

Avtor: Andrej Godec

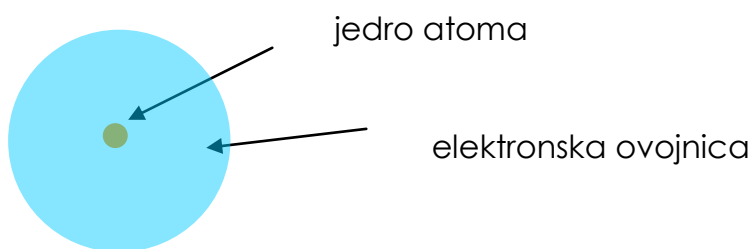
Institucija: UL FKKT

Kaj je ionizirajoče sevanje?

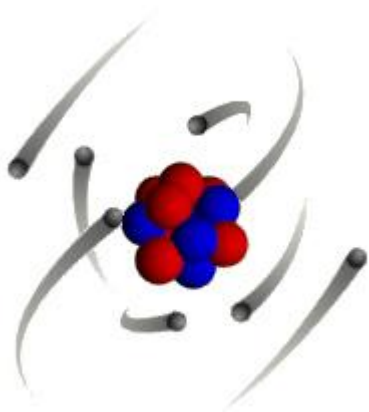
1. SNOV IN ENERGIJA STA ZDRUŽENA V ATOMU

Zgradba atoma

Atom je najmanjši delec, ki še določa lastnosti kemijskega elementa. Sestavljen je iz zelo majhnega jedra in elektronske ovojnice, slika 1.



Slika 1: Atom je sestavljen iz jedra in elektronske ovojnice.



Slika 2: Jedro izotopa litija ${}^7_3\text{Li}$ s protoni in nevtroni. Okrog jedra se gibljejo hitri elektroni (Vir: Wikipedia).

Jedro atoma je skupno pozitivno nabito, ker se v njem nahajajo protoni s pozitivnim nabojem in nevtralni nevtroni. Elementarnim delcem v jedru rečemo tudi nukleoni. Ti so v resnici sestavljeni iz še manjših delcev, ki jih imenujemo kvarki. Vendar pa se s temi ne bomo posebej ukvarjali.

Število protonov v jedru atoma določa, za kateri kemijski element gre. To število imenujemo vrstno število, pišemo ga levo spodaj ob simbolu za atom.



Masno število, ki ga pišemo levo zgoraj, pa je vsota števila protonov in nevtronov v jedru atoma. Izotop litija ${}^7_3\text{Li}$ ima tako v jedru tri protone in štiri nevtrone.

Pri *jedrski reakciji* sodelujejo nukleoni – nastajajo novi izotopi.

V elektronski ovojnici se gibljejo hitri elektroni z negativnim nabojem. Masa elektronov je v primerjavi z maso nukleonov zanemarljivo majhna.

Elektroni se lahko načeloma nahajajo kjerkoli, zato včasih rečemo, da tvorijo elektronski oblak. Elektroni imajo različno energijo: tisti, ki so jedru najbližji, so zaradi privlačne sile nanj močnejše vezani. Največ energije imajo zunanji elektroni, ki so najbolj oddaljeni od jedra atoma. Pri *kemijski reakciji* se zato med sabo povezujejo atomi s svojimi zunanjimi elektroni - nastajajo nove spojine.

Večina atomov je stabilnih

Atom je navzven električno nevtralen, ker je število elektronov v elektronski ovojnici enako številu protonov v jedru atoma. Med delci v atomu namreč vladajo različne privlačne in odbojne sile. Med nabitimi delci v atomu vlada elektromagnetna sila. Med protoni v jedru in elektroni v elektronski ovojnici vlada privlačna elektromagnetna sila. Med delci z enakim nabojem, na primer med protoni ali med elektroni, pa vlada odbojna sila. Med nukleoni v jedru atoma pa vlada poleg elektromagnetne tudi privlačna jedrska sila. Vse te sile so v atomu v ravnovesju, zato je večina atomov stabilnih. To pomeni, da se ne spremenijo tudi po preteku dosti časa.

