life.

Key words: radioactivity, fission, fusion, natural sources of radioactivity, artificial sources of radioactivity

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POJAM RADIOAKTIVNOSTI.....	2
2.1. Povijesni pregled.....	2
2.2. Teoretske osnove radioaktivnosti.....	7
2.3. Nuklearne reakcije.....	9
2.3.1. Nuklearna fisija.....	9
2.3.2. Nuklearna fuzija.....	10
2.4. Zakon radioaktivnog raspada.....	12
2.5. Vrste radioaktivnih raspada.....	15
2.5.1. Alfa raspad.....	15
2.5.2. Beta raspad.....	17
2.5.3. Gama raspad.....	19
3. MJERENJE RADIOAKTIVNOSTI.....	21
3.1. Mjerne jedinice.....	21
3.2. Mjerni instrumenti.....	22
4. PRIRODNI I UMJETNI IZVORI RADIOAKTIVNOSTI.....	25
4.1. Prirodni izvori radioaktivnosti.....	25
4.1.1. Kozmičko zračenje.....	26
4.1.2. Zemaljsko zračenje.....	27
4.1.3. Radon.....	29
4.1.4. Radioaktivnost iz hrane.....	30
4.2. Umjetni izvori radioaktivnosti.....	31
4.2.1. Radioaktivnost u medicini.....	31
4.2.2. Radioaktivnost u industriji.....	32
5. ZAKLJUČAK.....	35
6. LITERATURA.....	36

## **POPIS TABLICA:**

Tablica 1. Vrijeme poluraspada određenih izotopa [33]

Tablica 2. Sadržaj kalija-40 u hrani [74]

## **POPIS SLIKA:**

Slika 1: Prva rendgenska slika ljudske ruke koju je napravio Wilhelm Roentgen [2]

Slika 2: Marie Curie u svom laboratoriju [5]

Slika 3: Bohrov model atoma [10]

Slika 4: Prva električna struja dobivena je nuklearnim reaktorom EBR-1 [17]

Slika 5: Proces nuklearne fisije [25]

Slika 6: Proces nuklearne fuzije [29]

Slika 7: Graf koji prikazuje vrijeme poluraspada [33]

Slika 8: Alfa raspad jezgre [34]

Slika 9: Prodori različitih vrsta zračenja kroz određene materijale [37]

Slika 10: Primjeri beta minus i beta plus raspada [46]

Slika 11: Gama raspad [52]

Slika 12: Princip rada Geiger-Müllerovog brojača [58]

Slika 13: Način rada poluvodičkog detektora [59]

Slika 14: Udjeli izloženosti prirodnoj radioaktivnosti na svjetskoj razini [62]

Slika 15: Prikaz kozmičkog zračenja [65]

Slika 16: Udjeli urana u ppm (eng. *parts per million*) u pojedinim vrstama stijena [69]

Slika 17: Načini ulaska plina radona u stambene objekte [73]



Slika 18: Primjena radioizotopa u nuklearnoj medicini za liječenje raka [79]

Slika 19: Dijelovi nuklearnog reaktora [81]

Slika 20: Kontrola debljine metalnih ploča u industriji [79]

## 1. UVOD

Radioaktivnost je fizikalna pojava u kojoj dolazi do spontanog raspada atomskih jezgri radioaktivnih elemenata u energetski stabilnije atomske jezgre uz usputno oslobađanje energije. Otkriće radioaktivnosti i rana povijest obilježile su kraj 19. i početak 20. stoljeća. Brojni fizičari su početkom 20. stoljeća bili uključeni u razna istraživanja sastava atomske jezgre i procesa vezanih za nuklearno zračenje. Otkrićem nuklearne fisije i fuzije u prvoj polovici 20. stoljeća napravljen je značajan korak u razvoju nuklearne fizike. Te su nuklearne reakcije služile za dobrobit čovječanstva u smislu proizvodnje električne energije, ali i za destrukciju kada govorimo o atomskoj bombi.

Nakon kratkog povijesnog pregleda, u radu će biti definirani osnovni pojmovi vezani uz radioaktivnost, nuklearne reakcije kao što su fisija i fuzija, zakon radioaktivnog raspada i vrste radioaktivnog zračenja. Spomenut će se i način mjerenja radioaktivnosti, mjerne jedinice i princip rada najčešćih instrumenata koje služe za mjerenje radioaktivnosti.

U svakodnevnom životu postoje prirodni izvori radioaktivnosti koji podjednako utječu na ljudsku populaciju diljem cijele Zemlje, ali je čovjek razvojem tehnologije razvio i usavršio umjetne izvore radioaktivnosti. Bit će posebno objašnjeni prirodni izvori radioaktivnosti i njihov utjecaj na svakodnevni život, kao i umjetni izvori te njihovi najvažniji oblici primjene.

U današnje vrijeme, radioaktivnost ima značajnu primjenu u medicini, industriji i brojnim drugim granama u smislu poboljšanja kvalitete ljudskog života i napretka tehnologije.

## 2. POJAM RADIOAKTIVNOSTI

### 2.1. Povijesni pregled

Povijest istraživanja radioaktivnosti započela je s Wilhelmom C. Rontgenom i njegovim otkrićem rendgenskih zraka, koje su poznate kao X-zrake. 1895. kada je Rontgen u zamračenoj prostoriji proučavao katodne zrake u Crookesovoj cijevi uočio je da papir, koji je bio premazan barijevim platinocijanidom, svijetli, na dužini od preko dva metra od Crookesove cijevi. Došao je do zaključka da nevidljive zrake proizlaze iz sudara elektrona sa staklenom površinom cijevi te da mogu prodrijeti kroz različite materijale poput cinka, aluminijske i nikla. [1]



Slika 1: Prva rendgenska slika ljudske ruke koju je napravio Wilhelm Roentgen [2]

Kada je 1896. godine do Henrija Becquerela stigla vijest o otkriću X-zraka, odlučio je provesti istraživanje koje će pokazati emitiraju li fosforescentni materijali slične zrake. Ostavio je uzorke uranijevih soli bez prisutnosti sunčevog svjetla nekoliko dana, ali nije očekivao da će uzorci ostaviti intenzivno crnilo koje je upućivalo da se događa neobični fenomen koji je do tada bio nepoznat. Spoznao je da uranijeve soli zrače čak i u mraku. Slijedom toga, poučavao je brojne uranijeve materijale i zaključio da se navedeni fenomen manifestirao u svakom od pokusa koje je proučavao. Na taj je način, Becquerel praktički

otkrio i definirao pojam „radioaktivnost“. Slijedeće godine su obilježila mnoga istraživanja povezana s radioaktivnim zračenjem. [3]

Marie Curie je temeljem Becquerelovih otkrića odlučila svoj doktorski rad posvetiti tada nedavno otkrivenom radioaktivnom zračenju. Ona je pomoću elektrometra kojeg je izgradio njen suprug Pierre i njegov brat Jacques, izmjerila jačinu zračenja koje je emitirano iz spojeva urana te otkrila da je jačina zračenja konstantna tijekom dužeg vremenskog perioda te da na nju ne utječu drugi, vanjski čimbenici. Isto tako, primijetila je da je jačina zračenja bila proporcionalna i sadržaju urana. Slične zaključke donijela je i pri istraživanju sa spojevima elementa torija. [4]

Dok su Marie Curie i njen suprug Pierre analizirali svoje rezultate istraživanja, došli su do neočekivanog otkrića da crna, smolasta tvorevina, nazvana „uranijeva smola“, odnosno mineral uraninit, emitira oko četiri puta više zračenja nego što se može očekivati od čistog uranija. To ih je dovelo do otkrića da uranijeva smola sadrži malu količinu nepoznatog elementa koji emitira zračenje. [4]



Slika 2: Marie Curie u svom laboratoriju [5]

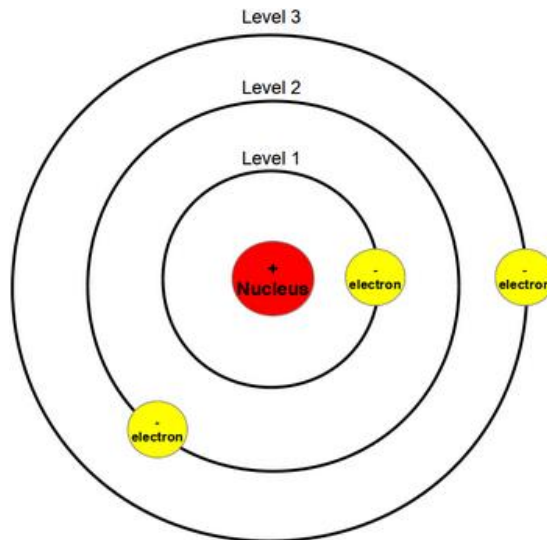
Na taj je način otkriven novi kemijski element, polonij, koji je dobio ime po rodnoj zemlji Marie Curie. U radu u kojem se opisuje otkriće novog elementa, po prvi puta je javno upotrijebljena riječ radioaktivnost. Što su više istraživali spomenutu tvar, otkrili su njena drukčija, neuobičajena svojstva te da sama emitira svjetlost. Tada su spoznali da nisu otkrili samo jedan novi element, već i drugi, kojeg su nazvali radij. [6]

Opazili su da novi element kojeg su otkrili, radij, ima vrlo veliku moć radioaktivnosti. Pierre je uočio da element radij može naškoditi ljudskom tkivu, pa je to bila prekretnica pri liječenju i tretiranju bolesti poput raka. Međutim, navedeno svojstvo radioaktivnosti, uvelike je utjecalo i na same istraživače. Marie Curie je znatno izgubila na svojoj tjelesnoj masi tijekom svojih istraživanja, dok je i Pierre imao problema sa zdravljem. To je bila direktna posljedica radioaktivnosti, ali Marie nije vjerovala u to. [7]

Iste godine kad su otkriveni polonij i radij, Samuel Prescott je primjenio radioaktivno zračenje i dokazao da ono ubija bakterije u hrani. Ernest Rutherford je 1902. godine postavio teoriju prirodne radioaktivnosti koja govori o spontanim transformacijama elemenata. On je dokazao da spontanom emisijom alfa i beta čestica nastaje novi element. [8]

Rutherford je zajedno sa Hans Geigerom, koji je osmislio Geigerov brojač, osnovao centar za proučavanje radioaktivnog zračenja. Geigerov brojač je mjerni instrument za otkrivanje radioaktivnog zračenja, koji broji broj prolazaka ionizirajućih čestica ili fotona. Rutherford je 1909. godine u svojim istraživanjima otkrio atomsku jezgru i razvio model atoma koji je nalikovao modelu Sunčevog sustava. Niels Bohr je privatio takav model te ga modificirao kvantnom teorijom. [8]

Bohr je modelom atoma uspio prikazati i definirati građu elektronskog omotača i procese emisije i apsorpcije svjetlosti. Bohrov model atom prikazuje s malom, pozitivno nabijenom jezgrom koja se nalazi u središtu te elektrone koji kruže oko jezgre na određenim fiksnim udaljenostima od jezgre. [9]



Slika 3: Bohrov model atoma (jezgra atoma je označena crvenom bojom, elektroni žutom) [10]

Rutherford je nastavio s istraživanjima te je 1919. godine uspio proizvesti raspad neradioaktivnog atoma dušika, bombardirajući jezgru dušika alfa česticama te kao rezultat dobio kisik i proton, te je tako proizveo prvu nuklearnu reakciju ikada. Pošto je čestica imala pozitivan naboj, zaključio je da je morala proizaći iz jezgre atoma, pa je prema tome dobila naziv proton. [11]

James Chadwick je 1932. godine došao do temeljnog otkrića u domeni nuklearne znanosti. On je u svojim znanstvenim istraživanjima dokazao česticu neutrona. U pokusima na elementu beriliju, opazio je da zračenje koje izbacuje berilij neutralna čestica s približno istom masom kao i proton. Kasnije je iste pokuse primjenjivao i na drugim elementima, kao što su helij, dušik i litij, te zaključio da je masa nove čestice (neutrons) zapravo samo malo veća od mase protona. [12]

