

# Radioaktivnost u okolišu

---

**Bakalić, Fani**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:167:354272>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-02**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**

**RADIOAKTIVNOST U OKOLIŠU**  
**ZAVRŠNI RAD**

**FANI BAKALIĆ**  
**MATIČNI BROJ: 1460**

**Split, rujan 2023.**



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET**  
**PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE**  
**KEMIJSKO INŽENJERSTVO**

**RADIOAKTIVNOST U OKOLIŠU**  
**ZAVRŠNI RAD**

**FANI BAKALIĆ**  
**MATIČNI BROJ: 1460**

**Split, rujan 2023.**

**UNIVERSITY OF SPLIT**  
**FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY**  
**UNDERGRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY**  
**CHEMICAL ENGINEERING**

**RADIOACTIVITY IN THE ENVIRONMENT**  
**BACHELOR THESIS**

**FANI BAKALIĆ**

**Parent number: 1460**

**Split, September 2023.**

## TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu  
Kemijsko-tehnološki fakultet  
Prijediplomski studij kemijske tehnologije

**Znanstveno područje:** Prirodne znanosti  
**Znanstveno polje:** Fizika  
**Mentor:** dr. sc. Mirko Marušić, viši predavač

### RADIOAKTIVNOST U OKOLIŠU

Fani Bakalić

#### Sažetak:

Spontano emitiranje čestica ili zračenja prouzrokovano raspadom nestabilnih atomskih jezgri naziva se radioaktivnost. Čovjek je svakodnevno izložen zračenju, često ne znajući da su radioaktivne čestice prisutne u zraku, u tlu pa i u ljudskom organizmu. Ovaj rad podijeljen je na dva dijela. U prvom dijelu razmatra se povijesni razvoj radioaktivnosti počevši od otkrića 1896. godine. Nakon toga su definirani temeljni pojmovi vezani uz radioaktivnost i radioaktivno zračenje poput radioaktivnog raspada, nuklearnih reakcija, doza zračenja te mjernih uređaja. Zatim se u drugom dijelu prikazuje podjela zračenja na prirodno i umjetno te posredni i neposredni učinci na čovjeka i ljudsko zdravlje.

**Ključne riječi:** radioaktivnost, nuklearne reakcije, prirodno zračenje, umjetno zračenje

**Rad sadrži:** 40 stranica, 16 slika, 2 tablice, 35 literaturnih referenci

**Jezik izvornika:** hrvatski

#### Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

1. Doc. dr. sc. Maša Buljac - predsjednik
2. Doc. dr. sc. Martina Perić Bakulić - član
3. Dr. sc. Mirko Marušić, viši predavač – član-mentor

#### Datum obrane:

**Rad je u tiskanom i elektroničkom (PDF) obliku pohranjen** u Knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu, Ruđera Boškovića 35, u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice u Splitu te u javnoj internetskoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

## BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split  
Faculty of Chemistry and Technology  
Undergraduate Study of Chemical Technology

**Scientific area:** Natural Sciences  
**Scientific field:** Physics  
**Supervisor:** PhD Mirko Marušić, senior lecturer

### RADIOACTIVITY IN THE ENVIRONMENT

Fani Bakalić

#### Abstract:

The spontaneous emission of particles or radiation caused by the decay of unstable atomic nuclei is called radioactivity. Humans are exposed to radiation daily, often not knowing that radioactive particles are present in the air, the soil and even the human body. This paper is divided into two parts. The first part discusses the historical development of radioactivity starting from its discovery in 1896. Afterward, fundamental terms related to radioactivity and radioactive radiation are defined, such as radioactive decay, nuclear reactions, radiation doses, and measuring devices. Following that, the second part presents the division of radiation into natural and artificial as well as the indirect and direct effects on humans and human health.

**Keywords:** radioactivity, nuclear reactions, natural radiation, artificial radiation

**Thesis contains:** 40 pages, 16 figures, 2 tables, 35 references

**Original in:** Croatian

#### Defence committee for evaluation and defense of bachelor thesis:

1. Maša Buljac – PhD, assistant professor - chair person
2. Martina Perić Bakulić – PhD, assistant professor - member
3. Mirko Marušić - PhD, senior lecturer - supervisor

#### Defence date:

**Printed and electronic (PDF) form of thesis is deposited in** Library of Faculty of Chemistry and Technology in Split, Ruđera Boškovića 35, in the public library database of the University of Split Library and in the digital academic archives and repositories of the National and University Library.

*Završni rad je izrađen u Zavodu za fiziku, Kemijsko tehnološkog fakulteta u Splitu  
pod mentorstvom dr. sc. Mirka Marušića u razdoblju od svibnja do rujna 2023. godine.*



*Zahvala*

*Zahvaljujem se svom mentoru dr. sc. Mirku Marušiću na velikoj pomoći i savjetima te na uloženom vremenu prilikom izrade ovog završnog rada.*

*Hvala mojoj obitelji i prijateljima na ljubavi, podršci i razumijevanju tijekom studija.*

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

- objasniti temeljna otkrića vezana uz radioaktivnost
- objasniti nuklearne procese
- opisati instrumente za mjerenje radioaktivnog zračenja
- prikazati izvore radioaktivnosti u okolišu
- objasniti utjecaj radioaktivnosti na čovjeka i okoliš

## **SAŽETAK**

Spontano emitiranje čestica ili zračenja prouzrokovano raspadom nestabilnih atomskih jezgri naziva se radioaktivnost. Čovjek je svakodnevno izložen zračenju, često ne znajući da su radioaktivne čestice prisutne u zraku, u tlu pa i u ljudskom organizmu. Ovaj rad podijeljen je na dva dijela. U prvom dijelu razmatra se povijesni razvoj radioaktivnosti počevši od otkrića 1896. godine. Nakon toga su definirani temeljni pojmovi vezani uz radioaktivnost i radioaktivno zračenje poput radioaktivnog raspada, nuklearnih reakcija, doza zračenja te mjernih uređaja. Zatim se u drugom dijelu prikazuje podjela zračenja na prirodno i umjetno te posredni i neposredni učinci na čovjeka i ljudsko zdravlje.

**Ključne riječi:** radioaktivnost, nuklearne reakcije, prirodno zračenje, umjetno zračenje

## **ABSTRACT**

The spontaneous emission of particles or radiation caused by the decay of unstable atomic nuclei is called radioactivity. Humans are exposed to radiation daily, often not knowing that radioactive particles are present in the air, the soil and even the human body. This paper is divided into two parts. The first part discusses the historical development of radioactivity starting from its discovery in 1896. Afterward, fundamental terms related to radioactivity and radioactive radiation are defined, such as radioactive decay, nuclear reactions, radiation doses, and measuring devices. Following that, the second part presents the division of radiation into natural and artificial as well as the indirect and direct effects on humans and human health.

**Keywords:** radioactivity, nuclear reactions, natural radiation, artificial radiation

# SADRŽAJ

UVOD .....	1
1. OPĆI DIO.....	3
1.1. Povijesni pregled.....	4
1.2. Pojmovni pregled radioaktivnosti.....	7
1.2.1. Nuklearne reakcije i energija vezanja.....	9
1.2.1.1. Nuklearna fisija .....	11
1.2.1.2. Nuklearna fuzija .....	12
1.2.2. Zakon radioaktivnog raspada.....	13
1.2.3. Vrste radioaktivnog raspada.....	15
1.2.3.1. Alfa raspad .....	15
1.2.3.2. Beta raspad.....	17
1.2.3.3. Gama raspad.....	18
1.3. Mjerni instrumenti .....	20
1.3.1. Ionizacijska komora.....	20
1.3.2. Poluvodički brojač .....	21
1.3.3. Geiger-Mueller brojač.....	22
1.4. Prirodni izvori radioaktivnosti .....	24
1.4.1. Kozmičko zračenje .....	24
1.4.2. Zračenje iz tla.....	25
1.4.3. Zračenje u ljudskom tijelu .....	26
1.5. Umjetni izvori radioaktivnosti .....	28
1.5.1. Primjena zračenja u medicini.....	28
1.5.2. Nuklearni reaktori i nuklearno oružje.....	28
1.6. Posljedice zračenja na čovjeka.....	30
2. ZAKLJUČCI.....	32
3. POPIS KRATICA I SIMBOLA .....	34
4. LITERATURA .....	37



U današnje vrijeme, radioaktivnost je široko istražena znanstvena pojava sa svim svojim pozitivnim i negativnim učincima. Međutim, u vrijeme otkrića, unatrag 120 godina to nije bilo tako. Optimizam koji je zavladao u društvu zbog početnih pozitivnih učinaka nadvladao je mišljenje malobrojnih znanstvenika koji su upozoravali na štetni učinak radioaktivnosti i zagovarali oprez prilikom uporabe radioaktivnih elemenata.

Znanstvenici koji su se bavili proučavanjem radioaktivnosti doprinijeli su da ista dobije široku primjenu u različitim granama znanosti te u svakodnevicu, kao na primjer u medicini, arheologiji, poljoprivredi, industriji i energetici. Nažalost, sredinom 20. stoljeća, nakon bačenih atomskih bombi, čovječanstvo je postalo svjesno razornih učinaka radioaktivnosti i radioaktivnog zračenja.

U ovom radu će se prikazati pregled radioaktivnosti od njenog otkrića, postavljanja fizikalnih zakonitosti te utjecaja na okoliš, a posljedično i na čovjeka.