K masi atoma največ prispevajo nukleoni, saj je masa elektrona 1836 krat manjša. Vsak element v naravi pa je sestavljen iz atomov, katerih jedra so lahko tudi različno velika. Jedra atomov istega elementa imajo namreč lahko različno število nevtronov; takšne atome imenujemo izotopi – vrstno število izotopov je seveda enako, masno pa je lahko različno.

Kaj pa, če atom ni stabilen?

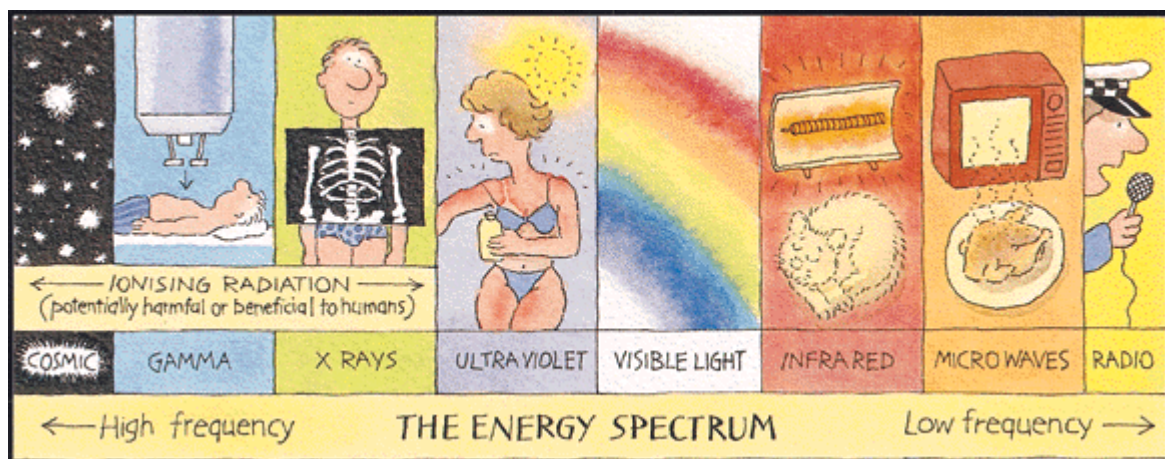
Jedra nekaterih izotopov so nestabilna, zato sama od sebe razpadejo. Pri tem nastane popolnoma drugačen atom, ki lahko sam še naprej razpada, sprosti pa se tudi energija. Temu razpadu rečemo **radioaktivni razpad**. Nestabilni izotopi so radioaktivni, zato jim rečemo tudi **radioizotopi**. V naravi so takšni predvsem izotopi težjih elementov, ki imajo dodatne nevtrone v jedru. Element uran, na primer, nima nobenega stabilnega izotopa. Nestabilne izotope pa znajo znanstveniki narediti tudi v laboratoriju.

Zanimivost: naravno radioaktivnost urana je leta 1896 odkril francoski znanstvenik Henry Becquerel. Po njem ima ime tudi enota za aktivnost snovi.

Veliko raziskav na tem področju pa je naredila poljska znanstvenica Marie Curie.

Pri radioaktivnem razpadu se del energije atoma sprosti v obliki delcev, ki jih običajno spremlja tudi elektromagnetno valovanje z visoko energijo. Temu pojavu rečemo s skupnim imenom **sevanje radioaktivnih snovi**. Sevanja radioaktivnih snovi ne moremo prekiniti.