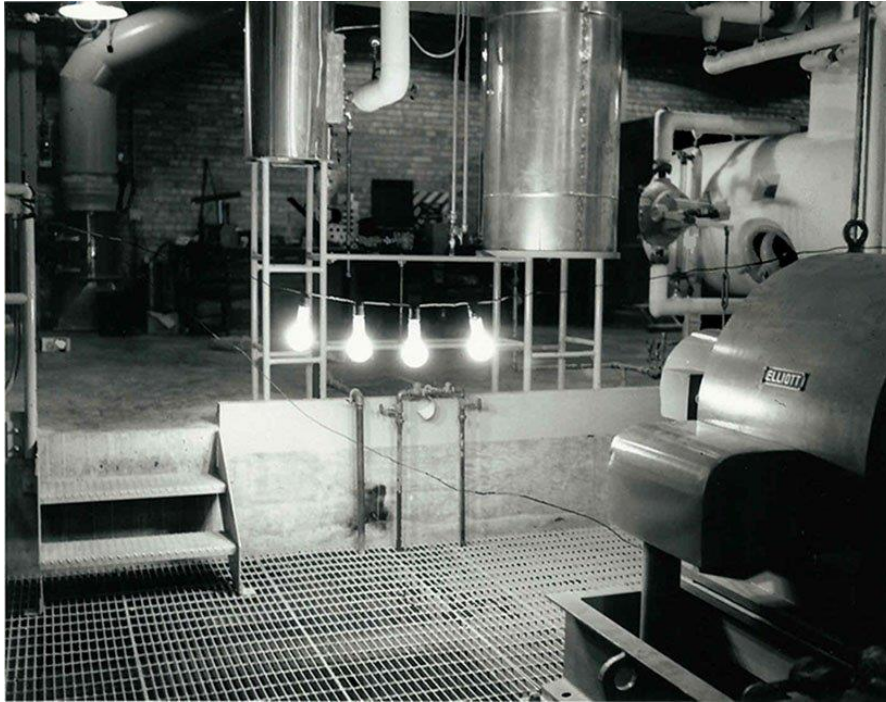
Fizičari John Cockroft i Ernest Walton su 1932. godine proizveli nuklearnu dezintegraciju bombardiranjem elementa litija umjetno ubrzanim protonima. Tim eksperimentom napravili su prvo umjetno cijepanje jezgre nekog atoma. Također, time su napravili i prvu transmutaciju pomoću umjetno ubrzanih čestica. Protoni su bili ubrzan i udarili su u atome litija proizvodeći na taj način alfa čestice i energiju. Na taj je način masa protona i litija pretvorena u masu dviju alfa čestica i u kinetičku energiju. Ova je reakcija bila prvi eksperimentalni dokaz Einsteinove teorije iz 1905. godine koja govori o jednakosti mase i energije ( $E = mc^2$ ). [13]

Otto Hahn i Fritz Strassmann su 1938. godine u svojim istraživanjima ustanovili da dok su se jezgre većine elemenata donekle promijenile tijekom neutronskog bombardiranja, jezgre urana su se jako promijenile i razbile na dva približno jednaka dijela. Na taj način nisu nastali novi transuranski elementi za koje se smatralo da ih je otkrio Enrico Fermi, već su nastali radioaktivni izotopi barija i drugi fragmenti samog urana. Proizvodi Hahn-Strassmannova eksperimenta težili su manje od originalne jezgre urana, i u tome leži primarni značaj njihovih otkrića. Tako je otkriven proces nuklearne fisije. [14]

Slijedom otkrića nuklearne fisije, otvorila su se brojna istraživanja vezana na tu temu. Niels Bohr smatra da je izotop urana  $^{235}\text{U}$  više podložan fisiji nego drugi uranijev izotop  $^{238}\text{U}$ . To su prihvatili i drugi fizičari u to vrijeme, te su Szilard i Fermi predložili upotrebu moderatora koji bi usporili neutrone. Fizičar Francis Perrin prvi spominje koncept kritične mase urana koji je potreban za samoodrživu fisijsku reakciju, a nakon toga skupina fizičara počinje istraživati neutronski apsorbirajući materijal koji bi mogao ograničiti broj neutrona, pa na taj način kontrolirati nuklearnu fisijsku reakciju, što bi uvelike pridonijelo da se postavi način rada današnjih nuklearnih reaktora. [15]

Prilike koje su zadesile svijet početkom 1940-ih godina rezultirale su tome da je sav fokus oko istraživanja nuklearnih procesa bio usmjeren na razvoj atomske bombe, posebno u SAD-u te u tadašnjem SSSR-u. Istraživanja koja su bila su usmjerena na istraživanje i razvoj atomske bombe, iako su imale lošu namjeru, uvelike su pridonijela razvoju i napretku za razumijevanje procesa nuklearne fisije i razvojem tehnologije, što će u kasnijim godinama uvelike pomoći za druge primjene nuklearne fizike, primjerice za proizvodnju električne energije. [15]

Tako je 1951. godine u SAD-u napravljen prvi nuklearni reaktor naziva EBR-1 koji je proizveo električnu energiju. Taj reaktor je pri početku svojeg rada, u prvom danu proizveo dovoljno električne energije za rad četiri žarulje od 200 W snage, a već idući dan rada reaktora je bilo dovoljno energije za osvjetljavanje cijele zgrade. Prvi nuklearni reaktor koji je bio namijenjen isključivo za proizvodnju električne energije je počeo raditi 1954. godine u tadašnjem SSSR-u te je imao električnu snagu od 5 MW. [16]



Slika 4: Prva električna struja dobivena je nuklearnim reaktorom EBR-1 [17]

Amerikanac Hyman Rickover je bio pokretač izuma tlakovodnog nuklearnog reaktora, koji je u današnje vrijeme najrašireniji tip reaktora. Više od polovice nuklearnih elektrana u svijetu koristi ovaj tip reaktora. U početku je taj tip reaktora bio namijenjen za pogon podmornica, međutim, već je 1957. godine u SAD-u s radom započela nuklearna elektrana za proizvodnju električne energije, snage 60 MW u koju je bio ugrađen ovaj tip reaktora. [18]

Od sredine 1950-ih godina, sve do današnjeg dana, sva istraživanja povezana s nuklearnom energijom posvećena su unaprijeđenju tehnologije proizvodnje električne energije te poboljšanju i povećanju sigurnosti nuklearnih elektrana i njihovom utjecaju na okoliš i zdravlje ljudi.

## 2.2. Teoretske osnove radioaktivnosti

Radioaktivnost je pojava u kojoj dolazi do spontanog raspadanja nestabilnih atomskih jezgri u atomske jezgre koje su energetske stabilnije uz oslobađanje energije. Svaku radioaktivnu jezgru karakterizira vlastiti poluživot, odnosno vrijeme u kojem se inicijalno velik broj atomskih jezgri raspada na polovicu svog početnog broja. Prilikom radioaktivnog raspada, relativno velika količina energije se oslobađa u svakoj



dezintegraciji, obično oko milijun puta više od količine energije koja se oslobodi u egzotermnoj kemijskoj reakciji. To znači da se pri svakom radioaktivnom raspadu jezgre oslobodi nekoliko milijuna elektronvolti (MeV) energije, dok se prilikom egzotermne reakcije oslobodi tek nekoliko elektronvolti energije (eV). Budući da je radioaktivni raspad nuklearni fenomen, njegova brzina za određenu radioaktivnu vrstu (radioizotop ili radionuklid) nije mjerljivo promjenjiva ovisno o promjenama tlaka ili temperature. [19]

Radioaktivni (nestabilni) kemijski elementi predstavljeni su kemijskim simbolom elementa s masenim brojem koji je prikazan kao indeks s lijeve strane i atomskim brojem koji je prikazan kao superskript s lijeve strane. Kao primjer možemo uzeti jedan od najpoznatijih radioaktivnih izotopa, ugljik-14 koji se prikazuje kao  $^{14}_6\text{C}$ . Atomske jezgre se sastoje od sferičnih tvorevina dviju vrsta osnovnih čestica koje se nazivaju nukleoni, a to su neutroni i protoni. Atomski broj  $Z$  nekog elementa je broj protona u njegovoj jezgri, a maseni broj  $A$  nekog elementa je jednak ukupnom broju nukleona u njegovoj jezgri, odnosno zbroju  $Z+N$ , gdje je  $N$  broj neutrona u jezgri.

U svim atomskim jezgrama, bez obzira jesu li one stabilne ili nestabilne, nukleoni su međusobno čvrsto povezani nuklearnim silama kratkog dometa (uravnotežujući Coulombovo odbijanje među protonima). Za izbacivanje jednog nukleona iz jezgre obično je potrebno oko 5-10 MeV ulazne energije po svakoj jezgri. [20]

U prirodi se dešavaju tri vrste radioaktivnog raspada: alfa, beta i gama raspad. Prilikom alfa raspada se događa promjena atomske jezgre prilikom koje jezgra emitira alfa česticu, odnosno jezgru helija. U tom se procesu maseni broj smanjuje za četiri i atomski broj za dva. Prilikom beta raspada također nastaju nove atomske jezgre. Postoje dva tipa beta raspada. Kod beta minus raspada dolazi do emitiranja elektrona i antineutrina. Kod beta plus raspada dolazi do emitiranja čestice pozitrona, odnosno čestice koja je jednake mase kao elektron, ali suprotnog naboja. Kod gama raspada ne formiraju se jezgre novih elemenata, niti se mijenja struktura postojećeg elementa. To je proces prilikom kojeg dolazi do promjene energetske stanja atomske jezgre pri čemu dolazi do emitiranja energije u obliku gama zračenja. [21]

Radioaktivnost se može koristiti za opisivanje količine ionizirajućeg zračenja koju oslobađa radioaktivni element. SI jedinica za mjerenje radioaktivnosti je bekerel (Bq), jednak jednom raspadu u sekundi. Curie (Ci) je izvorna jedinica za radioaktivnost i jednaka je  $3,7 \times 10^{10}$  Bq. Geigerovi brojači se koriste za mjerenje radioaktivnosti i ti uređaji su poznati po specifičnom zvuku kojeg tvore kad otkriju radioaktivni raspad koji proizvodi

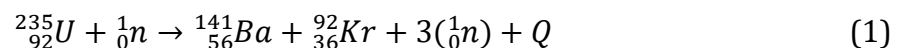
ionizirajuće zračenje. Jedan od načina na koji se također može izmjeriti koliko je neki element radioaktivan je taj da se istraži poluživot nekog elementa, budući da je poluživot nuklida povezan s njegovim rizikom od zračenja. [22]

## 2.3. Nuklearne reakcije

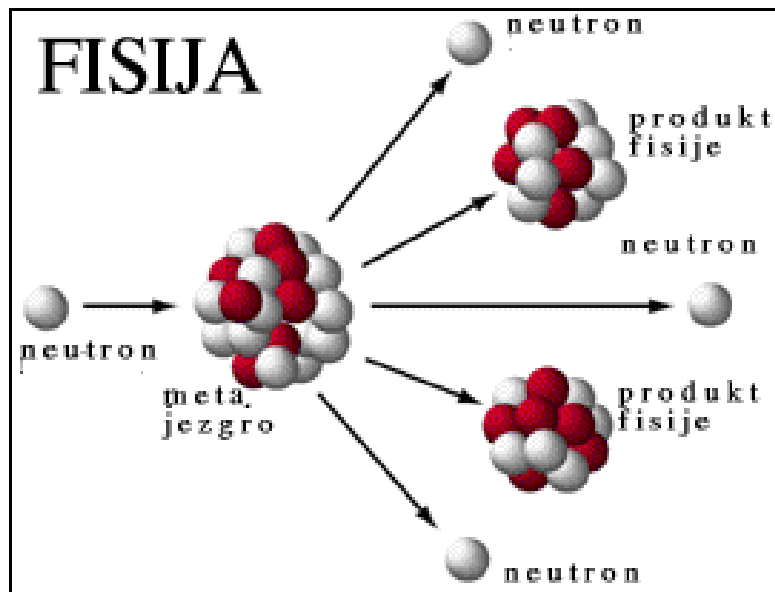
### 2.3.1. Nuklearna fisija

Nuklearna fisija je fizikalni proces u kojem glavnu ulogu imaju neutroni (neutralne čestice) koji služe kao čestice za bombardiranje jezgre nekog elementa pri čemu se jezgra tog elementa raspada na dva lakša dijela uz usputno oslobađanje velike količine energije  $Q$ . Proces nuklearne fisije može se odvijati i spontano, a ako se događa bombardiranjem pomoću čestica (npr. neutroni) onda se odvija inducirano. [23]

Najčešći elementi koji su podložni procesu fisije su  $^{235}\text{U}$  (uranij-235),  $^{239}\text{Pu}$  (plutonijski-239) i  $^{233}\text{U}$  (uranijski-233). Jedan od primjera reakcije fisije koji se primjenjuje i u praksi, je bombardiranje  $^{235}\text{U}$  sa sporim neutronima. Tada se jezgra uranija raspada na dvije jezgre (barij i kripton), koje su lakše. Kao produkt reakcije, izlaze i 2 ili 3 neutrona te se istovremeno oslobađa velika količina energije, otprilike 200 MeV. Primjer takve reakcije prikazan je u nastavku teksta. [23]



Više od 99 % neutrona koji se oslobađaju u fisijskoj reakciji emitiraju se u samom trenutku fisije. Oni se nazivaju brzi neutroni, dok su neutroni koji se oslobađaju relativno dugo nakon reakcije fisije nazivaju zakašnjeli (spori) neutroni. Iako je vrlo mali postotak sporih neutrona u ukupnom broju neutrona pri fisijskoj reakciji, oni su vrlo važan čimbenik pri radu nuklearnih reaktora. Ako se takva reakcija kontrolira u nuklearnom reaktoru, ona može služiti za proizvodnju električne energije. Međutim, ako se ta reakcija odvija nekontrolirano, onda može dovesti do eksplozije strašne razorne snage, kao što je slučaj atomske bombe. [24]