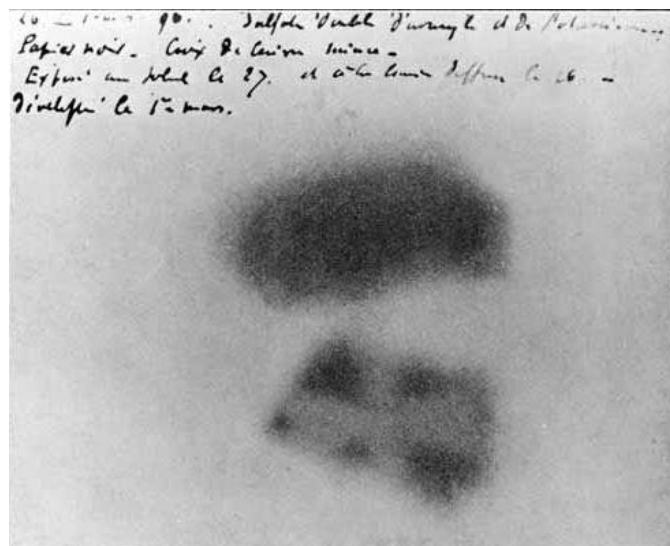




## 1.1. Povijesni pregled

Povijest radioaktivnosti započinje s Wilhelmom C. Rontgenom i rendgenskim zrakama. On je 1895. godine, ispitujući u tamnoj prostoriji katodne zrake iz Crookesove cijevi, primijetio da papir na kojemu je bio barijev platinocijanid svijetli iako je udaljenost od cijevi bila preko 2 metra. Zaključio je da nevidljive zrake nastaju sudarom elektrona sa staklenom cijevi i da mogu proći kroz različite materijale (aluminij, cink, nikal).<sup>1</sup>

Godine 1896. francuski znanstvenik Henri Becquerel provodio je istraživanja fosforescencije. Želio je ispitati emitiraju li i fosforescentni materijali zrake slične rendgenskim. Koristio je uranijeve soli i fotografske ploče koje je zaštitio od izlaganja svjetlosti tako što ih je omotao u crni papir (Slika 1.). Otkrio je da uranijeve soli proizvode svjetlost koja može proći kroz crni papir pa čak i kroz metalni lim. Becquerel je dokazao da sve soli uranija kao i čisti uranij oslobađaju isto zračenje. Također, veliki broj tih zraka su nabijene čestice slične katodnim zrakama, koje magnetsko polje može otkloniti. To je bila potvrda onoga što će kasnije otkriti i Ernest Rutherford; dio zračenja uranijevih soli slično je elektronima. E. Rutherford je te negativno nabijene čestice nazvao beta čestice.<sup>2</sup>

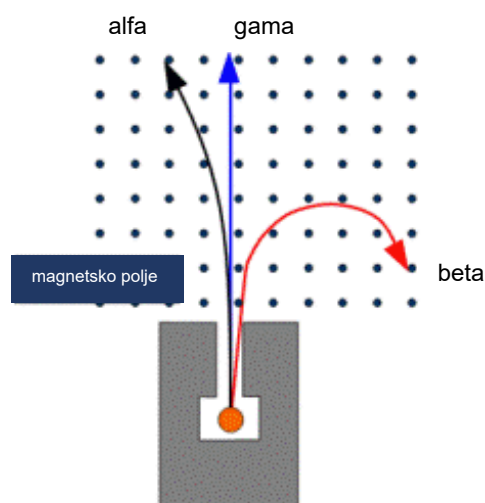


Slika 1. Becquerelova fotografska ploča.<sup>3</sup>

Osim Becquerela, važnu ulogu u otkriću radioaktivnosti imali su i Pierre i Marie Curie zbog kojih je ova nova vrsta zračenja i nazvana radioaktivno zračenje. Naime, 1898. godine, istražujući zračenje kod uranija i torija osmislili su pojam „radioaktivnost“ kojim definiraju spontano ionizirajuće zračenje nekih elemenata. Otkrili su da je

radioaktivnost uranijeve smole veća nego kod čistog uranija te na osnovi toga uspješno izolirali dva elementa: polonij i radij.<sup>4</sup>

Ernest Rutherford i Paul Villard zaslužni su za otkriće vrsta radioaktivnog raspada. Rutherford je 1899. godine prvi otkrio dvije vrste zraka koje je nazvao alfa i beta, a koje se razlikuju po moći prodiranja kroz različite materijale. Godine 1900. u Francuskoj, Villard je, promatrajući ponašanje radija u magnetskom polju, otkrio treću vrstu nazvanu gama zrake. Postavio je komadić radija u olovni spremnik s malim otvorom kroz koji prolazi zračenje. Magnetsko polje djelovalo je na alfa i beta zrake, ali ne i na gama zrake (Slika 2.).<sup>2</sup>



Slika 2. Vrste radioaktivnog zračenja.<sup>5</sup>

Radioaktivni elementi dijele se na prirodne i umjetne. Prirodni su oni s atomskim brojem manjim od 92. Na njihovo stvaranje, za razliku od umjetnih elemenata, nije utjecao čovjek. Do danas je proizvedeno 25 umjetnih elemenata i preko 1300 umjetnih radionuklida. Prvi umjetni radionuklid,  $^{30}\text{P}$ , proizveli su 1934. godine Frédéric Joliet i Irène Joliet-Curie bombardirajući stabilnu jezgru aluminija alfa česticama. Dvije godine kasnije, Enrico Fermi je umjesto alfa čestica koristio spore neutrone te je uspio dobiti više od 400 radioaktivnih izotopa.<sup>2</sup>

Bez obzira koliko su navedena otkrića bila bitna za razvoj znanosti, potrebno je spomenuti štetnost radioaktivnog zračenja. Prve sumnje počele su nekoliko godina nakon Becquerelovog otkrića. Friedrich O. Walkoff proučavao je 1900. godine učinak radija na ljudsko tijelo te su se, nakon manje od sat vremena zračenja radijem, na njegovoj ruci pojavile opekline. Radij se koristio i kao lijek protiv raka, ali i protiv

mnogih drugih bolesti. Nuspojave koje bi se pojavile nakon konzumacije radija smatrale su se manjim problemima.<sup>6</sup> Među najzaslužnijima za razvijanje svijesti o potrebi zaštite na radu je znanstvenik Robley D. Evans. Odredio je najveću dopuštenu koncentraciju radija koje naše tijelo može primiti, a da pritom ne dođe do oštećenja stanica.<sup>7</sup>

Otkriće iz 1897. godine vezano za ionizirajuće zračenje i njegov utjecaj na zdravlje životinja primjer je ranog zanimanja biologa za učinke zračenja. Hermann J. Muller otkrio je 1927. godine da izlaganje X-zrakama može uzrokovati genetske mutacije te je pomogao u obrazovanju o štetnim utjecajima dugoročnog izlaganja radioaktivnosti.<sup>7</sup>

Iako je tijekom bavljenja radioaktivnošću veliki broj znanstvenika stekao ozljede ili su umrli od radioaktivnog zračenja (Friedrich Giesel, Marie Curie i njena kćer Irene, Harry Daghlian, itd.), mišljenje javnosti značajno se promijenilo tek nakon 1945. godine i pada atomskih bombi.<sup>6</sup>

Hrvatski znanstvenici su također bili uključeni u proučavanje radioaktivnosti i to od samih početaka. Već 1896. godine Peter Salcher prvi je u Hrvatskoj prikazao rendgensku sliku ruke. Napisani su brojni članci putem kojih se javnost upoznala s novim otkrićima. Jedan od njih bio je članak Stjepana Mohorovičića iz 1936. godine u kojem je istaknuo svoju teoriju o postojanju elektruma, kasnije nazvanog pozitronij, odnosno vezanog stanja elektrona i pozitrona. To se ubraja među najveće hrvatske doprinose znanosti. Ivan Supek pisao je o kozmičkim zrakama, mezonima, vrstama radioaktivnog zračenja te o mutaciji gena kao posljedici izloženosti zračenju. Na štetnost radioaktivnog zračenja upozoravali su i Vladimir Glumac, Eduard Ante Slavoljub Brixy te Božo Metzger.<sup>8</sup>

## 1.2. Pojmovni pregled radioaktivnosti

Radioaktivnost je proces emitiranja zračenja nastalog kao posljedica nuklearnih reakcija ili spontanom raspadom nestabilne atomske jezgre. Za mjerenje radioaktivnosti nekog kemijskog elementa potrebno je odrediti broj raspadnutih jezgri ili masu radionuklida.<sup>2</sup>

Atomsku jezgru čine protoni i neutroni. Kako bi se atomi razlikovali, uvedeni su atomski ( $Z$ ) i maseni broj ( $A$ ). Atomski broj jednak je ukupnom broju protona u jezgri, a maseni broj je ukupan broj protona i neutrona (nukleona) u atomskoj jezgri. Izotopi su atomi istog kemijskog elementa koji se razlikuju po broju neutrona u atomskoj jezgri te mogu biti stabilni i nestabilni. Cilj nestabilnih jezgri je doći u stabilno stanje. Radioaktivnim raspadom one spontano prelaze u niža energijska stanja. Izotopi elementa koji emitiraju radioaktivno zračenje nazivaju se radionuklidi.<sup>9</sup>

Ernest Rutherford i Frederick Soddy otkrili su da je radioaktivnost posljedica promjena unutar atoma. Uspjeli su odvojiti radioaktivni plin od uranijevih i torijevih soli te su zapazili da se s vremenom radioaktivnost kod plina smanjila, a kod soli povećala neovisno o vanjskim utjecajima. Prepostavili su da radioaktivnim raspadom dolazi do pretvorbe atoma radioaktivnih elemenata u atome drugih elemenata.<sup>9</sup> Radioaktivni raspad pripadaju vrsti zračenja vrlo visoke energije koje ima sposobnost ioniziranja tvari nakon kontakta s njom. To zračenje naziva se ionizirajuće zračenje. Utječe na žive stanice mijenjajući im funkciju što može dovesti i do oštećenja stanice. Najčešće oštećuje tkiva i organe, a posebno su osjetljive mlađe stanice koje se obnavljaju kao što su stanice unutrašnjih organa, koštana srž ili embrij.<sup>10</sup>

Podjela radioaktivnog zračenja prema Rutherfordu:

- 1) alfa zrake – pozitivno nabijene čestice koje se lako apsorbiraju,
- 2) beta zrake – negativno nabijene čestice slične katodnim zrakama,
- 3) gama zrake – neutralni elektromagnetski valovi velike moći prodiranja.

Podjela je potvrđena primjenom magnetskog polja (Slika 2.). Pozitivno nabijene alfa zrake otklanjaju se prema negativnoj elektrodi; dok suprotno nabijene beta zrake idu u suprotnom smjeru do pozitivne elektrode. U kasnijem dijelu rada pobliže će se objasniti i podjela beta zraka na  $\beta^-$  i  $\beta^+$  raspad. Gama zrake, kao što je otkrio Villard, magnetsko polje ne otklanja.<sup>2</sup>

Izvori radioaktivnog zračenja mogu biti prirodni ili umjetni, vanjski ili unutarnji. Prirodne izvore čine prirodno radioaktivne tvari i kozmičko zračenje. Većina ukupnog zračenja dolazi iz ovih izvora i na njih ne možemo utjecati. Umjetni izvori su nuklearni reaktori, rendgenski uređaji i nuklearno oružje. Na neke od njih možemo utjecati (pokrenuti/zaustaviti) dok se, na primjer, zračenje iz jednom bačene nuklearne bombe ne može zaustaviti. Vanjskim izvorom zračenja smatraju se kozmička zračenja ili zračenja nastala pri radu s medicinskim uređajima, a unutarnje zračenje nastaje unosom radioaktivne tvari u organizam udisanjem, intravenozno ili gutanjem.<sup>10</sup>