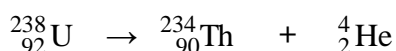
Glede na vrsto *izsevanih masnih delcev* razlikujemo alfa (α) in beta (β) radioaktivni razpad, elektromagnetno *valovanje* pa imenujemo gama (γ) sevanje ali γ – žarki. To valovanje je podobno rentgenskim žarkom, le da je njegova energija še večja. V vseh primerih pa gre za tako imenovano **ionizirajoče sevanje** z visoko energijo. Ionizirajoče sevanje rečemo tistemu sevanju, ki ima dovolj energije, da ionizira atome in molekule. To pomeni, da lahko takšni delci izbijejo elektrone iz atomov in molekul. Ionizirajoče sevanje zato poškoduje občutljive snovi v živih celicah. Lahko pa tudi poškoduje DNA v reproduktivnih celicah in povzroči genetske spremembe (mutacije). Te se prenašajo na naslednje generacije, posledice pa so skoraj vedno neželene. V večjih količinah lahko ionizirajoče sevanje v živih tkivih povzroči tudi trajne poškodbe ali celo smrt.



Slika 3: Elektromagnetni spekter (Vir: Wikipedia)

α razpad

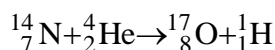
To sevanje nastane, kadar nek izotop oddaja α (alfa) delce. Ti delci so jedra atoma elementa helija ${}^4_2\text{He}$; vsak α delec je torej sestavljen iz dveh protonov in dveh nevtronov in ima pozitiven naboj. Težji elementi v naravi, na primer uran in radij, oddajajo predvsem α delce. Pri α razpadu uranovega izotopa ${}^{238}_{92}\text{U}$ nastane α delec in izotop elementa torija ${}^{234}_{90}\text{Th}$, ki ima vrstno število manjše za 2 in masno število za 4. Takšno reakcijo lahko zapišemo takole:





Izhodnemu izotopu urana rečemo, da je starševski izotop. Nastalemu izotopu torija pa rečemo hčerinski izotop. Takšni reakciji rečemo *jedrska reakcija*. Poteče namreč v jedru atomov. Po tem se razlikuje od kemijske reakcije, kjer se atomi povezujejo z zunanjimi elektroni. Razen tega pa se pri jedrski reakciji lahko sprosti tudi do milijonkrat več energije kot pri kemijski reakciji. Tudi jedrska reakcija mora biti urejena: vsoti vrstnih in masnih števil na levi in desni strani reakcije morata biti enaki!

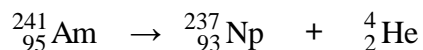
Zanimivost: Tale znamka je bila posvečena prvemu uspešnemu »alkimistu« na svetu E. Rutherfordu, novozelandskem znanstveniku, ki je leta 1919 dušikove atome »spremenil« v kisikove z obstreljevanjem z delci α . Reakcija je napisana tudi na tejle spominski znamki.



Slika 4: Ernest Rutherford na znamki (Vir: Wikipedia)

To je bila prva jedrska reakcija, ki jo je človek sam izvedel v laboratoriju.

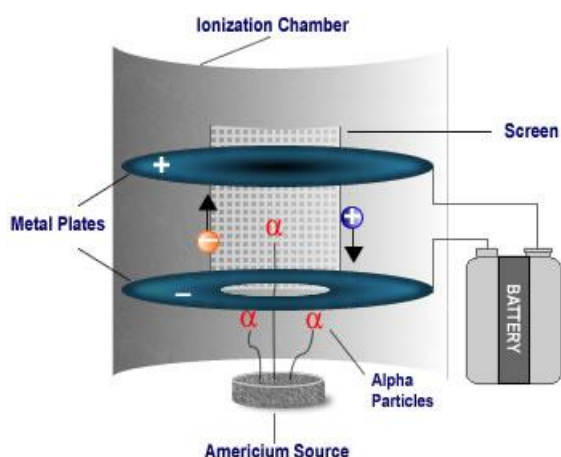
Eksperiment: večina detektorjev dima vsebuje zelo majhne količine (manj od 0,5 mikrograma) izotopa americija ${}^{241}_{95}\text{Am}$ v obliki oksida, ki je vir alfa sevanja. Pri tem nastaja hčerinski izotop elementa neptunija ${}^{237}_{93}\text{Np}$. Preveri, ali je spodnja jedrska reakcija urejena.