Slika 5: Proces nuklearne fisije [25]

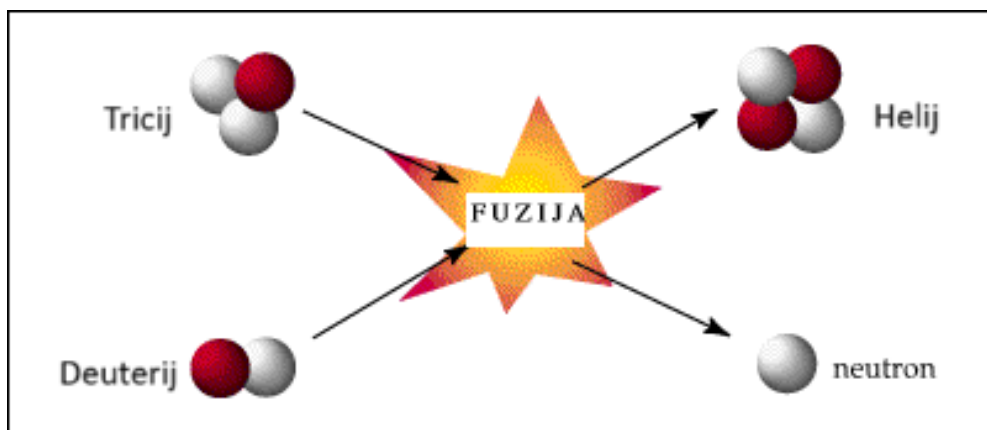
Neutroni koji se oslobode pri reakciji fisije, mogu pokrenuti proces fisije u obližnjoj jezgri elementa koji je podložan fisiji, pa se tako otpušta više neutrona koji mogu ponoviti slijed, te tako uzrokuju lančanu reakciju u kojoj dolazi do fisije kod velikog broja jezgri i oslobađa se velika količina energije. Takva se lančana reakcija može opisati kvantitativno veličinom  $k$  (faktor multiplikacije). Ta veličina se opisuje kao omjer broja fisija u jednoj generaciji i broju fisija u prethodnoj generaciji. Ako je veličina  $k$  veća od 1, tada se s vremenom povećava broj fisija iz generacije u generaciju. U tom je slučaju energija koja se oslobađa lančanom reakcijom sve veća s protekom vremena, a lančana reakcija se tada naziva superkritična. Kada je veličina  $k$  manja od 1, broj fisija s vremenom počinje opadati, pa se takva lančana reakcija zove subkritična. U slučaju kada je veličina  $k$  jednaka 1, tada se lančana reakcija odvija konstantnom brzinom, energija se oslobađa u jednakoj količini, a lančana reakcija se tada naziva kritičnom. [26]

### 2.3.2. Nuklearna fuzija

Nuklearna fuzija je fizikalni proces u kojem se dvije atomske jezgre malih masa spajaju u jednu težu, te se kao posljedica oslobađa velika količina energije. Ukupna masa jezgri koje se spajaju je veća od mase jezgre koja je produkt procesa fuzije. Proces fuzije se odvija u stanju tvari koje se naziva plazma. To je vrući, nabijeni plin koji je sastavljen od jednakog broja pozitivnih iona i elektrona koji se slobodno kreću te je električki neutralna. [27]

Ova reakcija pokreće Sunce, kao i ostale zvijezde. Na Suncu, kako bi se spojile jezgre moraju se sudarati jedna s drugom na ekstremno visokim temperaturama, koje iznose oko 10 milijuna stupnjeva Celzijevih. Takva visoka temperatura je pokretač te reakcije, budući da jezgrama treba dati dovoljno kinetičke energije da prevladaju međusobno električno odbijanje (tzv. Coulombovu barijeru). Coulombovo odbijanje inače sprječava proces fuzije na način da ne dopušta da dvije pozitivno nabijene čestice dođu unutar doseg njihovih privlačnih nuklearnih sila. Da bi se postigao proces nuklearne fuzije, temperatura materijala se mora povisiti sve dok čestice tog materijala ne dobiju dovoljno energije da prijeđu Coulombovu barijeru. Reakcije takvog tipa se nazivaju termonuklearne fuzijske reakcije. [27]

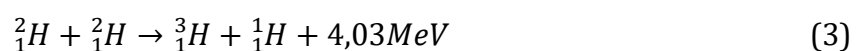
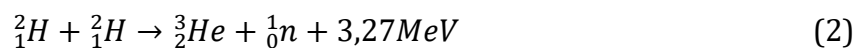
Kada govorimo o procesu fuzije, najvažnije reakcije su one koje se temelje na izotopima vodika, a to su deuterij i tricij. Deuterij (D<sub>2</sub>O) se nalazi u vrlo malom omjeru kao teška voda pomiješana u prirodnoj vodi (1 od oko 6000 atoma vodika u prirodnoj vodi je u obliku deuterija). Praktički je neiscrpan na taj način budući da se nalazi u oceanima u velikoj količini. Tricij ne postoji u prirodnom obliku pošto ima previše neutrona i stoga je nestabilan. Može se dobiti određenim procesima iz litija, koji je široko zastupljen u Zemljinoj kori i u oceanima. [28]



Slika 6: Proces nuklearne fuzije [29]

Primjeri procesa fuzijskih reakcija izotopa vodika prikazani su u nastavku.

D-D reakcija



U toj fuzijskoj reakciji dvije jezgre deuterija se spajaju te međusobno tvore jednu jezgru helija, jedan slobodni neutron, pritom oslobađajući energiju od 3.27 MeV.

U drugoj reakciji dvije jezgre deuterija se spajaju te tvore jednu jezgru tricija, jednu jezgru vodika uz oslobodjenje energije od 4.03 MeV.

D-T reakcija



U toj fuzijskoj reakciji jedna jezgra deuterija se spaja s jednom jezgrom tricija i pritom daje jednu jezgru helija, jedan slobodni neutron te se oslobađa 17.59 MeV energije.

Ove fuzijske reakcije postale su zanimljive znanstvenicima i inženjerima u svrhu industrijske primjene, na način da bi mogle osigurati gotovo čistu, neograničenu i pristupačnu energiju koja bi zadovoljila svjetske potrebe. Fuzija bi na taj način mogla proizvesti i do četiri puta više energije po kilogramu goriva od procesa fisije koja se koristi u nuklearnim elektranama, a čak četiri milijuna puta više energije koja se dobiva iz nafte ili ugljena. Većina koncepata fuzijskih reaktora koji su još u razvoju koristit će mješavinu deuterija i tricija. Tako bi sa samo nekoliko grama ovih reaktanata bilo moguće proizvesti toliko energije koju jedan stanovnik razvijene zemlje potroši u šezdeset godina svojeg života. Pošto je proces fuzije teško pokrenuti i održavati, ona se može dogoditi samo pod strogim uvjetima, izvan kojih će se proces prirodno prekinuti, izgubiti energiju vrlo brzo i ugastiti se prije nego što se napravi bilo kakva šteta na reaktoru. Proces fuzije, kao i fisije, ne emitira ugljični dioksid ili druge stakleničke plinove u atmosferu, tako da bi mogla biti dugoročni izvor električne energije s niskom razinom ugljika. [30]

## 2.4. Zakon radioaktivnog raspada

Zakon radioaktivnog raspada je zakon koji objašnjava kako se svaka radioaktivna jezgra spontano raspada u određenom vremenu. U tom procesu je riječ o prirodno radioaktivnim jezgrama. Prema tom zakonu, broj jezgri bilo koje radioaktivne tvari koja prolazi kroz proces raspadanja u jedinici vremena proporcionalna je ukupnom broju jezgri u

materijalu uzorka. Vjerojatnost po jedinici vremena da će se neka radioaktivna jezgra raspasti je konstantna, te ne ovisi o vremenu. Ta se konstanta zove konstanta raspada i označava se sa  $\lambda$  (lambda). Radioaktivni raspad određenog broja atoma (mase) je eksponencijalan u vremenu. [31]

Radioaktivni raspad se dešava slučajno, i to na razini pojedinačnih atoma. Sukladno kvantnoj teoriji, nije moguće točno predvidjeti kada će se neki atom raspasti, odnosno jezgra radionuklida nema memoriju. Jezgra ne „stari” protekom vremena, dakle vjerojatnost njenog raspada ne raste s vremenom, već je konstantna bez obzira na to koliko dugo jezgra postoji. Tijekom svog nepredvidivog raspada, jezgra nekog nestabilnog elementa se spontano i nasumično razgrađuje u drugu jezgru (ili drugačije energetske stanje, na primjer, kao kod gama raspada), pri čemu ispušta zračenje u obliku atomskih čestica ili visokoenergetskih zraka. Proračuni raspada radioaktivnih jezgri su relativno jednostavni budući da postoji samo jedan temeljni zakon koji govori o svim procesima raspada. [31]

Zakon u obliku formule glasi na način:

$$\frac{-dN}{dt} = \lambda N \quad (5)$$

U toj formuli,  $dN$  predstavlja broj jezgara koje se raspadnu za vrijeme  $dt$  (promatrani vremenski interval).  $N$  je ukupni broj prisutnih jezgara nakon proteka vremena  $dt$ . Predznak minus u formuli znači da se  $N$  protekom vremena smanjuje. [32]

Zakon radioaktivnog raspada se može prikazati i u integralnom obliku:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (6)$$

Pri čemu je  $N_0$  broj radioaktivnih jezgri u početnom vremenu kada je  $t=0$ .  $N$  je broj preostalih jezgara u određenom trenutku  $t$ . [32]

Brzina radioaktivnog raspada nekog elementa može se mjeriti poluživotom. Vrijeme poluraspada nekog elementa je vrijeme koje je potrebno da određeni izotop izgubi polovicu svoje radioaktivnosti.

Primjerice, ako radioaktivni izotop nekog elementa ima poluživot od 14 dana, polovica njegovih atoma će se raspasti unutar 14 dana. Nakon još 14 dana, polovica od te preostale polovice će se raspasti, i tako se nastavlja niz. Poluživoti elemenata se kreću u rasponu od

milijuntih dijelova sekunde (za visoko radioaktivne produkte fisije) pa sve do milijarde godina za materijale kao što je prirodni uran. Treba spomenuti da kratki poluživoti su vezani za velike konstante raspada. Radioaktivni materijal s kratkim poluživotom je mnogo radioaktivniji, ali će puno brže izgubiti svoju radioaktivnost. [33]

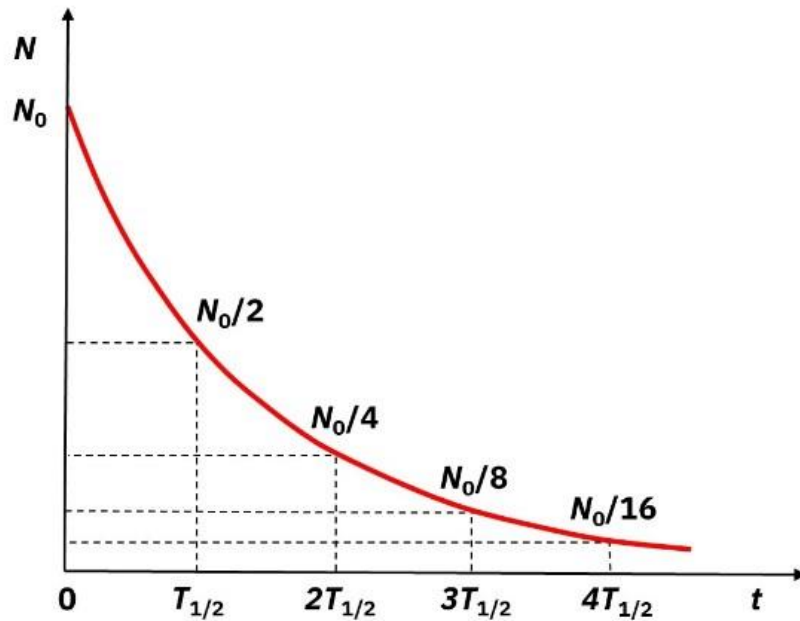
Tablica 1. - Vrijeme poluraspada određenih izotopa<sup>33</sup>

IZOTOP	VRIJEME POLURASPADA
${}_{84}^{218}\text{Po}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$ s
${}_{86}^{222}\text{Rn}$	3,83 dana
${}_{88}^{226}\text{Ra}$	1600 godina
${}_{6}^{14}\text{C}$	5730 godina
${}_{92}^{238}\text{U}$	4470000 godina

Prilikom proračuna radioaktivnosti mora biti poznat jedan od dva parametara, ili konstanta raspada ili poluživot. Oni određuju brzinu raspada. Postoji poveznica između vremena poluraspada i konstante raspada. Taj odnos se može izvesti iz zakona radioaktivnog raspada postavljanjem  $N = \frac{1}{2} N_0$ . Tada je:

$$\lambda(\text{s}^{-1}) = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (7)$$

gdje je  $\ln 2$  prirodni logaritam od 2 i iznosi 0.693. Ako je poznata konstanta raspada  $\lambda$ , može se izračunati vrijeme poluraspada i obrnuto.