Metoda za određivanje starosti materijala organskog podrijetla kao što su artefakti od drva, temelji se na radioaktivnom izotopu  $^{14}\text{C}$  koji nastaje raspadom dušika nakon djelovanja kozmičkih zraka. On je prisutan u cijeloj atmosferi kao dio ugljikovog dioksida te se biološkom aktivnosti unosi u žive organizme. Koncentracija  $^{14}\text{C}$  u živim organizmima je stalna zbog ravnoteže između gubitka  $^{14}\text{C}$  radioaktivnim raspadom i njegovog unosa iz atmosfere. Ravnoteža se postiže stalnom izmjenom tvari koja u trenutku završetka biološke aktivnosti organizma prestaje čime prestaje i povećavanje koncentracije  $^{14}\text{C}$ . Mjerenjem preostale koncentracije moguće je odrediti koliko je vremena prošlo od prestanka biološke aktivnosti. Izotop  $^{14}\text{C}$  ima vrijeme poluraspada od 5730 godina te se ova metoda može primijeniti na materijalima starosti do 40 000 godina. Kako se s vremenom koncentracija  $^{14}\text{C}$  u materijalu smanjuje, a nakon 40 000 godina ona iznosi tek 1%, sva mjerenja provedena na starijim uzorcima neće biti precizna.<sup>11,12</sup> Radioaktivno datiranje izotopom  $^{14}\text{C}$  primjenjuje se u arheologiji, geologiji i antropologiji, a za ovo je otkriće Nobelova nagrada za kemiju 1960. godine pripala Willardu F. Libbyu.<sup>1</sup>

Zračenje predaje energiju tvari kroz koju prolazi. Mjerna jedinica za energiju je džul (J), ali mogu se koristiti i manje jedinice poput elektronvolta ( $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ). Za zaštitu od radioaktivnog zračenja treba znati koliko je energije apsorbiralo ljudsko tijelo ili okoliš, odnosno kolika je primljena doza zračenja.<sup>13</sup>

Apsorbirana doza  $D$ , je količina predane energije po jedinici mase ozračenog tijela. Mjerna jedinica je grej ( $\text{Gy} = \text{J/kg}$ ):

$$D = \frac{E_{\text{predano}}}{m} \quad (1)$$

Češće se koristi ekvivalentna doza  $H$ , koja predstavlja umnožak apsorbirane doze i faktora kvalitete (QF):

$$H = QF \times D \quad (2)$$

Faktor kvalitete je veličina kojom se opisuje biološki utjecaj različitih vrsta zračenja. Najštetnijima se smatraju alfa zračenje i neutronske zračenje (energije od 0,1 do 2 MeV), stoga je i njihova vrijednost QF najveća te iznosi 20. Najmanju vrijednost, 1, imaju gama zrake, X-zrake te beta zračenje. Međutim, alfa zrake zbog jako malog dometa predstavljaju manju opasnost od gama ili rendgenskih zraka. Mjerna jedinica za ekvivalentnu dozu je sivert ( $Sv = J/kg$ ).<sup>13</sup>

Svaka živa stanica je različito osjetljiva na zračenje. Ta osjetljivost se opisuje težinskim faktorom,  $w_T$  („*weighting factor*“).

Efektivna doza zračenja je suma umnožaka težinskog faktora i ekvivalentnih doza zračenja svih stanica. Označava se grčkim slovom  $\varepsilon$ , a mjerna jedinica je sivert<sup>13</sup>:

$$\varepsilon = \sum_T w_T H_T. \quad (3)$$

### 1.2.1. Nuklearne reakcije i energija vezanja

Nuklearni procesi dijele se na radioaktivni raspad i nuklearne reakcije. Nuklearne reakcije odvijaju se između atomskih jezgri i elementarnih čestica ili drugih jezgri prilikom čega se jezgra transformira. Prilikom odvijanja ovih reakcija oslobađaju se radioaktivne čestice. U reakciji sudjeluju jezgra projektil i jezgra meta. Ako je projektil pozitivno nabijen tada nuklearna reakcija započinje kada on ima dovoljno veliku kinetičku energiju jer treba savladati Coulombovu barijeru. To je energetska barijera nastala zbog elektrostatskog djelovanja dviju jezgri. Ako je projektil neutron, barijera ne postoji.<sup>9</sup>

Količina energije koja je „oslobođena“ ili „apsorbirana“ tijekom nuklearne reakcije naziva se vrijednošću reakcije,  $Q$ . Kada je  $Q > 0$ , dolazi do oslobađanja energije te se takve reakcije nazivaju egzoergične nuklearne reakcije. Kod endoergičnih nuklearnih reakcija ( $Q < 0$ ) potrebno je uložiti kinetičku energiju za početak reakcije. U slučaju da je  $Q = 0$ , energija se ne oslobađa niti se troši, odnosno nema reakcije. Veličine koje su

očuvane kod svih nuklearnih reakcija su: električni naboj, broj nukleona, ukupna energija i količina gibanja.<sup>14</sup>

Čvrstu povezanost nukleona u jezgri omogućava jaka nuklearna sila. Kako bi se razdvojili, potrebna je energija koje treba više što je jezgra stabilnija. Ta energija naziva se nuklearna energija vezanja:

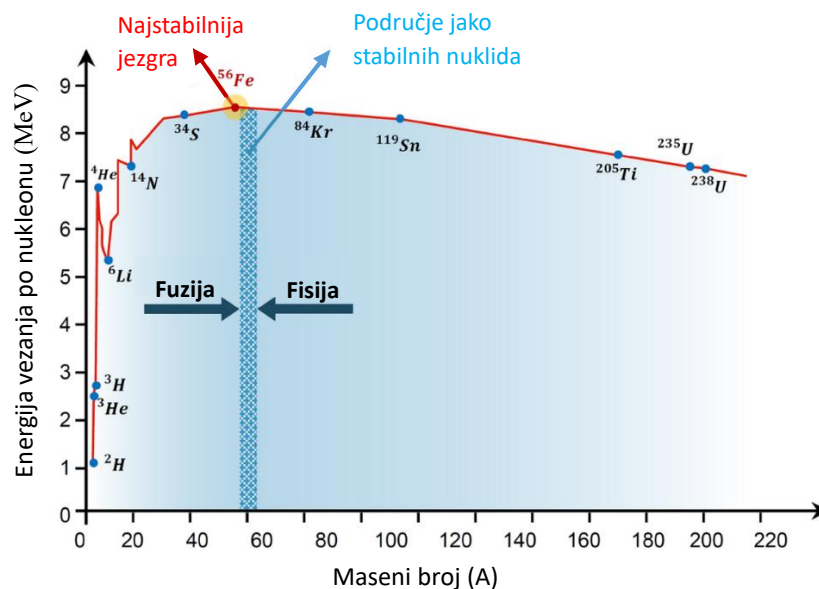
$$E_b = \Delta mc^2 . \quad (4)$$

Defekt mase,  $\Delta m$ , je razlika između mase jezgre i zbroja masa protona i neutrona od kojih je sastavljena. Masa jezgre će uvijek biti manja. Relacija kojom se određuje defekt mase je:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_j . \quad (5)$$

Atomske jezgre razlikuju se po broju nukleona, stoga se energija vezanja češće izražava u obliku energije vezanja po nukleonu. Određivanjem srednje energije vezanja po nukleonu dobiva se procjena stabilnosti jezgre.<sup>12,14</sup>

$$E = \frac{E_b}{A} . \quad (6)$$



Slika 3. Dijagram ovisnosti energije vezanja po nukleonu o masenom broju.<sup>15</sup>

Na Slici 3. prikazana je nuklearna planina koja pokazuje da najveću energiju vezanja po nukleonu ima izotop željeza  $^{56}\text{Fe}$ . Svi ostali kemijski elementi teže tom najstabilnijem stanju, a to je ujedno i cilj svih nuklearnih procesa.

### 1.2.1.1. Nuklearna fisija

Nuklearna fisija je reakcija raspada teške atomske jezgre na dvije lakše jezgre (dva fisijska fragmenta) i neutrone uz oslobađanje energije. Neutroni, koji se emitiraju jako velikom brzinom, bombardiraju druge jezgre koje raspadom također oslobađaju neutrone koji dalje odlaze do ostalih jezgri. Tako nastaje lančana fisijska reakcija.<sup>16</sup>

Veličine bitne za fisijsku reakciju su:

- udarni presjek,  $\sigma$ , koji određuje vjerojatnost nastanka nuklearne reakcije te ovisi o kinetičkoj energiji neutrona. Mjerna jedinica udarnog presjeka je 1 barn (b) što je ekvivalentno  $10^{-28} \text{ m}^2$ ;
- trajanje fisijske generacije,  $\tau$ , koje opisuje prosječno vrijeme između dvije uzastopne fisije;
- faktor multiplikacije,  $k$ , koji predstavlja omjer broja neutrona nastalih u jednom fisijskom procesu prema broju neutrona iz prethodnog procesa.

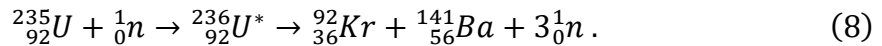
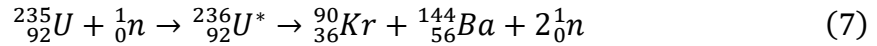
Razlikuju se kontinuirana lančana reakcija ( $k = 1$ ) koja je prisutna u nuklearnim reaktorima i nekontrolirana ( $k > 1$ ) čija je posljedica nuklearna eksplozija (atomska bomba). Ako je  $k < 1$  reakcija se gasi.<sup>17</sup>

Godine 1938. njemački znanstvenici Otto Hahn i Fritz Strassmann otkrili su da bombardiranjem izotopa uranija nastaje barij. Njihov eksperiment su sljedeće godine objasnili Lise Meitner i Otto Frisch te reakciji dali ime fisija.<sup>6</sup> Izotop uranija ( $^{235}\text{U}$ ) apsorpcijom neutrona prelazi u pobuđeno stanje. Ono je vrlo nestabilno zbog viška energije. Raspadom nastaju dvije lakše jezgre, dva do tri neutrona te se oslobađa energija od 200 MeV. U određenim uvjetima ta reakcija može postati samoodrživa i odvijati se kontinuirano. Naime, fisija  $^{235}\text{U}$  oslobađa, u prosjeku, 2,4 neutrona, ali postoji i određeni broj neutrona (tzv. zakašnjeli neutroni) koji se oslobađaju nakon nekoliko sekundi ili minuta za vrijeme raspada drugih fisijskih fragmenata. Iako je



njihov postotak mali, do 0,6%, nužni su za stabilnost lančane reakcije u nuklearnom reaktoru.<sup>16,17</sup>

Primjeri fisije  $^{235}\text{U}$ :



U obje reakcije neutron je projektil, izotop  $^{235}\text{U}$  je meta, izotopi kriptona i barija su jezgre kćeri te nastaju dva ili tri neutrona.