Detektor dima je naprava, v kateri se nahajata dve kovinski plošči in radioaktivni vir. Plošči sta priključeni na vir enosmerne napetosti. Alfa delci, ki jih emitira americij, ionizirajo kisik in dušik iz zraka. Pri tem nastanejo prosti elektroni in pozitivni ioni (kationi) kisika ter dušika. Elektroni potujejo na ploščo, ki je priključena na pozitivni pol baterije, kationi pa na drugo ploščo. Posledica tega pojava je majhen električni tok, ki ga zazna elektronsko vezje



v detektorju. Če pa je prisoten dim, se ta električni tok zmanjša, saj se delci dima vežejo na ione. Električni tok se zato zmanjša, sproži se alarm.



Slika 5: Zunanji videz in shema delovanja detektorja dima (Vir: Wikipedia)

Detektorji dima so lahko tudi optični. Vendar so ti v primerjavi z ionizacijskimi običajno manj občutljivi in dražji. Slabost ionizacijskih detektorjev dima pa je prisotnost majhnih količin radioaktivnega elementa americija. Ta pomeni nevarnost predvsem v primeru zaužitja, saj alfa delce učinkovito absorbira že plast zraka, debela nekaj centimetrov, ali pa ohišje detektorja. Zato morajo biti ti detektorji opremljeni z varnostnim opozorilom:



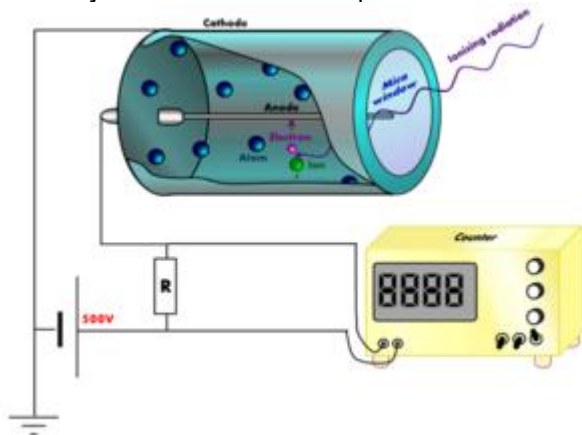
Pozor! Radioaktivno sevanje.

Naloga: približaj se (kolikor mogoče) ionizacijskemu detektorju dima z ustreznim Geigerjevim števcem. Zabeleži odčitek. Med števec in detektor daj list papirja, in se ponovno čim bolj približaj. Ponovno zabeleži odčitek.

Kot ste lahko opazili pri poskusu, že tanek list papirja zadrži alfa delce. Človeka na primer ščiti pred tem sevanjem vrhnja plast kože. Nevarnost pa pomenijo predvsem α sevalci, ki bi jih vdihovali, na primer radioaktivni žlahtni plin radon, ki nastaja iz radija z radioaktivnim razpadom. Druga nevarnost je zaužitje

oziroma vnos radioaktivnih snovi s hrano ali pijačo. Celice znotraj telesa pač niso zaščitene pred tem sevanjem! Razmislite, kaj je vzrok za to.

Opis instrumenta: Geigerjev števec je pravzaprav okrajšano ime za Geiger-Müllerjevo cev. Uporablja se za merjenje ionizirajočega sevanja. V cevi sta dve elektrodi, ki sta priključeni na električno napetost nekaj sto do tisoč voltov, vendar tok med njima ne teče. Ena elektroda je običajno kar kovinska cev ali pa tanka kovinska plast, nanasena na notranjo stran cevi iz izolacijskega materiala. Druga elektroda je kovinska žička, nameščena v sredini cevi. Cev je napolnjena z inertnim plinom, na primer argonom. Ionizirajoče sevanje, ki vstopi skozi »okno« cevi, pri prehodu skozi ionizira nekaj molekul plina, pri čemer nastanejo kationi in elektroni. Te nabite delce močno električno polje med elektrodama še pospeši, zato na svoji poti do elektrod ionizirajo še dodatne molekule plina (nastane »plaz« nabitih delcev; vsak elektron povzroči nastanek tudi do 10^8 novih). Rezultat tega pojava je kratek, a močan električni impulz. Število impulzov na sekundo pa je merilo za radioaktivnost nekega vira. Števec ne razlikuje med različnimi vrstami sevanja. Večina Geigerjevih števcov je narejenih tako, da zaslišimo ob vsakem pulzu še zvočni signal. Okno cevi je narejeno v cenejši izvedbi iz stekla: v tem primeru ne moremo izmeriti α sevanja, ker ga steklo absorbira. Boljši števci, ki zaznajo tudi to sevanje, imajo okno cevi narejeno iz sljude. Vendar pa so tudi bolj občutljivi na mehanske poškodbe.