Slika 7: Graf koji prikazuje vrijeme poluraspada [33]

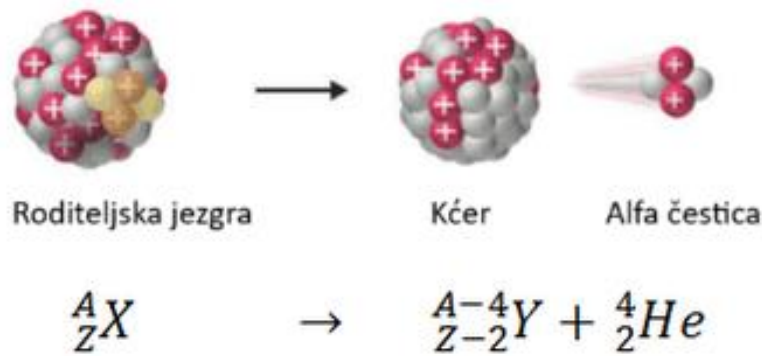
Zakon radioaktivnog raspada se u praksi koristi za potrebe radioaktivnog datiranja. Radiometrijske metode datiranja se najčešće koriste u geokronologiji za utvrđivanje geološke starosti određenih materijala, a mogu se koristiti i za datiranje u arheologiji. Najpoznatije tehnike radioaktivnog datiranja su: datiranje ugljikom-14, datiranje kalij-argonom i uran-olovo datiranje. [33]

## 2.5. Vrste radioaktivnih raspada

### 2.5.1. Alfa raspad

Alfa raspad ( $\alpha$ -raspad) predstavlja raspad roditeljske jezgre (označena slovom X) u kćer (označena slovom Y) emisijom jezgre atoma helija kao što je prikazano na slici 8.



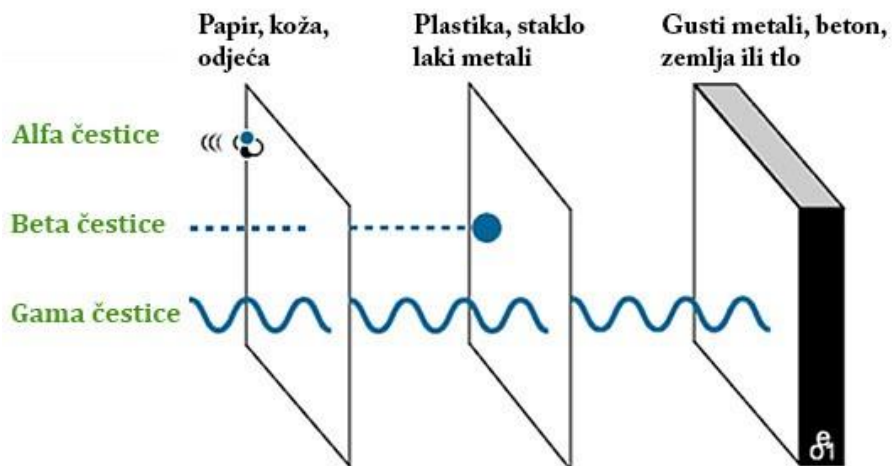


Slika 8: Alfa raspad jezgre [34]

Prilikom alfa raspada, dolazi do emitiranja alfa čestice, odnosno energetske jezgre helija. Alfa čestice su sadržane od dva protona i dva neutrona koji su međusobno povezani u česticu identičnu jezgri helija. Jedan od najpoznatijih primjera alfa raspada je raspad uranija-238 u kojem se uranij-238 raspada u torij-234 i pritom emitira alfa česticu. [35]  
 Primjer alfa raspada urana- 238:



Alfa čestice su relativno velike i nose dvostruki pozitivni naboj. Te čestice nisu jako prodorne, praktički može ih zaustaviti komad papira, putuju samo nekoliko centimetara i svu svoju energiju polažu na kratke udaljenosti. Primjerice, alfa čestice može zaustaviti 5 do 11 cm zraka ili 20 do 100 mikrometara vode. [36]



Slika 9: Prodori različitih vrsta zračenja kroz određene materijale [37]

Prilikom alfa raspada, ukupna količina energije koja se emitira iznosi 4-10 MeV. Količina energije koju posjeduje alfa čestica ovisi o omjeru mase alfa čestice i mase povratnog nuklida kćeri. Ovaj način raspada u praksi se može uočiti samo u nuklidima koji su znatno teži od nikla, pri čemu su najlakši poznati izotopi koji emitiraju alfa čestice izotopi telura (maseni broj 106-110). Alfa čestice emitiraju sve teške radioaktivne jezgre koje se pojavljuju u prirodi (uran, torij i radij), te elementi poput neptunija, plutonija i americija.[38]

Kada se neka tvar koja prolazi kroz alfa zračenje proguta ili udahne, to može biti vrlo destruktivno za ljudsko zdravlje. Ovo oštećenje povećava rizik od raka kod osobe. Alfa zračenje uzrokuje rak pluća kod ljudi ako se udiše emiter alfa zračenja. Udisanje radona, koji emitira alfa zračenje, najčešći je izvor bolesti koje su povezane s alfa raspadom. Primjena alfa zračenja u svakodnevnom životu je u detektorima dima. Element americij jedan je od često korištenih elemenata jer je glavni izvor alfa čestica. Unutar detektora dima oslobađaju se alfa čestice, to zauzvrat ionizira zrak unutar detektora. Dim u detektoru apsorbira alfa zračenje, mijenja se ionizacija i na taj način se aktivira alarm. [39]

Poznata je primjena alfa zračenja u medicini. Liječenje raka pomoću ciljane alfa terapije koristi alfa raspad za ubijanje stanica raka. Olovo-212 se proguta i putuje organizmom do mjesta na kojem je rak, zatim se ispušta alfa zračenje koje ubija sve stanice na tom području. [40]

### ***2.5.2. Beta raspad***

Beta raspad je najčešći oblik radioaktivnog raspada. Postoje dva tipa beta raspada. U prvom tipu beta raspada koji se naziva beta minus, nestabilna atomska jezgra emitira elektron i antineutrino te pretvara neutron u proton. U drugom tipu, beta plus, nestabilna jezgra emitira pozitron (pozitivno nabijen elektron, koji se naziva i antielektron) i neutrino te pretvara proton u neutron. Pozitroni i elektroni su beta čestice. Znanstvenici su uočili beta raspad u 97% svih poznatih nestabilnih izotopa. Najčešće se javlja u jezgrama koje imaju previše neutrona ili previše protona. [41]

Prilikom beta minus raspada, ako je broj neutrona u jezgri veći, neutron će doživjeti sljedeću transformaciju: [42]



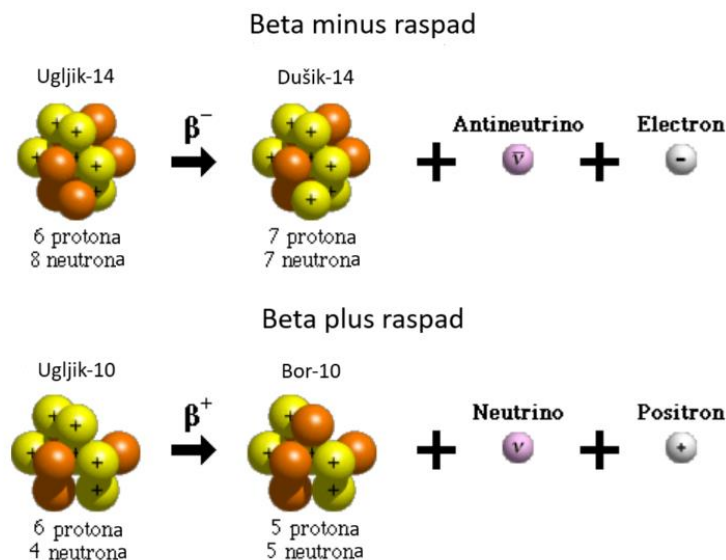
Neutron se pretvara u proton uz emisiju beta minus čestica (elektron) i antineutrino. Antineutrino nema masu mirovanja ni električni naboj i ne stupa lako u interakciju s materijom. Za izotope koji prolaze kroz beta raspad, svaka jezgra emitira elektron i antineutrino. Maseni broj pritom ostaje isti, dok se atomski broj povećava za jedan. Jedan od primjera beta raspada koji ima primjenu i u radiologiji je raspad kobalta-60. [43]

Beta raspad kobalta:



Beta zračenje se može zaustaviti papirom debljine 1,25 cm ili tankom aluminijskom folijom.[44] Materijali koji imaju visoki atomski broj kao što su olovo i volfram su neučinkoviti u zaustavljanju beta zračenja jer mogu proizvesti sekundarna zračenja. Na primjer, u praksi se koristi volframova anoda u rendgenskim cijevima za proizvodnju rendgenskih zraka. [45]

## Beta raspad



Slika 10: Primjeri beta minus i beta plus raspada [46]

Beta plus zračenje se događa ako je broj neutrona u nestabilnoj jezgri manji od broja protona, pa proton doživi slijedeću transformaciju: [42]



U tom slučaju, proton će se pretvoriti u neutron uz emisiju pozitrona (beta plus čestica) i čestice koja se naziva neutrino. Neutrino nema električni naboj ni masu mirovanja, kao i antineutrino.

U slučaju beta plus raspada, svaka raspadnuta jezgra emitira pozitron i neutrino, smanjujući svoj atomski broj za jedan, a maseni broj ostaje nepromjenjiv.

Pozitron ne opstaje dugo vremena u prisutnosti materije nego se spaja s elektronom. Mase obiju čestica su tada zamijenjene elektromagnetnom energijom koja se emitira u obliku dvije gama zrake od 511 keV koje se emitiraju u gotovo suprotnim smjerovima.

U prirodi nema emitera pozitrona već oni nastaju umjetno u nuklearnim reakcijama. Emiteri pozitrona imaju svoju primjenu i u medicini, a najpoznatiji su  $^{11}\text{C}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$  i  $^{30}\text{P}$ . [47]

### **2.5.3. Gama raspad**

Gama raspad je treći tip radioaktivnog zračenja, a od alfa i beta raspada se razlikuje po tome što se nabijene čestice ne izbacuju iz jezgre pri ovoj vrsti raspada. Umjesto toga, oslobađa se visokoenergetski oblik elektromagnetnog zračenja – foton gama zraka. Gama zrake su fotoni koji imaju vrlo visoku energiju i visoko su ionizirajući. [48]

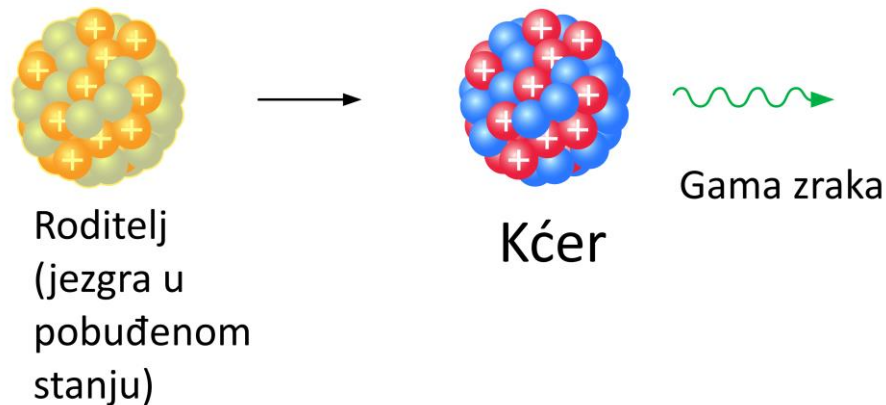
Gama zračenje je jedinstveno po tome što ne mijenja strukturu ni sastav atoma. Mijenja se samo energija atoma, budući da gama zrake ne nose naboj niti imaju pridruženu masu. Pošto gama zrake imaju veliku energiju, imaju i veliku dubinu prodiranja u različite materijale, znatno više nego kod alfa i beta raspada. Nuklearna reakcija koja opisuje gama raspad može se napisati kao: [49]



Gornji indeks iznad jezgre roditelja označava pobuđeno nuklearno stanje. Pri reakciji, kemijski izotop ostaje nepromijenjen dok se ukupna energija (unutarnja energija vezanja po nukleonu) mijenja. Ekvivalentne jezgre s različitim energijama se nazivaju nuklearni izomeri. [50]

Da bi jezgra doživjela gama raspad, mora biti u nekoj vrsti pobuđenog energetskeg stanja. Ako proton ili neutron unutar jezgre preskoči u pobuđeno stanje, najčešće nakon alfa ili

beta raspada, tada nova jezgra kćer mora nekako osloboditi energiju kako bi omogućila protonu ili neutronu da se opusti nazad u osnovno stanje. Kada nukleon napravi ovaj prijelaz iz stanja visoke energije u stanje niske energije, emitira se gama foton. [51]



Slika 11: Gama raspad [52]

Opća jednadžba ovog procesa je [53]:



Gdje je :

- $A^*$  - pobuđeni atom
- $A$  - opuštено stanje početnog pobuđenog atoma
- $\gamma$  - oslobođeni foton gama zraka

Pošto su gama zrake vrlo visoke energije i lako prodiru u materiju, one mogu biti štetne. Imaju značajnu primjenu u medicini.