Svi fisijski fragmenti su radioaktivni te posjeduju vrlo veliku energiju. Zbog viška neutrona, najčešće se raspadaju beta raspadom.<sup>17</sup>

### 1.2.1.2. Nuklearna fuzija

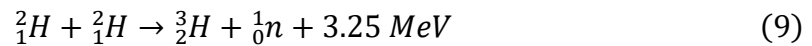
Suprotno od fisije, nuklearna reakcija spajanja dvije lake atomske jezgre u jednu tešku atomsku jezgru naziva se fuzija. Do oslobađanja energije dolazi zbog razlika u masi, odnosno dobivena jezgra ima manju masu nego suma masa početnih jezgri.<sup>18</sup>

Problem prilikom odvijanja fuzijske reakcije predstavlja elektrostatičko odbijanje do kojeg dolazi uslijed spajanja pozitivno nabijenih reaktanata (lake jezgre). Jezgre se trebaju gibati velikom brzinom kako bi se međusobno približile dovoljno da jaka nuklearna sila nadvlada odbojnu električnu silu (Coulombovu barijeru). Srednja kinetička energija proporcionalna je temperaturi te se povećanjem temperature povećava i brzina jezgri tj. ostvaruje se uvjet za početak fuzije.<sup>17</sup>

Zbog mogućnosti odvijanja samo pri vrlo visokim temperaturama, reakcije fuzije nazivaju se i termonuklearne fuzijske reakcije. Izvor su energije u svemiru, a jedan od razloga je prelazak jezgri u tzv. četvrto agregatno stanje, plazmu. Električki neutralna te sastavljena od slobodnih elektrona i pozitivno nabijenih jezgri, plazma je stanje tvari u kojem je omogućeno postizanje dovoljne energije atomskih jezgri, pri visokim temperaturama, za odvijanje fuzije. Najzastupljeniji proces kod zvijezda je reakcija u kojoj vodik prelazi u helij, a odvija se i u unutrašnjosti Sunca gdje temperatura doseže  $1,5 \times 10^7 \text{ K}$ .<sup>12</sup>

Primarne reakcije za dobivanje fuzijske energije temelje se na izotopima vodika; deuteriju i triciju. Prednost ovih reakcija je neiscrpnost izvora. Deuterij se nalazi u vodi u obliku D<sub>2</sub>O dok se tricij dobiva raspadom litija kojeg ima u sastavu Zemljine kore. Također, prisustvo radioaktivnih čestica je minimalno. Ako i nastanu, njihovo vrijeme poluraspada je kraće u odnosu na radioaktivne čestice dobivene reakcijom fisije.<sup>17,18</sup>

D-D reakcije:



D-T reakcija:



### 1.2.2. Zakon radioaktivnog raspada

Radioaktivne jezgre se s vremenom raspadaju. Taj raspad je slučajan; ne može se predvidjeti koja jezgra niti koliko će ih se raspasti u nekom uzorku.

Za dobivanje zakona radioaktivnog raspada polazi se od sljedeće relacije. Uzorak koji sadrži N broj radioaktivnih jezgri, ima brzinu raspada proporcionalnu broju N:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N . \quad (12)$$

Konstanta raspada  $\lambda$  je vjerojatnost raspada radioaktivne jezgre po jedinici vremena. Ista je za sve jezgre, neovisna o broju jezgri i njihovoj starosti. Mjerna jedinica u SI sustavu je s<sup>-1</sup>.

Množenjem jednadžbe (12) s dt te prebacivanjem znaka „minus“ na desnu stranu postavlja se jednadžba čije je konačno rješenje formula za izračunavanje broja neraspadnutih jezgri N u vremenu t.

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (13)$$

Integrirajući obje strane dobije se:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt \quad (14)$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t \quad (15)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (16)$$

$N_0$  je broj neraspadnutih jezgri u početnom vremenu  $t_0$ , a  $N$  je broj preostalih jezgri u svakom sljedećem vremenu  $t$ . Zakon radioaktivnog raspada prikazuje se kao:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad \text{ili} \quad N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (17)$$

Kako nije moguće odrediti vrijeme potrebno da se raspadnu sve nestabilne radioaktivne jezgre, koristi se vrijeme poluraspada  $T_{1/2}$ . To je vrijeme u kojem se raspadne polovica ukupnog broja jezgri početnog uzorka (Slika 4, Tablica 1.). Ako se u jednadžbi (17) za vrijeme  $t$  uvrsti vrijeme poluraspada  $T_{1/2}$  ;

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (18)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (19)$$

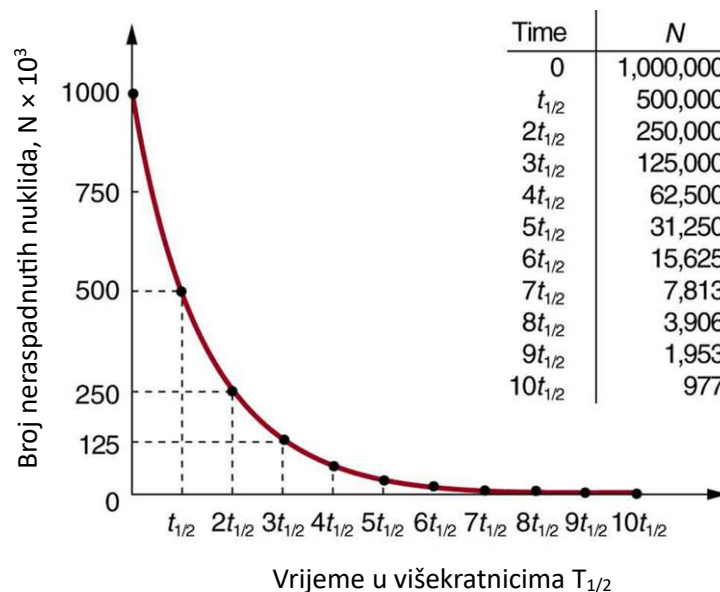
$$2 = e^{\lambda T_{1/2}} \quad (20)$$

dobiva se veza između vremena poluraspada i konstante raspada:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} . \quad (21)$$

Omjer broja radioaktivnih raspada u vremenu  $t$ , naziva se aktivnost radioaktivnog uzorka. Mjerna jedinica je bekerel ( $\text{Bq}=\text{s}^{-1}$ ).<sup>12,14</sup>

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N(t) \quad (22)$$



Slika 4. Ovisnost broja neraspadnutih jezgri o vremenu poluraspada za početni broj jezgri  $N_0 = 1000 \cdot 10^3$ .<sup>19</sup>

Tablica 1. Primjeri nekih radioaktivnih izotopa i njihovo vrijeme poluraspada.<sup>11</sup>

Radioaktivni izotopi	Vrijeme poluraspada
$^{16}\text{N}$	7 sekundi
$^{41}\text{Ar}$	1,8 sati
$^{222}\text{Rn}$	3,8 dana
$^{226}\text{Ra}$	1,599 godina
$^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ godina

### 1.2.3. Vrste radioaktivnog raspada

#### 1.2.3.1. Alfa raspad

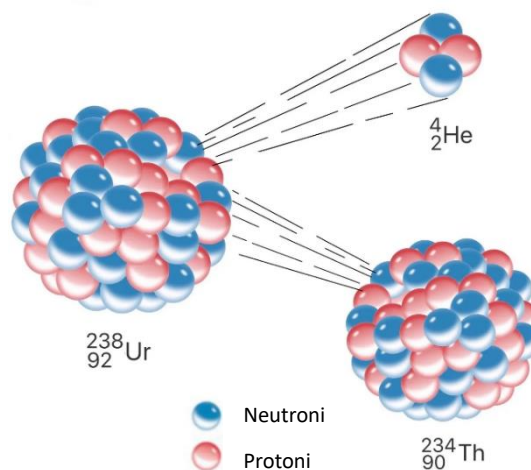
Alfa raspad (Slika 5.) opisuje proces u kojem teške, nestabilne jezgre emitiraju alfa česticu kako bi postigli stabilnost. Pritom se odvija transmutacija odnosno pretvaranje jedne atomske jezgre u jezgru drugog kemijskog elementa. Alfa čestica predstavlja

jezgru helija i sastoji se od dva protona i dva neutrona. Tijekom raspada atomski broj se smanjuje za 2, maseni za 4 te broj nukleona za 4.

Opći zapis reakcije raspada prikazuje se kao:

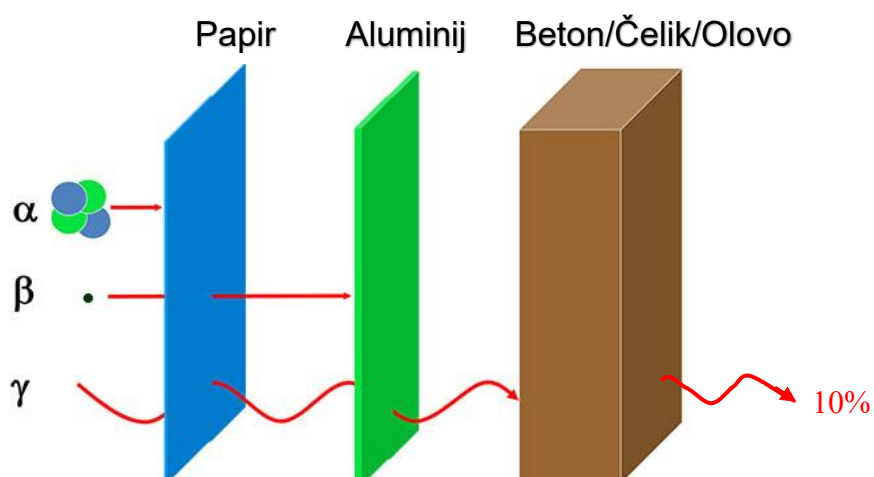


X predstavlja radioaktivnu jezgru koja se raspada (roditelj), a Y jezgru elementa koji nastaje (kćer).<sup>13</sup>



Slika 5. Primjer  $\alpha$  raspada.<sup>20</sup>

Proces raspada može se odvijati tako da su i jezgra roditelj i jezgra kćer u osnovnom (stabilnom) energetskom stanju. Međutim, može se dogoditi da jezgra kćer umjesto u osnovnom bude u pobuđenom (nestabilnom) energetskom stanju. Tada se prijelaz do osnovnog stanja odvija uz pojavu gama zračenja.<sup>13</sup>



Slika 6. Prolazak radioaktivnih zraka kroz različite materijale.<sup>21</sup>

Energija alfa zračenja je precizno određena; kinetička energija alfa čestica iznosi između 4 do 8 MeV. Zahvaljujući velikoj masi i električnom naboju, snažno reagiraju s tvarima kroz koje prolaze. Iako imaju velike količine energije, u zraku se gibaju sporo i nakon par centimetara potroše svu energiju uz stvaranje velikog broja ionskih parova. Doseg u tijelu je malen, samo 0,03 milimetra. Alfa čestice imaju manju prodornu moć od beta i gama čestica i moguće ih je zaustaviti običnim listom papira (Slika 6.). Zbog toga ne predstavljaju opasnost ako se nađu izvan organizma. Ni kada dođu do kože, zbog malog dosega u tijelu, neće štetno djelovati na unutarnje stanice. Problem nastaje kada dospiju u organizam jer se tada gusto ionizirajuće zračenje može zadržati samo u jednoj stanici.<sup>22</sup>

### 1.2.3.2. Beta raspad

Beta raspad dijeli se na beta negativni ( $\beta^-$ ) i beta pozitivni raspad ( $\beta^+$ ).