Neki od najčešće korištenih elemenata koji emitiraju gama zračenje su kobalt-60 i cezij-137. Cezij je najčešće korišten u radioterapiji – liječenju raka pomoću gama zraka, kao i za mjerenje gustoće tla na gradilištima i istraživanje podzemnih slojeva Zemlje u naftnim bušotinama. Kobalt se koristi za sterilizaciju medicinske opreme i zračenje hrane u svrhu pasterizacije i ubijanja bakterija u hrani. Izloženost gama zračenju može poboljšati trajnost drva i plastike, pa se koristi i pri ojačavanju podova na mjestima gdje je visoka frekvencija prometa. [54]

## 3. MJERENJE RADIOAKTIVNOSTI

### 3.1. Mjerne jedinice

Kada se govori o radioaktivnom zračenju, mogu se mjeriti dva fenomena. Jedan je aktivnost zračenja, a drugi izloženost zračenju. Kada govorimo o aktivnosti zračenja, mjeri se koliko zračenja izlazi iz neke materije ili procesa. Izloženost zračenju govori o tome koliki je učinak zračenja na tvari koje ga apsorbiraju.

Aktivnost zračenja mjeri se u međunarodnoj SI jedinici koja se naziva bekerel (Bq). Bekerel broji koliko čestica ili fotona emitira izvor zračenja u sekundi. Uređaj koji se koristi za mjerenje aktivnosti zračenja naziva se Geigerov brojač. Primjerice, ako se Geigerov brojač postavi preko grama tvari i brojač izmjeri 4 klika u jednoj sekundi, radioaktivnost te tvari bi bila 4 bekerela.

Izloženost zračenju izražava se na nekoliko načina kako bi se objasnile različite razine posljedica koje ostavlja zračenje primjerice na ljudsko tkivo. Izloženost zračenju mjeri se u međunarodnoj SI jedinici koja se naziva gray (Gy). Ona je ekvivalentna energiji koju zračenje ostavi u kilogramu neke tvari. Izloženost zračenju se može nazvati i kao apsorbirana doza.

Često nas zanima učinak izloženosti radioaktivnom zračenju na ljudsko tkivo. To se opisuje veličinom koja se naziva ekvivalentna doza. Ona govori o apsorbiranoj dozi u ljudskom tkivu i posljedicama koje je ostavila na njega. Nema svako zračenje isti biološki učinak na tkivo, čak ni za istu količinu apsorbirane doze. Ekvivalentna doza se mjeri u međunarodnoj SI jedinici koja se naziva sivert (Sv). [55]

Ako se ekvivalentna doza odnosi na razdoblje od jednog sata (Sv/h), govori se o brzini doze. Ona je također mjera intenziteta zračenja. Doze se često prikazuju u intervalima od jedne godine (Sv/god), jer su mnoga ograničenja u zaštiti zračenja prikazana u godišnjim vrijednostima doza. Osim brzine doze, važna je i energija zračenja. Ona govori koliko jako ionizirajuće zračenje može prodrijeti kroz materiju i koliko daleko može ući u nju. Izražava se u elektronvoltima (eV), kiloelektronvoltima (keV) ili megaelektronvoltima (MeV). U većini slučajeva, energija ionizirajućeg zračenja ima fiksnu vrijednost za svaku radioaktivnu tvar i stoga se može koristiti za identifikaciju dotične tvari. [56]

### 3.2. Mjerni instrumenti

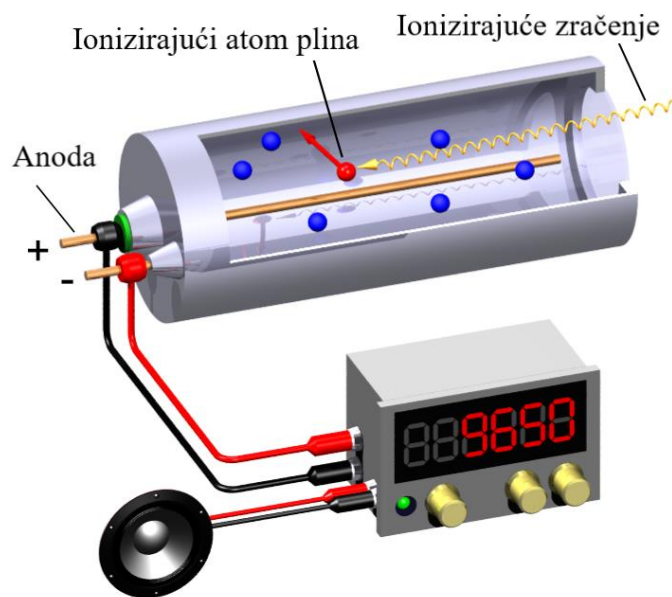
Pošto se ionizirajuće zračenje ne može izravno promatrati, koriste se odgovarajuće metode mjerenja kako bi se odredila vrsta i intenzitet zračenja. Ovisno o vrsti zračenja (alfa, beta ili gama), potrebne su različite metode mjerenja, što znači da jednom metodom ne možemo izmjeriti sve vrste zračenja.

Ionizirajuće zračenje mjeri se različitim mjernim uređajima, među kojima su najpoznatiji Geiger-Müllerov brojač, poluvodički detektori, ionizacijska komora, scintilacijski brojači i pasivni detektori (filmski dozimetri).

Geiger-Müllerov brojač koristi fotoelektrični efekt u kojem ionizirajuće zračenje oslobađa električki nabijene čestice koje se mogu pojačati i tako registrirati u mjernom uređaju. Taj brojač spada u tip ionizacijske komore. U tom se brojaču nalazi plin u metalnoj cijevi (cijev za brojanje) na koju se dovodi električni napon. Ako plin u cijevi za brojanje dođe u kontakt s ionizirajućim zračenjem, u plinu se stvaraju električki nabijene čestice koje se ubrzavaju i množe primjenjenim naponom. To stvara lančanu reakciju (lavinu) nabijenih čestica koje se tada mogu mjeriti kao električni signal (struja). Pretvaranjem signala u mjerne jedinice na uređaju se može očitati izmjerena vrijednost. Geiger-Müllerov brojač je sposoban detektirati alfa, beta i gama zračenje, no ne razlikuje različite vrste zračenja. Pomoću akustičnog pojačivača koji se može ugraditi u mjerni uređaj, može se proizvesti šum (zvučni signal). Tada uređaj proizvodi zvučne klikove ili zvučne signale i svaki od njih predstavlja detekciju jedne čestice ionizirajućeg zračenja. Broj odbrojavanja u minuti (ili sekundi) koje koristi brojač ovisi o intenzitetu zračenja prisutnog u području u kojem se mjeri. Više razine zračenja rezultiraju većim brojem signala po jedinici vremena, dok niže razine rezultiraju s manje signala. [57]

Prednosti Geiger-Müllerovog brojača su te da je uređaj vrlo pouzdan i osjetljiv instrument pa su i očitavanja obično točna. Njihovom primjenom mogu se izbjeći nuklearne nesreće budući da stalno izvještavaju o razini radioaktivnog zračenja. Koriste se u svim okolinama koje uključuju primjenu radioaktivnog materijala.

Nedostaci tog brojača su nesposobnost razlikovanja tipa radioaktivnog zračenja, te nemogućnost otkrivanja neutrona i drugih čestica koje nisu nabijene. [58]

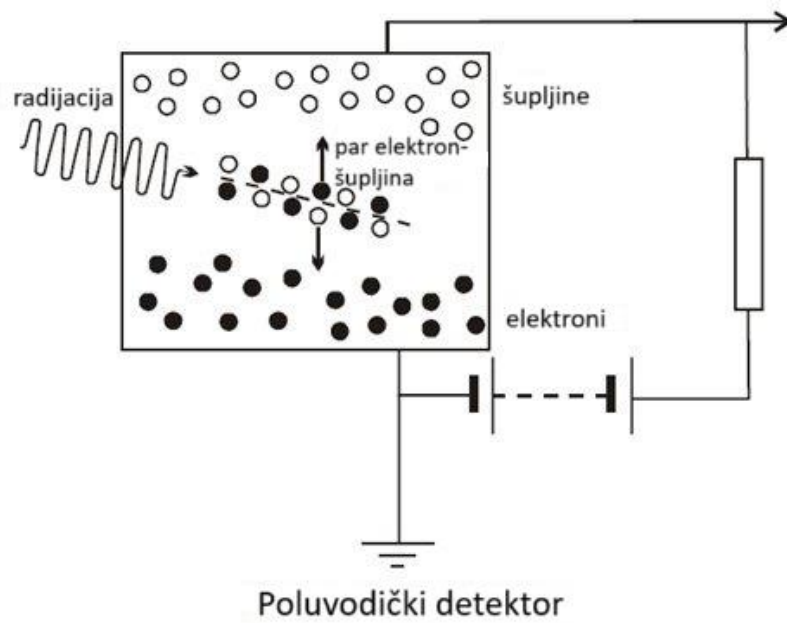


Slika 12: Princip rada Geiger-Müllerovog brojača [58]

Poluvodički detektori su detektori ionizirajućeg zračenja koji se temelje na poluvodiču, kao što su silicij ili germanij i služe za mjerenje učinka upadnih nabijenih čestica ili fotona. Poluvodiči su anorganski ili organski materijali, koji mogu kontrolirati svoju vodljivost ovisno o kemijskoj strukturi, temperaturi i razini osvjetljenja. Naziv poluvodič govori da ti materijali imaju istovremeno i električnu vodljivost (kao npr. bakar ili zlato) te sposobnost izolatora (kao npr. staklo). Imaju energetske jaz manji od 4 eV te za razliku od vodiča, elektroni u poluvodiču moraju dobiti energiju (npr. od ionizirajućeg zračenja) da bi došli do vodljivog stanja.

Poluvodički detektori su po principu rada vrlo slični fotonaponskim panelima koji generiraju električnu energiju. Kako ionizirajuće zračenje ulazi u poluvodič, ono stupa u interakciju s poluvodičkim materijalom i može pobuditi elektron izvan njegove energetske razine i kao posljedicu ostaviti šupljinu. Ovaj proces je poznat kao formiranje para elektron-šupljina. U poluvodičkim detektorima, osnovni nositelji informacija su parovi elektron-šupljina, koji nastaju duž putanje nabijene čestice kroz detektor. Skupljanjem parova elektron-šupljina formira se i bilježi signal detekcije zračenja. [59]





Slika 13: Način rada poluvodičkog detektora [59]

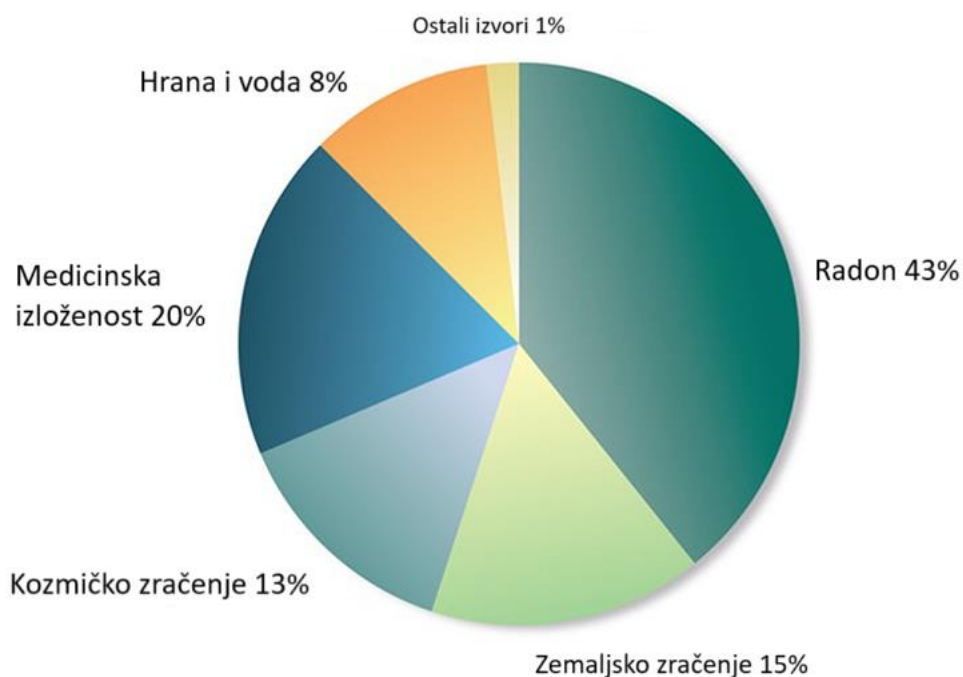
Poluvodički detektori imaju široku primjenu u zaštiti od zračenja, ispitivanju radioaktivnih materijala i fizičkim istraživanjima jer imaju neke jedinstvene karakteristike, a i sama izrada je prilično jeftina. Oni mogu s dobrom učinkovitošću mjeriti i intenzitet i energiju upadnog zračenja. Mogu se koristiti za mjerenje energije zračenja i identifikaciju čestica. [60]

## 4. PRIRODNI I UMJETNI IZVORI RADIOAKTIVNOSTI

### 4.1. Prirodni izvori radioaktivnosti

Ljudski rod je stalno izložen manjim količinama ionizirajućeg zračenja iz okoliša. Zračenje je oduvijek prisutno i svuda je oko nas, te je poznato kao pozadinsko zračenje. Pošto su stalno izložena tom tipu ionizirajućeg zračenja, naša tijela su se već postupno prilagodila na njega. Međutim, ionizirajuće zračenje može biti vrlo opasno, posebno na visokim razinama, pa je tako vrlo važno pratiti i kontrolirati razinu zračenja i našu izloženost zračenju. [61]

Pozadinsko zračenje je stalni izvor ionizirajućeg zračenja prisutnog u okolišu koje se emitira iz raznih izvora. Postoje četiri glavna izvora prirodnog zračenja: kozmičko zračenje, zemaljsko zračenje, plin radon te radioaktivnost koja se nalazi u hrani.