U beta negativnom raspadu (Slika 7.) sudjeluju nestabilne radioaktivne jezgre koje imaju višak neutrona. Pretvorbom neutrona u proton oslobađa se  $\beta^-$  čestica i antineutrino ( $\bar{\nu}$ ).  $\beta^-$  čestica slična je elektronu, dok je antineutrino čestica bez naboja s jako malom masom. Njezina svrha je prijenos energije nastale raspadom. U ovom tipu raspada, atomski broj nove jezgre povećava se za jedan.<sup>22</sup>



Slika 7. Primjer  $\beta^-$  raspada.<sup>23</sup>

Opći zapis reakcije raspada prikazuje se kao:



Kao i kod alfa raspada, novonastala jezgra može nakon prvog raspada ostati u pobuđenom stanju. Emisijom gama zračenja ista postaje stabilnija.<sup>13</sup>

Mjerenje  $\beta^-$  čestica otežano je zbog relativno slabe prodorne moći; zaustavljaju ih čvrsti materijali male debljine kao što je aluminijski lim (Slika 6.).<sup>22</sup>

U beta pozitivnom raspadu (Slika 8.) sudjeluju nestabilne radioaktivne jezgre s manjkom neutrona, a viškom protona. Proton raspadom oslobađa neutron,  $\beta^+$  česticu (pozitron) i neutrino ( $\nu$ ). Atomski broj se smanjuje za jedan, dok maseni ostaje nepromijenjen.<sup>13</sup>



Slika 8. Primjer  $\beta^+$  raspada.<sup>24</sup>

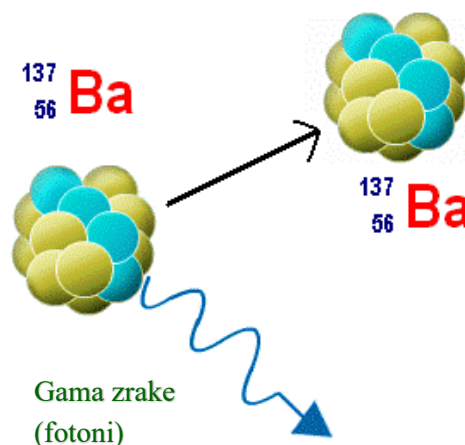
Opći zapis reakcije raspada prikazuje se kao:



Neutrino je antičestica antineutrina iz  $\beta^-$  raspada. Pozitron je antičestica elektrona, a razlikuju se po suprotnim nabojima.<sup>13</sup>

### 1.2.3.3. Gama raspad

Gama raspad (Slika 9.) nastaje kada se radioaktivna jezgra nakon alfa ili beta raspada, nađe u pobuđenom stanju. Emitiranjem gama zračenja, raspada se do osnovnog stanja. Nema promjene atomskog ni masenog broja, već se događa prelazak jezgre u niže energetske stanje.<sup>13</sup>



Slika 9. Primjer  $\gamma$  raspada.<sup>25</sup>

Opći zapis reakcije raspada prikazuje se kao:



${}^A_ZX^*$  je jezgra atoma u pobuđenom stanju.

Raspad se odvija u jako kratkom vremenu (unutar  $10^{-9}$  sekundi). Međutim, ponekad se javljaju metastabilne jezgre. To su pobuđene jezgre koje ostaju u tom stanju dugo vremena prije nego na njih počne djelovati gama zračenje.<sup>13</sup>

Gama zrake su elektromagnetski valovi vrlo visokih frekvencija i energija te su dio kozmičkog zračenja koje je prisutno u cijelom svemiru. Imaju najveću moć prodiranja te se za zaštitu od izlaganja zračenju uglavnom koristi olovo (Slika 6.).<sup>10</sup>



### 1.3. Mjerni instrumenti

Čovjek nema sposobnost direktnog opažanja bilo koje vrste zračenja. Stoga, kako bi mogli odrediti prisustvo zračenja, koristimo mjerne instrumente. Oni mjere sekundarne produkte koji su posljedica prolaska zračenja kroz detekcijski prostor. Osim mjerenja samog radioaktivnog zračenja, ove instrumente koristimo i za mjerenje njegovih svojstava poput energije, broja čestica koje sudjeluju u procesu te njihovih putanja.<sup>10</sup>

Jedna od glavnih karakteristika mjernih uređaja ili detektora je efikasnost. Detektor će biti 100% efikasan za alfa i beta zrake zbog toga što se ionizacija događa odmah po ulasku čestice u radni volumen detektora. Gama zrake trebaju proći niz procesa u detekcijskom prostoru prije no što ih se može očitati. U tim uvjetima, efikasnost je niža od 100%.<sup>9</sup> Efikasnost se može odrediti sljedećom formulom:

$$E = \frac{N - N_0}{N_u} \quad (27)$$

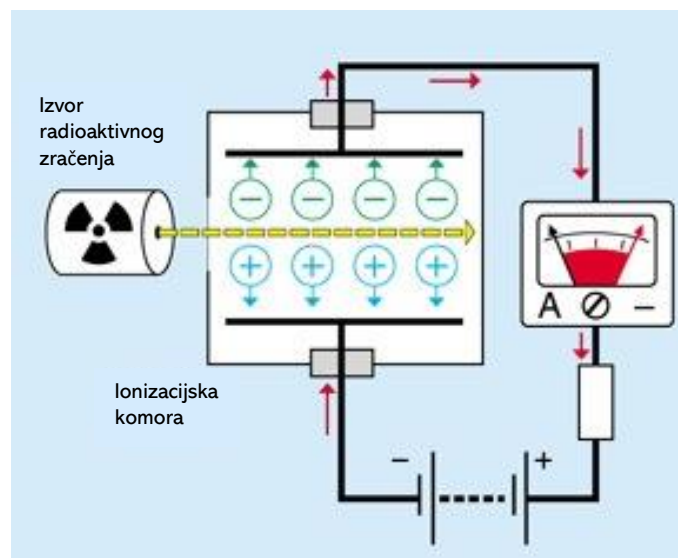
$N$  predstavlja broj čestica koje je registrirao detektor,  $N_0$  predstavlja čestice koje dolaze od prirodnog zračenja u okoliš, a  $N_u$  su ulazne čestice.<sup>10</sup>

Niti jedan uređaj nije u potpunosti točan te je uvijek moguća pojava nepravilnosti ili oscilacija. One nastaju zbog pomicanja mjernog uređaja za vrijeme mjerenja ili zbog šuma kojeg proizvodi izmjereni signal. Ne postoji jedan detektor koji je najbolji i najtočniji za sve vrste zračenja. Potrebno je odabrati najoptimalniji ovisno o uvjetima mjerenja i cilju mjerenja.<sup>9,10</sup>

#### 1.3.1. Ionizacijska komora

Ionizacijske komore su najosnovniji tip plinskih detektora. Komora je ispunjena plinom koji služi kao mjerna tvar. Plin se zračenjem ionizira, a ioni i elektroni koji nastaju nuklearnim reakcijama gibaju se prema dvije elektrode (Slika 10.). Ukupna struja može se smanjiti smanjenjem napona zbog toga što se pri nižim vrijednostima napona, dio pozitivnih iona rekombinira s elektronima. Pri višim naponima, događa se brže razdvajanje naelektriziranih čestica i manje rekombinacija. Rekombinacija prestaje pri struji zasićenja.<sup>9,10</sup>

Ionizacijske komore mogu biti ili za kontinuirano ili za integralno registriranje. Razlikuju se prema načinu spajanja u strujni krug. Kod kontinuiranog registriranja, strujni krug se zatvara nabojima koji su nastali ionizacijom plina. Zbog visokog napona (do 200 V) struja zasićenja ovisi samo o dozi zračenja u plinu. Kod integralnog registriranja, elektrode predstavljaju nabijeni kondenzator. Smanjuje se napon među elektrodama zbog toga što naboji ioniziranog plina neutraliziraju naboje na elektrodama komore. Odnos napona i doze zračenja je obrnuto proporcionalan. Ova vrsta ionizacijske komore integrira sve doze kojima je ozračena.<sup>10</sup>

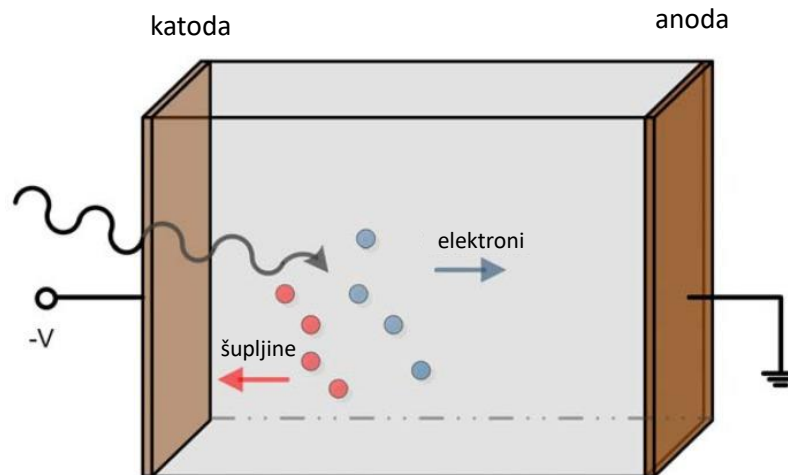


Slika 10. Ionizacijska komora<sup>26</sup>

### 1.3.2. Poluvodički brojač

Poluvodički brojač je detektor kojem se električna svojstva mijenjaju pod utjecajem zračenja. Dolazi do promjene vodljivosti poluvodičkog kristala. Najčešće je izrađen od silicija i germanija, iako se mogu koristiti i drugi materijali poput kadmijevog telurida ili živinog jodida. Kristalna dioda je u strujnom krugu spojena u nepropusnom smjeru. Strujni impuls, uzrokovan nabijenom česticom, odlazi do radnog otpornika s kojega dalje ide naponski impuls kojega brojač registrira (Slika 11.). Ionizacija u kristalu je mnogo veća nego u plinu zbog veće gustoće kristala i manje energije potrebne za stvaranje para iona.