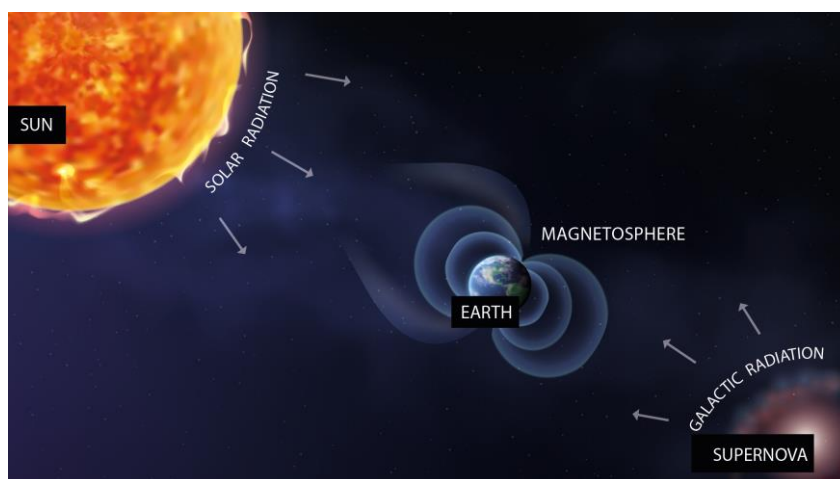


Slika 14: Udjeli izloženosti prirodnoj radioaktivnosti na svjetskoj razini [62]

#### 4.1.1. Kozmičko zračenje

Kozmičko zračenje je ionizirajuće zračenje koje nastaje kada primarni fotoni i alfa čestice izvan Sunčevog sustava stupaju u interakciju s komponentama Zemljine atmosfere. Drugi izvor kozmičkog zračenja je otpuštanje nabijenih čestica sa Sunca, koje su izraženije tijekom razdoblja sunčanih oluja. Svemirske kozmičke zrake se sastoje od protona (90%), jezgri helija (9%) i elektrona (1%). Kada ove zrake udare u Zemljinu atmosferu, nastaju sekundarne nuklearne reakcije. Pritom se stvaraju sekundarni neutroni koji uzrokuju daljnje nuklearne reakcije. [63]

Početna energija pojedinačnih čestica čini široki spektar od nekoliko elektronvolti (eV) do oko 1020 eV. Kozmičko zračenje postepeno gubi energiju kako prodire u atmosferu. Zaštitni štiti atmosfere i Zemljino magnetsko polje sprječavaju da komponente zračenja manje energije prodru u atmosferu. Najtvrde komponente kozmičkog zračenja, mezoni, najviše su prisutni na razini mora, nadmorskoj visini od 0 metara. Na oko 5 km iznad razine mora, elektroni su jednaki mezonima ili su čak u malo većem udjelu, dok na 25 km nadmorske visine dominiraju protoni. Dok prodire kroz atmosferu, kozmičko zračenje proizvodi X-zrake i neutrone. Pošto je u višim predjelima Zemljine kore (planine) tanji sloj atmosfere, na tim područjima ljudi imaju puno višu razinu izloženosti zračenju nego na moru. Općenito, intenzitet kozmičkog zračenja jako ovisi o nadmorskoj visini, a vrlo malo o zemljopisnoj širini. Učinak geografske širine je posljedica prirode nabijenih čestica primarnih kozmičkih zraka i učinka Zemljinog magnetskog polja, koje nastoji usmjeriti ione dalje od ekvatora prema polovima. [64]



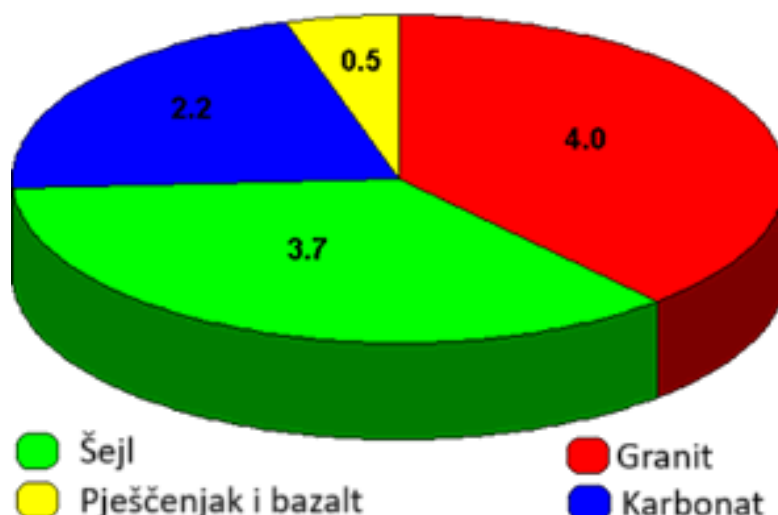
Slika 15: Prikaz kozmičkog zračenja [65]

Primarne čestice kozmičkog zračenja se često pretvaraju u nove čestice. Prodor nabijenih čestica uvelike ovisi o magnetnom polju. Tijekom i nakon usporavanja u atmosferi, neutroni mogu proizvesti radioaktivne izotope, primjerice  $^{14}\text{C}$  i  $^3\text{H}$ . Debljina atmosfere odgovara stupcu od oko 10 m vode ili sloju od oko 4 m betona. Na razini mora kozmičko zračenje na ljudsko tijelo iznosi prosječno 0,27 mSV/god. Intenzitet kozmičkog zračenja značajno raste s nadmorskom visinom. [66]

#### **4.1.2. Zemaljsko zračenje**

Zemaljsko ili terestričko zračenje jedan je od tipova prirodne radioaktivnosti kojem su izloženi svi ljudi. Ono potječe od prirodnih ili radioaktivnih tvari koje postoje u tlu i u slojevima stijena Zemljine kore u regionalno različitim koncentracijama. Različite stijene i tla, vrlo su važne mineralne sirovine za izradu građevnih materijala. Radionuklidi sadržani u njima prelaze na građevinske materijale kao što su cigla i beton te na taj način također doprinose izloženosti ljudi prirodnoj radioaktivnosti. Prosječno zračenje koje dolazi od tog oblika iznosi oko 0,4 mSv/god u prosjeku za ljude. [67]

Zemljina kora je izvor terestričkog zračenja. Radioaktivni elementi poput urana i torija, te izotop kalija-40 prirodno se pojavljuju u tlu i stijenama. Niz uranovih izotopa, koji počinje s  $^{238}\text{U}$ , koji ima najduže vrijeme poluraspada od 4,5 milijardi godina, ima 14 radionuklida (8 od njih su alfa emiteri, a 6 su beta emiteri). Najvažniji radionuklidi su  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{210}\text{Pb}$ . Izotop radona  $^{222}\text{Rn}$  prisutan je u zraku te daje najveću dozu zračenja kojoj su ljudi izloženi (gotovo polovicu godišnje efektivne doze). [68]



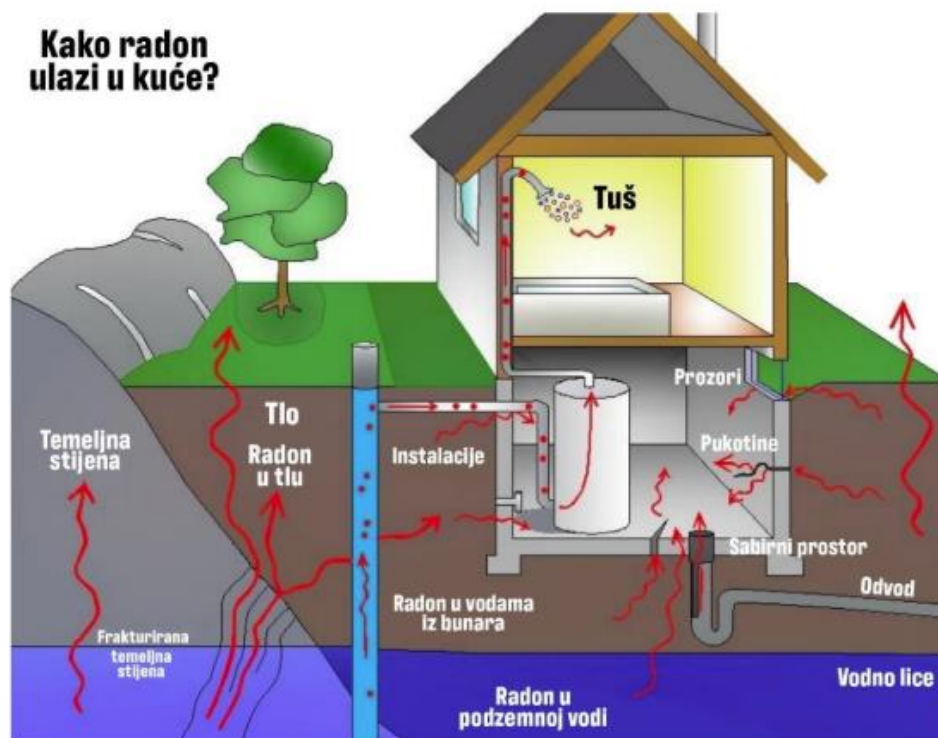
Slika 16: Udjeli urana u ppm (eng. *parts per million*) u pojedinim vrstama stijena [69]

Utvrđivanje izloženosti stanovništva zračenju koje potječe od građevnih materijala je važno jer gotovo 80% ljudskog života čovjek provede u zatvorenim prostorima. Većina građevinskih materijala u sebi sadrži (u manjoj ili većoj koncentraciji) prirodne radioaktivne izotope poput  $^{232}\text{Th}$  i  $^{238}\text{U}$  te  $^{40}\text{K}$ . [70]

Istraživanje koje je provela grupa znanstvenika u Iranu bilo je usredotočeno na prirodnu radioaktivnost u građevnom materijalu koji se nalazi u zgradama. Ispitivano je pet popularnih građevnih materijala: cement, gips, betonski blokovi, cigla i šljunak. Rezultati istraživanja pokazali su da uzorci cementa imaju maksimalne vrijednosti  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$ , dok je najmanja vrijednost tih dvaju izotopa bila u uzorcima gipsa. Kada govorimo o izotopu  $^{40}\text{K}$ , najniže vrijednosti su bile u uzorcima gipsa, dok najviše u uzorcima opeke. Izračunate vrijednosti zračenja za radij bile su ispod dopuštenih razina za sve građevinske materijale. Vrijednosti indeksa opasnosti za sve radioaktivne elemente bile su ispod preporučenih razina, stoga se zgrade izgrađene od takvih materijala smatraju sigurnima za svoje stanovnike. Ovi rezultati istraživanja su u skladu s drugim rezultatima istraživanja koja su provedena u raznim dijelovima svijeta. [71]

### 4.1.3. Radon

Jedan od načina kojim se ljudi izlažu prirodnom zračenju je i udisanjem radioaktivnih plinova koje tvore radioaktivni minerali koji su sastavni dio tla i stijena Zemljine kore. Radon je radioaktivni plin koji nema boje ni mirisa, a nastaje uslijed raspada  $^{238}\text{U}$ . To je inertan plin, što znači da ne reagira s okolnom materijom. Budući da ne reagira, može se lako kretati kroz tlo i dalje u atmosferu. Toron je radioaktivni plin koji nastaje radioaktivnim raspadom elementa torija. Razine radona i torona značajno variraju ovisno o sastavu tla i stijena. Nakon što se ispuste u zrak, ti se plinovi obično razrijede do bezopasnih razina u atmosferi, ali ponekad ostaju zarobljeni i akumulirani unutar zgrada gdje ih stanari udišu. Udisanje povećane količine radona tijekom duljeg vremenskog razdoblja povećava rizik od dobivanja raka pluća. [72]



Slika 17: Načini ulaska plina radona u stambene objekte [73]

#### 4.1.4. Radioaktivnost iz hrane

Male količine radioaktivnih elemenata mogu se naći prirodno u sadržaju hrane i pitke vode. Jedan od primjera je uzgoj povrtnih kultura u tlu koje sadrži radioaktivne materijale. Nakon što ih čovjek konzumira, ovi radioaktivni materijali rezultiraju unutarnjom izloženošću prirodnim zračenjem. Radioaktivni izotopi koji se pojavljuju u prirodi, kao što su  $^{40}\text{K}$  i  $^{14}\text{C}$  imaju ista kemijska i biološka svojstva kao i njihovi neradioaktivni izotopi. Ovi radioaktivni i neradioaktivni elementi se koriste u izgradnji i održavanju procesa u našem tijelu. *Tablica 2.* koja se nalazi u nastavku teksta, pokazuje količinu radioaktivnosti  $^{40}\text{K}$  sadržanu u 500 grama različitih prehrambenih proizvoda, izraženu u bekerelima. [74]

*Tablica 2. Sadržaj kalija-40 u hrani [74]*

Hrana	Bekerel (Bq) na 500 grama
Crveno meso	56
Mrkva	63
Bijeli krumpir	63
Banana	65
Lima grah	86
Brazilski orah	103

Primjerice, banana sadrži male količine radioaktivnih elemenata koji ne predstavljaju opasnosti od zračenja za osobu koja ih konzumira. Ona sadrži prirodno visoku koncentraciju kalija koji pomaže stezanju mišića, održava pravilan rad srca i neutralizira štetne učinke natrija na krvni tlak. Mali dio kalija je također prirodno radioaktivan, ali te su koncentracije bezazlene za čovjeka. Prema istraživanjima, osoba bi morala pojesti sto banana kako bi primila istu količinu izloženosti zračenju koju prirodno dobiva svakodnevno iz okoliša iz drugih izvora. Ovo zračenje koje se spominje u tekstu, nije isto što i zračenje hrane u smislu procesa koji ljudi koriste za ubijanje bakterija, plijesni i štetnika kako bi spriječili bolesti i kvarenje hrane. Razine prirodnih radionuklida koji se nalaze u hrani i vodi su niske i smatraju se sigurne za ljudsku prehranu. Može se spomenuti i zanimljivost da su ljudi međusobno izvor izloženosti radioaktivnog zračenja

jedni prema drugima. Od rođenja, ljudi imaju unutarnje zračenje u obliku radioaktivnog  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{14}\text{C}$ . Ti elementi se nalaze u ljudskoj krvi i kostima. Kao što je prije spomenuto, ljudi unose u organizam u tragovima prirodne radioaktivne materijale koji se nalaze u hrani i vodi. Kada ljudsko tijelo metabolizira te elemente, ono tada sadrži male količine zračenja koje može djelovati kao izloženost drugima. [75]

## **4.2. Umjetni izvori radioaktivnosti**

### ***4.2.1. Radioaktivnost u medicini***

Osim prirodne radioaktivnosti, na koju čovjek ne može utjecati, postoji i umjetno (antropogeno) izazvana radioaktivnost. Jedna od primjena umjetne radioaktivnosti je u medicini. Najpoznatija upotreba u medicini je rendgensko zračenje koje je značajno za određivanje lomova kostiju i dijagnozu pojedinih bolesti.

Drugi primjer je nuklearna medicina, koja koristi radioaktivne izotope za dijagnosticiranje i liječenje bolesti poput raka.

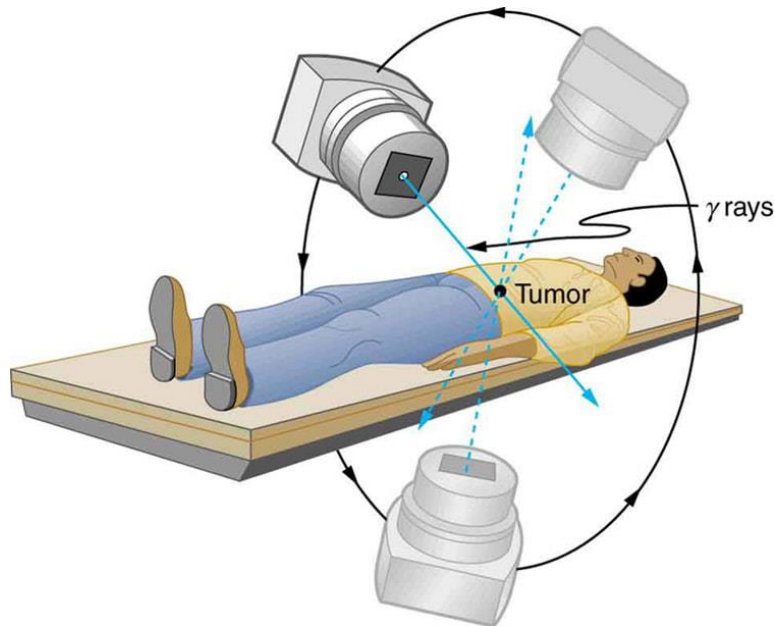
U zemljama gdje je medicina prilično razvijena, čak do 50% ljudske izloženosti zračenju otpada na medicinsku primjenu. Većina tog zračenja dolazi od standardne rendgenske i CT tehnologije za dijagnosticiranje ozljeda i bolesti. Drugi postupci kao što je terapija zračenjem se također koriste za liječenje pacijenata. [76]

U medicini se gama zrake mogu koristiti i za sterilizaciju kirurških instrumenata. Gama zrake može zaustaviti samo debeli sloj olova, tako da one vrlo lako prolaze kroz medicinsku opremu, te na taj način ubijaju viruse i bakterije koje kontaminiraju medicinsku opremu. Prednost je ta što se sterilizacija može obaviti bez visokih temperatura pa se može koristiti i za plastične materijale. [77]

Radioizotopi su našli široku primjenu u dijagnostici i terapiji, a to je dovelo do naglog razvoja nuklearne medicine. Ovi radioaktivni izotopi pokazali su se posebno učinkoviti kao tragači u određenim dijagnostičkim postupcima. Kako su radioizotopi kemijski identični stabilnim izotopima istog elementa, oni mogu zauzeti mjesto umjesto njih u fiziološkim procesima. Zbog svoje radioaktivnosti, lako se mogu pratiti čak i u malim količinama s uređajima za detekciju kao što su spektrometri gama zraka i proporcionalni brojači. Iako se mnogi radioizotopi koriste kao tragači, jod-131, fosfor-32 i tehnecij-99 su među najvažnijima. Jod-131 se koristi za određivanje minutnog volumena srca, volumena



plazme i metabolizma masti, a posebno za mjerenje aktivnosti štitnjače u kojoj se ovaj izotop nakuplja. Fosfor-32 je koristan u identifikaciji malignih tumora jer stanice raka imaju tendenciju akumulirati fosfate više od normalnih stanica. Tehnecij-99 se koristi u uređajima za radiografsko skeniranje te je značajan za proučavanje anatomske strukture organa. Radioaktivni izotopi kao što su kobalt-60 i cezij-137 se često koriste pri liječenju raka. Mogu se selektivno primijeniti na maligne tumore i tako minimizirati oštećenje susjednog zdravog tkiva. [78]



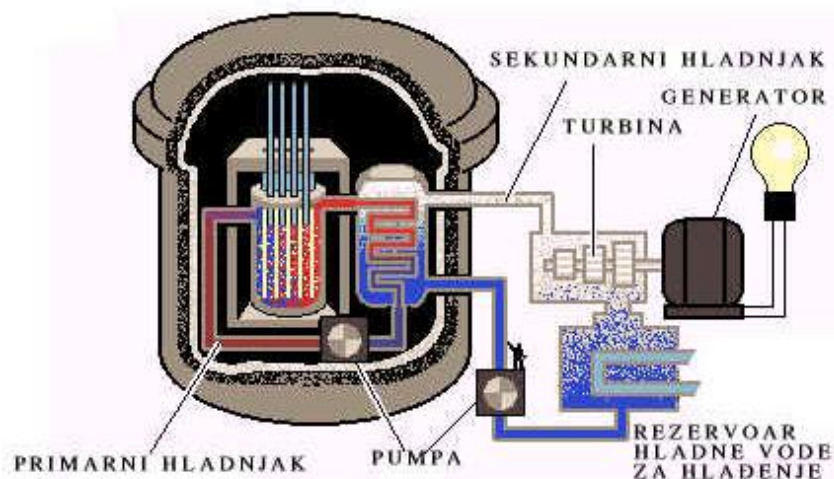
Slika 18: Primjena radioizotopa u nuklearnoj medicini za liječenje raka [79]

#### **4.2.2. Radioaktivnost u industriji**

Najvažnija primjena radioaktivnosti u industriji je za proizvodnju električne energije koja se temelji na oslobađanju energije pri procesu fisije urana i događa se u nuklearnim elektranama.

Nuklearni reaktor u nuklearnim elektranama proizvodi i kontrolira oslobađanje energije koja nastaje cijepanjem atoma nekih radioaktivnih elemenata. Energija koja se oslobodi u nuklearnom reaktoru se koristi kao toplina za stvaranje vodene pare iz koje se proizvodi električna energija. Princip rada nuklearnih elektrana za proizvodnju električne energije je skoro isti za većinu tipova nuklearnih reaktora. U reaktorima se energija koja se oslobodi kontinuiranom fisijom iz atoma goriva (najčešće urana) koristi za zagrijavanje plina ili vode i proizvodnju vodene pare. Ona služi za pokretanje turbina iz kojih se dobiva

električna energija (kao u većini postrojenja na fosilna goriva). Postoji nekoliko vrste nuklearnih reaktora. Najviše korišteni je tlačni reaktor (PWR – eng. *Pressurized Water Reactor*) u kojem voda koja je zagrijana na temperaturu od oko 300°C te je pod tlakom ulazi u primarni krug hlađenja te prenosi toplinu i zatim ulazi u drugi krug hlađenja u kojem stvara vodenu paru. Manje korišteni tip reaktora je kipući reaktor (BWR – eng. *Boiling Water Reactor*) u kojem se vodena para proizvodi već u primarnom krugu reaktora, odnosno iznad jezgre reaktora, pri približno istoj temperaturi i tlaku. Voda se koristi kao sredstvo za rashlađivanje i kao moderator za usporavanje neutrona u jednom i drugom tipu reaktora. Obzirom da voda obično ključa na 100°C, ti reaktori imaju velike čelične tlačne posude ili cijevi zbog kojih mogu raditi na puno višim temperaturama. [80]

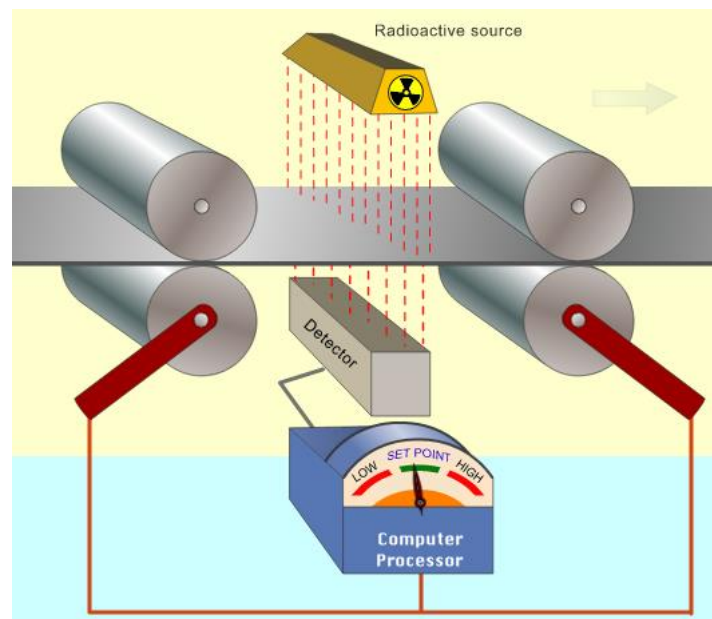


Slika 19: Dijelovi nuklearnog reaktora [81]

Nuklearne elektrane pokreće radioaktivni uran, odnosno proces fisije, koju nuklearni reaktori pretvaraju u toplinsku energiju. Radioaktivni uran emitira radioaktivne čestice od kojih većina tih tvari ostaje zarobljena u kuglicama uranovog goriva ili u zatvorenim metalnim gorivim šipkama. Međutim, mali dio tih radioaktivnih tvari se ipak uspije pomiješati s vodom koja služi za hlađenje reaktora. U vodi se nalaze i druge nečistoće koje isto tako postaju radioaktivne pri prolasku kroz reaktor. Prolaskom kroz reaktor, ta se voda filtrira i obrađuje tako da se uklone radioaktivne nečistoće koje ima u sebi prije

vraćanja u okoliš. Bez obzira na to, mala količina radioaktivnih plinova i tekućina se u konačnici ispušta u okoliš pod strogo kontroliranim i nadziranim uvjetima. [82]

Radioizotopi u industriji služe i za mjerenje i kontrolu debljine ili gustoće metalnih i plastičnih ploča. Koriste se i za ispitivanje kvalitete čelika u proizvodnji automobila i dobivanje odgovarajuće debljine kositra i aluminija. U zrakoplovnoj industriji se koriste za provjeru nedostataka u mlaznim motorima. U građevini za mjerenje gustoće cestovnih površina i podzemlja. U naftnoj i rudarskoj industriji se koriste za kartiranje kontura probnih bušotina i bušotina u rudnicima. U proizvodnji električnih kabela za provjeru pukotina na kablovima. Izotop  $^{241}\text{Am}$  se koristi u detektorima dima za zgrade te za kontrolu debljine metalnih folija i mjerenje razine toksičnog olova u osušenim uzorcima boje. Izotop  $^{252}\text{Cf}$  (emiter neutrona) se koristi za analizu aktivacije neutrona, za pregled zrakoplovne prtljage za skrivene eksplozive, za mjerenje sadržaja vlage u tlu i drugim materijalima, te u karotaži bušotina u geologiji. [83]



Slika 20: Kontrola debljine metalnih ploča u industriji [79]

## 5. ZAKLJUČAK

Radioaktivnost je otkrivena krajem 19. stoljeća na sasvim slučajan način te je ubrzo privukla pažnju brojnih znanstvenika i istraživača. U ranim počecima, oni nisu bili svjesni da radioaktivno zračenje može imati negativne učinke na ljudsko zdravlje. Razvoj nuklearne fizike razvijao se značajnom brzinom, pa je već u četrdesetim godinama 20. stoljeća upotrijebljen proces fisije za razvoj atomske bombe, a nedugo zatim počela se primjenjivati za proizvodnju električne energije u nuklearnim reaktorima.