Najviše se koristi u području nuklearne spektrometrije jer ima visoku sposobnost energetskog razlučivanja čestica. Ostale prednosti su velika efikasnost, neosjetljivost na djelovanje magnetskog polja i mogućnost rada u vakuumu.<sup>10,14</sup>

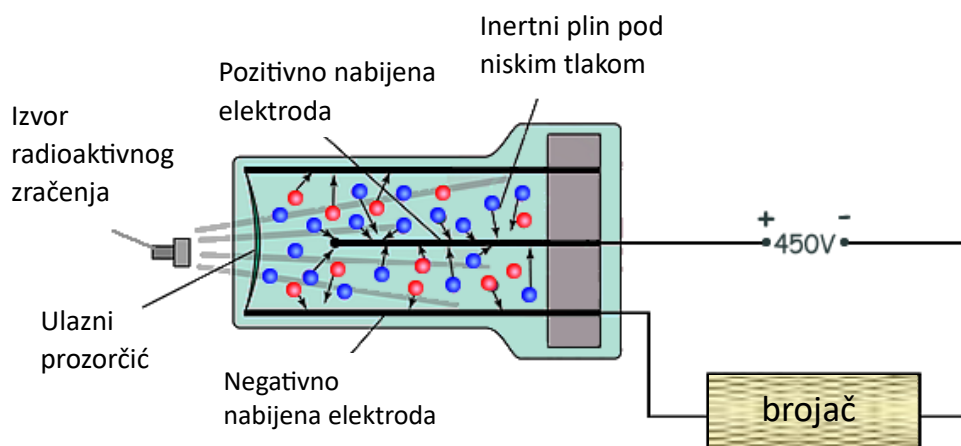


Slika 11. Poluvodički brojač<sup>27</sup>

### 1.3.3. Geiger-Mueller brojač

Jednostavnost korištenja i relativno niska cijena čine ovaj mjerni instrument jednim od najčešće korištenih kada se radi o mjerenju zračenja (Slika 12.). Glavni dio predstavlja Geiger-Muellerova cijev s elektrodama koje su spojene na veći napon (do 1000 V) nego kod prethodno opisanih uređaja. Djelovanjem električnog polja, primarno stvoreni elektroni kreću se prema žici i na tom putu izazivaju lavinu ionizacije atoma i molekula. Oni stvaraju fotone koji reagiraju s plinom te nastaju fotoelektroni. Tako se u jako kratkom vremenu (reda nekoliko mikrosekundi) ionizira gotovo sav plin. Ionizacija prestaje zbog smanjenja napona kao posljedica naglog povećanja vodljivosti plina (Slika 13.). Nedostaci Geiger-Muellerovog brojača su smanjena mogućnost razlikovanja vrsta radioaktivnog zračenja te tzv. mrtvo vrijeme koje iznosi  $10^{-4}$  s. Za vrijeme dok je ionizacija zaustavljena, brojač ne registrira novonastale čestice.

Ovaj uređaj koristi se kada je potrebna informacija o intenzitetu zračenja, dok se za određivanje vrste i energije zračenja koriste drugi uređaji.<sup>10,14</sup>

Slika 12. Geiger-Mueller brojač <sup>28</sup>Slika 13. Princip rada Geiger-Mueller brojača. <sup>29</sup>

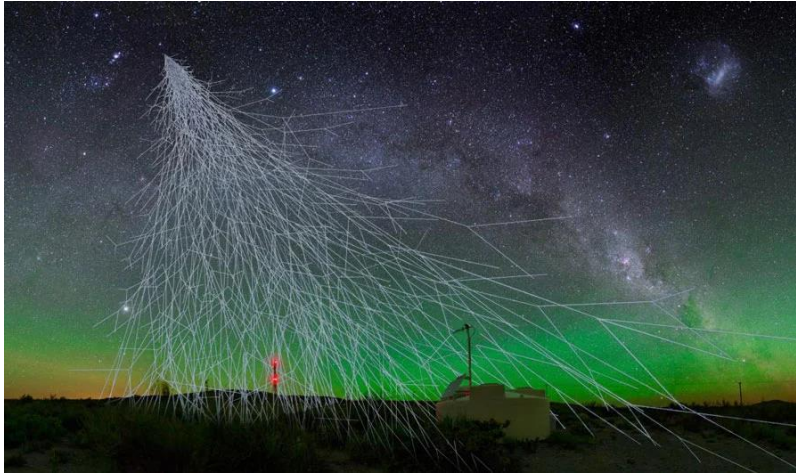
## 1.4. Prirodni izvori radioaktivnosti

### 1.4.1. Kozmičko zračenje

Početkom prošlog stoljeća, za mjerenje radioaktivnosti koristili su se elektroskopi. Nakon što je određena vrsta radioaktivnosti jako velike moći prodiranja izmjerena na planinama, u jezerima te u zgradama, jedno mišljenje je bilo da je emitiraju minerali na površini Zemlje. Drugi su smatrali da se njen izvor nalazi u zraku.<sup>1</sup> Otkriće kozmičkog zračenja pripalo je Victoru Hessu. On je, između 1911. i 1913. godine, mjerenjima u atmosferi pomoću sedam balona i tri elektroskopa otkrio pad ionizacije na nadmorskoj visini od 500 metara do vrijednosti dva puta niže od ionizacije na tlu. Daljnjim uzdizanjem, iznad 1000 metara, vrijednost ionizacije je rasla te je na visini od 5000 metara elektroskop očitavao nekoliko puta veću vrijednost nego na površini Zemlje. Time se suprotstavio mišljenjima da je ta radioaktivnost porijeklom iz zraka jer radij, koji otpušta gama zrake, ne može djelovati na tolikoj nadmorskoj visini.<sup>2</sup>

Kozmičko zračenje čine nabijene čestice visoke energije iz svemira koje se gibaju i prodiru u atmosferu iz raznih smjerova. Dijeli se na primarno zračenje, koje uglavnom čine protoni i jezgre helija, i sekundarno zračenje koje nastaje nakon niza sudara primarnog zračenja s atomima Zemljine atmosfere. Kao produkti sudara nastaju  $\pi$  mezoni koji se raspadaju u gama zrake, a one dalje mogu tvoriti parove elektron-pozitron. Ove reakcije nastanka sekundarnih čestica i elektromagnetskog zračenja izvor su tzv. kiše kozmičkog zračenja (Slika 14.).<sup>2</sup>

Najviše štete od ove vrste zračenja imaju astronauti koji su izloženi jakom utjecaju primarnog kozmičkog zračenja i ljudi koji žive na visokim nadmorskim visinama. Naime, Zemljina atmosfera djeluje kao štit, ali dok se povećanjem visine povećava razina zračenja, tako se smanjuje količina zraka koji bi nas štitio.<sup>2</sup>



Slika 14. Kozmičke zrake <sup>30</sup>

#### 1.4.2. Zračenje iz tla

Radioaktivne tvari prisutne u tlu predstavljaju veliki problem za zdravlje i gospodarstvo. U tlo mogu dospjeti na dva načina: otopljene u kišnici ili vezane za druge elemente. Značajan utjecaj na njihovo ponašanje imaju abiotički uvjeti (kemijske i fizikalne osobine tla). Radionuklidi vezani na čestice mogu se otapati i tako prelaze u tekuću fazu ili se mogu adsorbirati prilikom kontakta s tvarima u čvrstoj fazi tla. Također, mogu putem vodenih tokova završiti u podzemnim vodama.

Prilikom određivanja utjecaja radioaktivnosti na ljudsko zdravlje, potrebno je spomenuti utjecaj biljaka koje su najveća zaliha hrane za čovjeka. Radioaktivne tvari ulaze u njih preko korijena. Za izradu modela kojima se pokušava predvidjeti količina zračenja važno je razumijevanje mehanizma unosa i otpuštanja tih tvari preko korijenskog sustava.

Procesi koji određuju ukupno zračenje iz tla su:

- 1) procesi vezani uz tlo koji kontroliraju koncentraciju radionuklida u otopini tla;
- 2) procesi vezani uz biljke koji kontroliraju unos radionuklida preko korijena, a koji mogu biti pod utjecajem raznih čimbenika iz okoliša.<sup>31</sup>

Konzumacija kontaminirane hrane bitan je izvor izloženosti zračenja čovjeka. To se posebno ističe u regijama svijeta u kojima je prirodno zračenje jako izraženo. Na tim mjestima najčešće se nalaze i mineralni izvori koji imaju visoke koncentracije izotopa

radija ( $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ ) i radona ( $^{222}\text{Rn}$ ). Koriste se kao lječilišta s ciljem iskorištavanja radioaktivnih izvora u terapijske svrhe te se posjetitelje potiče na pijenje i kupanje u radioaktivnoj vodi.<sup>7</sup>

Savezna država Minas Gerais u Brazilu primjer je anomalije. Naime, iako tlo na mjestima sadrži apatit, fosfatni mineral koji sadrži uranij, nije zabilježena značajna štetnost po zdravlje ljudi. Godišnja doza zračenja iznosi od 120 do 250 mSv, a hrana uzgojena na tom području sadrži visoku količinu  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ .<sup>7,10</sup>

Najveću aktivnost imaju stjenovita tla vulkanskog porijekla (aktivnost granita iznosi 1140 Bq/kg) dok su tla od sedimentnih stijena među slabije aktivnim područjima (aktivnost vapnenca iznosi 110 Bq/kg). Alfa i beta zračenja brzo se apsorbiraju u zraku pa do tla dolazi samo gama zračenje. Istraživanjima se došlo do iznosa godišnje ekvivalentne doze od gama zračenja prisutnog na maloj udaljenosti od granitnog tla (1 mSv) te od vapnenca (0,23 mSv).<sup>10</sup>

### 1.4.3. Zračenje u ljudskom tijelu

Unos radioaktivnih tvari u naše tijelo ne može se spriječiti niti na njega možemo utjecati. Skupine radionuklida koje su izvor prirodnog zračenja:

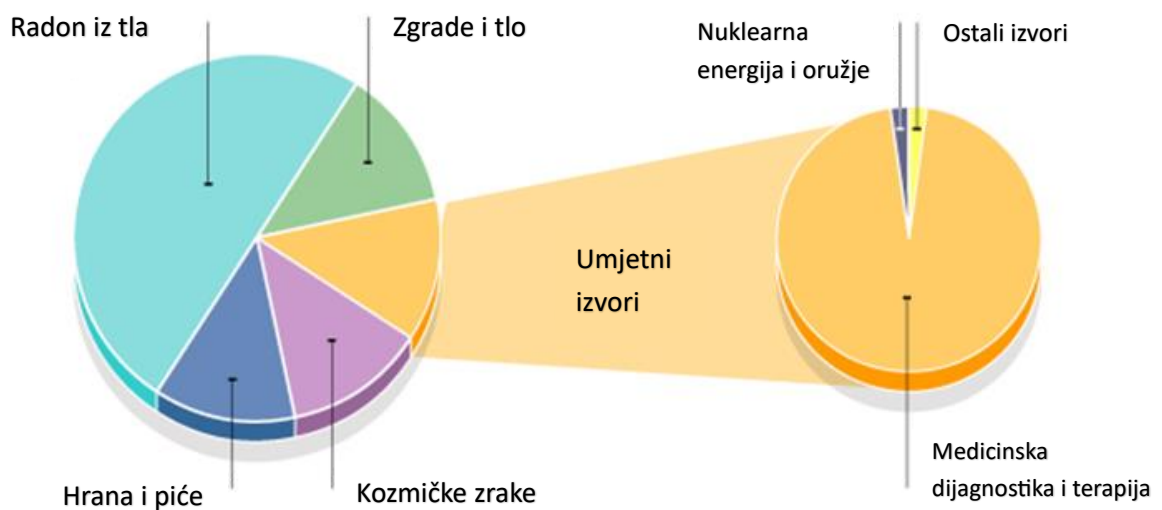
- 1) praradionuklidi –  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,
- 2) kozmogeni radionuklidi –  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$  te najvažniji  $^{14}\text{C}$ .