Proces nuklearne fisije je često primjenjivan za proizvodnju električne energije, dok je proces nuklearne fuzije i dalje težnja znanstvenika da u budućnosti postane glavni izvor električne energije. Međutim, dosadašnja istraživanja nisu uspjela pronaći pravo rješenje kako to postići.

Radioaktivni procesi imaju važnu primjenu u svakodnevnom životu. U medicini se primjenjuju za bitne preglede i terapije koje mogu pomoći pri liječenju od raka, a u industriji imaju veliku primjenu u raznim sektorima.

Iako je zračenje sveprisutno u našem svakodnevnom životu, u većini slučajeva je ono bezazleno i nije opasno po ljudsko zdravlje ako se dozira u malim količinama. Razvijeni su brojni mjerni instrumenti koji mogu konstantno pratiti i kontrolirati razinu zračenja te tako kontrolirati da je izloženost zračenju unutar dozvoljenih granica koje su propisane. Iako je radioaktivno zračenje potencijalno opasno, treba zaključiti da za razvoj tehnologije i općenito kvalitete života ljudi će ono u budućnosti odigrati veliku ulogu.

## 6. LITERATURA

- [1] M. F. L'Annunziata, Radioactivity: Introduction and History, From the Quantum to Quarks, 2nd Ed., Elsevier, 2016.
- [2] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_R%C3%B6ntgen/](https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_R%C3%B6ntgen/), 02.05.2024.
- [3] URL: <https://timeline.web.cern.ch/becquerel-discovers-radioactivity/>, 03.05.2024.
- [4] URL: <https://www.phy.pmf.unizg.hr/~dpaar/fizicari/xcurie.html>, 02.05.2024.
- [5] URL: <https://www.newscientist.com/people/marie-curie/>, 02.05.2024.
- [6] URL: <https://www.aps.org/archives/publications/apsnews/200412/history.cfm>, 03.05.2024.
- [7] URL: <https://www.khanacademy.org/humanities/big-history-project/stars-and-elements/knowning-stars-elements/a/marie-curie>, 02.05.2024.
- [8] URL: <https://www.britannica.com/biography/Ernest-Rutherford/McGill-University>, 03.05.2024.
- [9] URL: <https://www.britannica.com/science/Bohr-model/>, 02.05.2024.
- [10] URL: <https://socratic.org/questions/what-does-bohr-s-model-of-the-atom-look-like>, 04.05.2024.
- [11] URL: <https://www.manchester.ac.uk/discover/news/rutherfords-legacy—the-birth-of-nuclear-physics-in-manchester/>, 03.05.2024.
- [12] A. Brown, The Neutron and the Bomb: A Biography of Sir James Chadwick, Oxford University Press, 1997.
- [13] URL: <https://www.aps.org/archives/publications/apsnews/201904/history.cfm/>, 04.05.2024.
- [14] URL: <https://www.mpic.de/4469988/die-entdeckung-der-kernspaltung/>, 04.05.2024.
- [15] URL: <https://www.nemis.hr/index.php/struktura-tvari/povijest-nuklearne-energije.html>, 04.05.2024.

- [16] URL: <https://inl.gov/feature-story/ebr-i-lights-up-the-history-of-nuclear-energy-development>, 04.05.2024.
- [17] URL: <https://www.energy.gov/ne/articles/9-notable-facts-about-worlds-first-nuclear-power-plant-ebr-i/>, 04.05.2024.
- [18] URL: <http://large.stanford.edu/courses/2022/ph241/bernstel1/>, 04.05.2024.
- [19] URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/radioactivity/>, 04.05.2024.
- [20] Vincent P. Guinn, Enciklopedija fizičke znanosti i tehnologije (treće izdanje), 2003.
- [21] URL: <https://gradivo.hr/pages/radioaktivnost>, 05.05.2024.
- [22] URL: <http://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/health-effects/measuring-radiation.html>, 05.05.2024.
- [23] URL: <https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/2251692/nuklearne-reakcije.html/>, 05.05.2024.
- [24] URL: <https://www.britannica.com/science/nuclear-fission>, 05.05.2024.
- [25] URL: [https://nuklem.tripod.com/nuklearna\\_fisija.htm](https://nuklem.tripod.com/nuklearna_fisija.htm), 05.05.2024.
- [26] J. R. Lamarsh, A. J. Baratta, Introduction to Nuclear Engineering (3<sup>rd</sup> edition), 2001.
- [27] URL: <https://www.toppr.com/guides/physics/nuclei/nuclear-energy-nuclear-fusion>, 05.05.2024.
- [28] URL: <https://www.energy.gov/science/doe-explainsdeuterium-tritium-fusion-reactor-fuel/>, 05.05.2024.
- [29] URL: [https://nuklem.tripod.com/nuklearna\\_fuzija.htm](https://nuklem.tripod.com/nuklearna_fuzija.htm), 05.05.2024.
- [30] URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion/>, 05.05.2024.
- [31] URL: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radioactive-decay/radioactive-decay-law/>, 08.05.2024.
- [32] J. Walker, D. Halliday, R. Resnick, Fundamentals of physics, 10th edition, 2014.
- [33] URL: <https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/2251080/zakon-radioaktivnog-raspada.html>, 08.05.2024.

- [34] URL: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radioactive-decay/alpha-decay-alpha-radioactivity>, 08.05.2024.
- [35] URL: <https://brainly.com/>, 11.05.2024.
- [36] Scott B. Toksikologija zračenja, ionizirajuće i neionizirajuće. Enciklopedija toksikologije. 2014.
- [37] URL: <https://www.fond-nek.hr/radioaktivnost>, 08.05.2024.
- [38] URL: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/radioactive-decay/alpha-decay-vs-beta-decay-radioactivity>, 11.05.2024.
- [39] URL:  
[http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/ocr\\_gateway\\_pre\\_2011/living\\_future/4\\_nuclear\\_radiation2.shtml](http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/ocr_gateway_pre_2011/living_future/4_nuclear_radiation2.shtml), 11.05.2024.
- [40] URL:  
[http://chemteacher.chemeddl.org/services/chemteacher/index.php?option=com\\_content&view=article&id=65](http://chemteacher.chemeddl.org/services/chemteacher/index.php?option=com_content&view=article&id=65), 11.05.2024.
- [41] URL: <https://www.energy.gov/science/doe-explainsbeta-decay>, 11.05.2024.
- [42] URL: <https://radiopaedia.org/articles/beta-decay/>, 11.05.2024.
- [43] URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/betaex.html/>, 11.05.2024.
- [44] Collum B., Zračenje. Nuklearni objekti. 2017.
- [45] Paydar A., Balgehshiri S., Zohuri B., Reakcije nuklearne energije potaknute radijacijskim očvršćavanjem okolina. Napredni koncepti reaktora (ARC), 2023.
- [46] URL: <https://education.jlab.org/glossary/betadecay.html/>, 18.05.2024.
- [47] P. Allisy-Roberts, J. Williams, Farr's Physics for Medical Imaging, Drugo izdanje, 2008.
- [48] URL: <http://www.epa.gov/radiation/understand/gamma.html#use>, 18.05.2024.
- [49] URL: <https://radiopaedia.org/articles/gamma-decay?lang=us>, 18.05.2024.
- [50] Gopal B. Saha. Fizika i radiobiologija nuklearne medicine., 2010.
- [51] URL: <http://www.physicshandbook.com/topic/topicg/gamma.htm>, 18.05.2024.

- [52] URL: <https://www.wizeprep.com/online-courses/4350/chapter/13/core/4/1/>, 18.05.2024.
- [53] URL: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gamma\\_decay#cite\\_note-EPA-1/](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gamma_decay#cite_note-EPA-1/), 18.05.2024.
- [54] URL: <http://www.epa.gov/radiation/understand/gamma.html#use/>, 18.05.2024.
- [55] URL: <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/radiation/measurement/>, 19.05.2024.
- [56] URL: <https://www.bfs.de/EN/topics/ion/accident-management/who-does-what/measure/measure.html/>, 19.05.2024.
- [57] URL: <https://www.bfs.de/EN/topics/ion/accident-management/who-does-what/measure/measure.html>, 19.05.2024.
- [58] URL: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov\\_broja%C4%8D](https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov_broja%C4%8D), 19.05.2024.
- [59] URL: <https://www.quora.com/>, 19.05.2024.
- [60] URL: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/semiconductor-detectors>, 25.05.2024.
- [61] URL: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/radiation/types-and-sources-of-radiation/>, 25.05.2024.
- [62] URL: <https://www.who.int/>, 25.05.2024.
- [63] URL: <https://www.gov.si/en/topics/sources-of-radioactivity-in-the-environment/>, 25.05.2024.
- [64] D. Shahbazi-Gahrouei, Dozimetrija prirodnog pozadinskog zračenja u regiji s najvećom nadmorskom visinom u Iranu, J Radiat Res. 2003.
- [65] URL: <https://www.iaea.org/>, 25.05.2024.
- [66] Nakamura T, Uwamino Y, Ohkubo T, Hara A., Varijacija visine neutrona kozmičkih zraka. *zdravstvo fiz*, 1987.
- [67] URL: <https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/natural-radiation/natural-radiation.html/>, 29.05.2024.



- [68] URL: <https://www.gov.si/en/topics/sources-of-radioactivity-in-the-environment/>, 29.05.2024.
- [69] URL: <https://www.cyberphysics.co.uk/>, 29.05.2024.
- [70] Faghihi R., Mehdizadeh S., Sina S., Prirodna i umjetna distribucija radioaktivnosti u tlu provincije Fars, Iran. Radiat Prot dozimetrija, 2010.
- [71] Mehdizadeh S., Faghihi R., Sina S., Prirodna radioaktivnost u građevinskom materijalu u Iranu, Iran. Nukleonika. 2011.
- [72] URL: [https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/radon/effects/effects\\_node.html/](https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/radon/effects/effects_node.html/), 29.05.2024.
- [73] URL: <https://www.familyactionnetwork.net/>, 01.06.2024.
- [74] URL: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/radiation/types-and-sources-of-radiation>, 01.06.2024.
- [75] URL: <https://www.versantphysics.com/2021/06/15/the-truth-about-background-radiation>, 01.06.2024.
- [76] Hricak H., Brenner D.J., Adelstein S.J., Frush D.P., Hall E.J., Upravljanje korištenjem zračenja u medicinskim slikama: višestruki izazov. Radiologija. 2011.
- [77] URL: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zpjy3j6/revision/1/>, 02.06.2024.
- [78] URL: <https://www.britannica.com/science/radioactivity/Applications-of-radioactivity>, 02.06.2024.
- [79] URL: <https://www.islandphysics.com/nuclear-physics.html>, 02.06.2024.
- [80] URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors/>, 02.06.2024.
- [81] URL: [https://nuklem.tripod.com/nuklearni\\_reaktor.htm/](https://nuklem.tripod.com/nuklearni_reaktor.htm/), 01.06.2024.
- [82] URL: <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/uses-radiation.html>, 02.06.2024.
- [83] URL: <https://www2.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/13/6.html>, 02.06.2024.