Za sve žive organizme, ugljikovi spojevi su od iznimne važnosti. Radionuklid  $^{14}\text{C}$  zbog svog dugog vremena poluraspada od 5730 godina te velike koncentracije u prirodi ima izražen utjecaj na ukupno zračenje u ljudskom tijelu. Ekvivalentna doza zračenja ovoga izotopa iznosi 12  $\mu\text{Sv}$  godišnje, a najviše je prisutan u koštanoj srži. Udio  $^{14}\text{C}$  smanjuje se povećanjem udjela ugljikovog dioksida u atmosferi, a povećava se eksplozijama nuklearnog oružja.<sup>10</sup>

Radioaktivni plin radon,  $^{222}\text{Rn}$ , jedan je od produkta raspada  $^{238}\text{U}$ . Plin je bez boje, okusa i mirisa, osam puta teži od zraka. Izbija iz minerala te se kao slobodni plin lako širi kroz pore u stijenama i kroz pukotine u Zemljinoj kori. U atmosferi se brzo disperzira i raspada s vremenom raspada od 3,8 dana. Njegovim raspadom nastaju jezgre kćeri koje su glavni unutrašnji izvori zračenja kod čovjeka zbog toga što ih

unosimo disanjem. Raspadanjem stvaraju alfa zrake. Male koncentracije radona i radija (prisutan u pitkoj vodi) uzrokuju oštećenje stanica, a posljedično i rak pluća i kostiju.<sup>10,11</sup>

Radon se nalazi u tlu, zraku, vodi, ali i u zgradama u koje ulazi iz tla i preko građevinskog materijala (Slika 15.). Vrijednost njegove koncentracije aktivnosti iznosi oko  $15 \text{ Bq/m}^3$  u otvorenom prostoru, odnosno oko  $40 \text{ Bq/m}^3$  u zatvorenom prostoru. Maksimalne vrijednosti mogu doseći do  $1000 \text{ Bq/m}^3$ .<sup>10</sup>



Slika 15. Izvori zračenja u svakodnevnom životu.<sup>32</sup>



## 1.5. Umjetni izvori radioaktivnosti

### 1.5.1. Primjena zračenja u medicini

Nuklearna medicina je grana medicine u kojoj se za potrebe istraživanja i liječenja bolesti koriste radioaktivne tvari. Uz nuklearne reaktore, smatra se najznačajnijim dijelom nuklearne industrije. Njen početak obilježili su John i Ernest Lawrence koji su, 1939. godine, izveli prvi medicinski tretman leukemije.

Drugi pojam vezan za medicinsko ozračivanje je medicinska fizika. To je dio fizike koja koncepte fizike primjenjuje za liječenje bolesti ionizirajućim zračenjem.

Nuklearna medicina napredovala je stalnom pojavom novih mjernih instrumenata i postupaka otkrivanja zračenja unutar ljudskog tijela. Područja istraživanja uključivala su postupke izdvajanja novih izotopa emitiranjem iz produkata fisije, algoritme koji su omogućili jasnije slike zračenja, upotrebu radionuklida u molekularnoj biologiji te poboljšavanje mjera zaštite na radu.

Na Slici 15. vidljivo je da najveći dio umjetnog zračenja dolazi iz medicinskih izvora, ponajprije korištenjem rendgenskih uređaja za dijagnosticiranje. Neki od ostalih uređaja koji koriste zračenje su CT (pomoću rendgenskog zračenja dobiva se trodimenzionalna slika unutrašnjosti tijela) i SPECT (male doze radioaktivnog materijala se injektiraju u tijelo dok detektor očitava emisije gama zračenja).<sup>14</sup>

### 1.5.2. Nuklearni reaktori i nuklearno oružje

Primjena nuklearnih reaktora najveća je u nuklearnim elektranama. Pretvorbom nuklearne energije u druge oblike stvaraju se velike količine opasnih tvari i radioaktivnog zračenja. Izmjerene ekvivalentne doze zračenja uz i blizu nuklearne elektrane pokazale su da je, zahvaljujući visokoj razini zaštite, ozračivanje manje nego u postupcima nuklearne medicine. Kod medicine srednja vrijednost iznosi 0,5 mSv godišnje, a u nuklearnim elektranama do 0,01 mSv godišnje.<sup>10</sup>

Najpoznatija nesreća vezana za nuklearne reaktore je katastrofa koja se dogodila 26. travnja 1986. godine u Černobilu u Ukrajini. Uslijed pregrijavanja jednog od reaktora, nastala je eksplozija koja je u atmosferu pustila brojni radioaktivni materijal (Slika 16.). Zabilježene su velike količine  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  i  $^{137}\text{Cs}$ . Radijacija se velikom brzinom proširila u okolne zemlje gdje su ljudi udisanjem zagađenog zraka ili konzumiranjem povrća te mlijeka, nesvjesno unosili štetno zračenje. Srednja efektivna doza zračenja kretala se od 30 pa do iznad 120 mSv kod osoba koje su bile najizloženije.<sup>33</sup>



Slika 16. Nuklearna elektrana Černobil nakon eksplozije.<sup>34</sup>

Najveće količine umjetno dobivenog zračenja u okolišu posljedica su testiranja nuklearnog oružja. Eksplozijom nuklearnog oružja, oslobađa se velika količina energije. 15% ukupne energije pretvara se u ionizirajuće zračenje za vrijeme eksplozija atomske i hidrogenske bombe, dok eksplozijom neutronske bombe ionizirajuće zračenje iznosi 70%. Ovisno o visini i promjeru eksplozije, nastalo radioaktivno zračenje dijelimo na:

- 1) Trenutno zračenje – odvija se unutar jedne minute od trenutka eksplozije. Pretežno se sastoji od neutronske i gama zračenja te se širi izravno od mjesta pada bombe.
- 2) Zaostalo zračenje – nastaje nakon trenutnog tj. nakon jedne minute i opada s vremenom. Sastoji se od beta i gama zračenja.
- 3) Kasno zaostalo zračenje – dopijeva do stratosfere i zadržava se dugo vremena. Vjetrovima se prenosi i do mjesta koja su jako udaljena od početnog izvora, te na taj način povećava udio živih organizama izloženih radijaciji.<sup>10</sup>

## 1.6. Posljedice zračenja na čovjeka

Iako se od otkrića radioaktivnosti pa do danas često postavlja pitanje utjecaja na ljudsko zdravlje, najviše istraživanja je provedeno putem eksperimenata na životinjama. Eksperimenti su nam pokazali izgled ozljeda dobivenih izlaganjem radioaktivnom zračenju, ali i vezu između doze i biološkog učinka. Međutim, podaci o veličini doze potrebne za izazivanje težih ozljeda i bolesti dobiveni iz provedenih eksperimenata u većini slučajeva nisu sasvim primjenjivi na čovjeka.

Eksperimenti su pokazali da se učinak radijacije na zdravlje životinja smanjuje ako je izloženost radijaciji postepena kroz duži vremenski period. Međutim, kod žena izloženih X-zrakama potvrđena je linearna ovisnost oboljenja od raka dojke i količine zračenja bez obzira je li zračenje bilo postepeno. Kada se ljudsko tijelo odjednom izloži velikoj dozi radioaktivnog zračenja, simptomi se pojavljuju unutar par sati (Tablica 2.). Dezorijentacija i mučnina se mogu pojaviti i nakon nekoliko minuta. Na primjeru joda može se pokazati štetnost zračenja. Uslijed unosa radioaktivnih izotopa joda u tijelo, oni se akumuliraju u štitnjači. Male doze pomažu u normalnom radu te žlijezde, no prekomjerne količine uzrokuju razne bolesti (najteža je karcinom štitnjače).<sup>7</sup>

Početak 20. stoljeća tuberkuloza je, uz rak, bila najsmrtonosnija bolest. Godine 1903. Frederick Soddy predložio je udisanje radija ili torija kao oblik liječenja. Iako ta metoda nije bila uspješna za primjenu kod tuberkuloze, počela se koristiti za druge bolesti. Vrijeme poluraspada radija omogućilo je ostavljanje tuba u kojima se nalazio plin, unutar tkiva pacijenta bez rizika od prevelike radijacije. Friedrich Giesel bio je jedan u nizu znanstvenika koji su iskusili negativan utjecaj radijacijskih zraka na svojoj koži. Stoga je počeo eksperimentirati s biljkama i otkrio da male doze radijacije stimuliraju rast biljke. Postavilo se pitanje može li zračenje biti korisno ljudima, ako je pomoglo biljkama. Doista, pokazalo se da radioaktivnost povećava broj crvenih krvnih stanica u ljudskom tijelu. Međutim, najteže posljedice radioaktivnosti vidljive su tek nakon određenog vremena zbog čega mnogi nisu vjerovali u štetnost izlaganja radioaktivnim zrakama.<sup>6</sup> Tumori nastali zbog izloženosti radijaciji rijetko su se pojavljivali odmah. U većini slučajeva prošlo je 10 pa do 30 godina prije pojave prvih naznaka raka.<sup>7</sup> Radioaktivni elementi bi ostali u tijelu i tijekom godina se polako raspadali oslobađajući energiju.<sup>11</sup>

Tablica 2. Posljedice različitih vrijednosti ekvivalentnih doza zračenja na ljudsko tijelo, primljenih u jednom danu.<sup>35</sup>

<b>Ekvivalentna doza na cijelo tijelo</b>	<b>Posljedice</b>
0-0,25 Sv	Bez simptoma
0,25-1 Sv	Mučnina, lagana promjena krvne slike, oštećenje koštane srži i slezene.
1-3 Sv	Mučnina, povraćanje, zamor i gubitak apetita. Umjeren promjena krvne slike, teža oštećenja koštane srži, slezena i limfnih čvorova. Oporavak nakon nekoliko tjedana.
3-6 Sv	Unutarnje krvarenje i infekcije. Ozbiljna promjena krvne slike. Gubitak apetita, ljuštenje kože i gubitak kose. Mali postotak preživjelih koji su primili dozu veću od 3,5 Sv. Potrebno hitno liječenje.
6-10 Sv	Drastična promjena krvne slike. Oštećenje središnjeg živčanog sustava. 80% do 100% ozračenih umire u roku od 2 mjeseca. Za preživjele oporavak traje dugo.
Iznad 10 Sv	Paraliza i smrt

Posljedice zračenja dijele se na somatske i genetske. Do sredine 20. stoljeća, genetske promjene smatrale su se najvažnijom posljedicom radioaktivnog izlaganja. Somatske posljedice obuhvaćaju promjenu krvne slike, leukemiju, rak i skraćivanje života. Genetske obuhvaćaju oštećenje rasplodnih stanica i mutaciju gena.<sup>10</sup>

Atomske bombe bačene na Hirošimu i Nagasaki te nuklearna nesreća u Černobilu glavni su izvori istraživanja utjecaja radijacije na čovjeka. S obzirom na to da ionizirajuće zračenje ima dovoljno energije za ionizaciju bilo kojeg atoma, prisustvo radijacije u tijelu može uzrokovati kemijske promjene na stanicama te tako izazvati rak. Razlog zašto se kod nekih osoba bolest otkrije tek godinama nakon zračenja je zbog vremena poluraspada radioaktivnih čestica. Moguće su i genetske mutacije kod djece oboljele osobe.<sup>11</sup>



- Početak 20. stoljeća obilježio je ubrzani napredak znanosti, između ostalog zbog otkrića rendgenskih zraka, potom radioaktivnosti i novih radioaktivnih elemenata do objašnjenja strukture atoma. Svako novo otkriće postavljalo je niz pitanja, ali ponekad i predstavljalo bezbroj novih opasnosti na koje svijet nije bio u potpunosti spreman.
- Radioaktivnost je svojstvo nestabilnih jezgri atoma koje opisuje njihov raspad i prelazak u stabilnija stanja uz emitiranje čestica ili elektromagnetskog zračenja.
- Glavna podjela zračenja je na prirodno i umjetno. Najviše zračenja dolazi iz prirodnih izvora koji su oduvijek prisutni, bilo u svemiru ili u ljudskom organizmu. Umjetni izvori čine oko 15% ukupne radijacije na Zemlji. Tema su brojnih rasprava posljednjih desetljeća, ponajprije zbog sumnji u njihovu sigurnost.
- Čovjek je izložen pozitivnim i negativnim učincima radioaktivnosti. Negativni se osobito odnose na ljudsko zdravlje i biološko oštećenje stanica. Usprkos tome, radioaktivnost u kontroliranim uvjetima te u malim dozama primjenjuje se u pozitivne svrhe kao što je dijagnosticiranje bolesti.



$A$  - maseni broj

$A(t)$  - aktivnost radioaktivnog uzorka

$\alpha$  - alfa čestica

$b$  – barn,  $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$

$Bq$  - bekerel,  $\text{s}^{-1}$

$\beta^-$  - beta negativna (minus) čestica

$\beta^+$  - beta pozitivna (plus) čestica

$CT$  - kompjuterizirana tomografija

$D$  - apsorbirana doza zračenja, deuterij

$E$  - energija vezanja po nukleonu, efikasnost

$E_b$  - energija vezanja

$\varepsilon$  - efektivna doza zračenja

$E_{predano}$  - predana energija

$eV$  – elektronvolt,  $1 \text{ ev} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$\gamma$  - gama zrake

$Gy$  – grej,  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$

$H$  - ekvivalentna doza zračenja

$J$  – džul,  $1 \text{ J} = \text{Nm} = \text{kgm}^2\text{s}^{-2}$

$k$  - faktor multiplikacije

$K$  - kelvin

$kg$  - kilogram

$\lambda$  - konstanta raspada

$m$  - masa, metar

$\Delta m$  - defekt mase



$m_j$  - masa jezgre

$m_n$  - masa neutrona

$m_p$  - masa protona

$MeV$  - mega elektronvolt

$mSv$  - milisivert

$\mu Sv$  - mikrosivert

$N$  - broj neraspadnutih radioaktivnih jezgri, broj čestica koje registrira detektor, broj neutrona u atomskoj jezgri

$N_o$  - početni broj radioaktivnih jezgri, broj čestica iz prirodnog izvora

$N_u$  - ulazna čestica

$Q$  - vrijednost reakcije

$QF$  - faktor kvalitete

$s$  - sekunda

$\sigma$  - udarni presjek

$SPECT$  - kompjuterizirana tomografija emisijom jednog fotona

$Sv$  – sivert,  $1 Sv = 1 Gy = 1 J/kg$

$T$  - tricij

$T_{1/2}$  - vrijeme poluraspada

$t$  - vrijeme

$\tau$  - trajanje fizijske reakcije

$\nu$  - neutrino

$\bar{\nu}$  - antineutrino

$w_T$  - težinski faktor

$Z$  - atomski broj



1. *M. F. L'Annunziata*, Radioactivity: Introduction and History, From the Quantum to Quarks, 2<sup>nd</sup> Ed., Elsevier, 2016., str. 80-81, 444, 601
2. *M. F. L'Annunziata*, Handbook of Radioactivity Analysis: Vol. 1: Radiation Physics and Detectors, 4<sup>th</sup> Ed., Academic Press, 2020., str. 2-5, 23, 26, 186-188, 191-192
3. URL: <https://timeline.web.cern.ch/becquerel-discovers-radioactivity> (17.08.2023.)
4. *I. Supek*, Povijest Fizike, 2. izdanje, B. Valić (ur.), Školska knjiga, Zagreb, 1990., str. 146
5. URL: <https://spark.iop.org/collections/radioactivity> (17.08.2023.)
6. *M. C. Malley*, Radioactivity: A History of a Mysterious Science, Oxford University Press, 2011., str. 146-151, 158, 172
7. *M. Eisenbud, T. F. Gesell.*, Environmental Radioactivity From Natural, Industrial and Military Sources, 4<sup>th</sup> Ed., Academic Press, 1997., str. 12, 14-15, 20-21, 25, 191, 195
8. *B. Hanžek, Z. Franić, G. Branica*, Znameniti radiofizičari i radiokemičari u Hrvatskoj do 1945., Arhiv za higijenu rada i toksikologiju, **62** (3) (2011.), str. 2, 4, 8, 9, doi: <https://doi.org/10.2478/10004-1254-62-2011-2136>
9. *G. Choppin, J. O. Liljenzin, J. Rydberg, C. Ekberg*, Radiochemistry and Nuclear Chemistry, 4<sup>th</sup> Ed., Academic Press, 2013., str. 3, 32, 255, 257, 285, 301, 319
10. *Z. Jakobović*, Ionizirajuće zračenje i čovjek, Školska knjiga, Zagreb, 1991., str. 19, 27-28, 58-60, 70, 80-82, 86-89, 94, 96, 98-99
11. *C. Smith*, Environmental Physics (Routledge Introductions to Environment Series), R. Gardner i A. M. Mannion (ur.), Routledge, London, 2001., str. 214-215, 219
12. *D. Halliday, R. Resnick, J. Walker*, Fundamentals of Physics, 9<sup>th</sup> Ed., John Wiley & Sons, New York, 2011., str. 1171, 1174-1176, 1183, 1207, 1209, 1211
13. *J. K. Shultis, R. E. Faw.*, Fundamentals of Nuclear Science and Engineering, Marcel Dekker, 2002., str. 96-102, 235, 240-243
14. *N. Tsoulfanidis, S. Landsberger*, Measurement & Detection of Radiation, 4<sup>th</sup> Ed., CRC Press, Boca Raton, 2015., str. 79, 94-96, 98-102, 182, 217, 535-538
15. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-16498-4#citeas> (17.08.2023.)

16. *B. Barré*, Chapter 1: Fundamentals of Nuclear Fission, *G. M. Crawley* (ur.); Energy from the Nucleus: The Science and Engineering of Fission and Fusion (World Scientific Series in Current Energy Issues), Vol. 3, World Scientific, 2016., str. 3-4, doi: [https://doi.org/10.1142/9789814689205\\_0001](https://doi.org/10.1142/9789814689205_0001) (17.08.2023.)
17. *E. E. Lewis*, Fundamentals of Nuclear Reactor Physics, Academic Press, 2008., str. 8, 9, 12
18. *M. Q. Tran, M. Kikuchi, K. Lackner*, Fusion Physics, International Atomic Energy Agency, Beč, 2012., str. 14-16
19. URL: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College\\_Physics/College\\_Physics\\_1e\\_\(OpenStax\)/31%3ARadioactivity\\_and\\_Nuclear\\_Physics/31.05%3A\\_Half-Life\\_and\\_Activity](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/College_Physics_1e_(OpenStax)/31%3ARadioactivity_and_Nuclear_Physics/31.05%3A_Half-Life_and_Activity) (17.08.2023.)
20. URL: <https://www.rankred.com/what-is-alpha-decay-definition-equation-example/> (17.08.2023.)
21. URL: <https://orise.orau.gov/resources/reacts/guide/basics-of-radiation.html> (06.07.2023.)
22. *S. R. Cherry, J. A. Sorenson, M. E. Phelps*, Physics in Nuclear Medicine, Saunders, 2003., str. 20-22, 27, 74
23. *M. Dželalija*, Ionizirajuće zračenje u biosferi (interna skripta), Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, 2005., str. 16
24. *M. Dželalija*, Ionizirajuće zračenje u biosferi (interna skripta), Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, 2005., str. 16
25. URL: <https://socratic.org/questions/what-is-gamma-decay> (17.08.2023.)
26. URL: <https://www.euronuclear.org/glossary/ionization-chamber/> (06.07.2023.)
27. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Planar-configuration-of-a-semiconductor-detector-The-cathode-is-applied-with-a-negative\\_fig1\\_235690117](https://www.researchgate.net/figure/Planar-configuration-of-a-semiconductor-detector-The-cathode-is-applied-with-a-negative_fig1_235690117) (06.07.2023.)
28. URL: <https://sciencephotogallery.com/featured/radiation-detector-public-health-england.html> (06.07.2023.)

29. URL: <https://www.cyberphysics.co.uk/topics/radioact/Radio/geigerCounter.html>

(17.08.2023.)

30. URL: <https://www.astronomy.com/science/the-history-of-cosmic-rays-is-buried-beneath-our-feet/> (17.08.2023.)

31. *F. Brechignac, B. J. Howard*, Radioactive Pollutants: Impact on the environment, EDP Sciences, 2001., str. 176-177, 210

32. URL: <https://ourfuture.energy/in-focus/nuclear-waste/> (06.07.2023.)

33. URL: <https://www.unscear.org/unscear/en/areas-of-work/chernobyl.html>

(06.07.2023.)

34. URL: <https://www.bbc.com/news/science-environment-54211450> (17.08.2023.)

35. URL:

[https://www.niehs.nih.gov/health/assets/docs\\_f\\_o/nuclear\\_energy\\_the\\_good\\_the\\_bad\\_and\\_the\\_debatable\\_508.pdf](https://www.niehs.nih.gov/health/assets/docs_f_o/nuclear_energy_the_good_the_bad_and_the_debatable_508.pdf) (28.08.2023.)