Slika 6: Geiger-Millerjeva cev (Vir: Wikipedia)

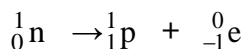
Dodatni zgled: radon je radioaktivni žlahtni plin, ki se nabira med stenami stavb, v pitni vodi, v podzemnih jamah in termalnih vrelcih. Znanih je dvajset izotopov radona, od katerih je najbolj stabilen $^{222}_{86}\text{Rn}$. Ta izotop nastaja z α radioaktivnim razpadom izotopa radija $^{226}_{88}\text{Ra}$. Napiši urejeno reakcijo razpada tega izotopa.

Radon je radioaktiven, zato je v prevelikih količinah nevaren. Povzroča tudi raka na pljučih. Doma se najbolje zaščitimo tako, da dobro zračimo prostore.

β razpad



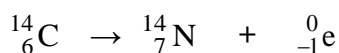
To sevanje sestavljajo elektroni z visoko energijo, ki nastanejo, ko iz nevtronov ${}^1_0\text{n}$ v jedru nastanejo protoni ${}^1_1\text{p}$.



Zato se pri tem razpadu masno število ne spremeni. Hčerinski izotop pa bo imel vrstno število za ena večje, ker se pri vsakem razpadu za ena poveča število protonov. Pravzaprav nastane pri razpadu razen protona in elektrona še en delec – antinevtrino, ki pa ima nemerljivo majhno maso, a vseeno nosi del kinetične energije razpadnih produktov.

V jedrskih reakcijah pišemo elektron kot ${}^0_{-1}\text{e}$. Namesto vrstnega števila namreč pišemo – 1, ker je toliko naboj elektrona. Masno število elektrona pa je seveda 0. Natančno imenujemo ta razpad beta minus razpad.

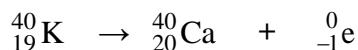
β radioaktivni razpad je značilen tudi za veliko izotopov lažjih elementov, na primer ogljika:



Preveri, ali je reakcija urejena.

β sevanje nastane pri razpadu nekaterih radioaktivnih snovi v naravi, vir tega sevanja pa so tudi odpadni produkti v jedrskih reaktorjih. V medicini se to sevanje uporablja za zdravljenje očesnega in kostnega raka. Kot vir se v ta namen največ uporablja izotop stroncija ${}^{90}_{38}\text{Sr}$.

Eksperiment: V naravi najdemo tudi okrog 0,0018 % kalijevega radioizotopa ${}^{40}_{19}\text{K}$. Okrog 17 miligramov tega izotopa je v človeškem telesu, ki ga tja vnesemo s hrano. Velika večina tega izotopa kalija razpada, pri čemer nastane izotop kalcija in beta sevanje:



Večina spojin kalija je zato šibko radioaktivnih. Pri poskusu boste kot vir β sevanja uporabili za veliko žlico kalijevega klorida KCl. Približajte se mu z Geigerjevim števcem, in zabeležite odčitek. Med sevalec in števec postavite list papirja, in aluminijasto folijo. Nato poskusite še z debelejšo ploščo iz aluminija. Primerjajte meritve s prejšnjimi v zvezi z α sevanjem. Katere je bolj prodorno? Seveda pa bi bila poskusa popolnoma kvantitativno primerljiva samo, če bi bile količine delcev sevanja enake.

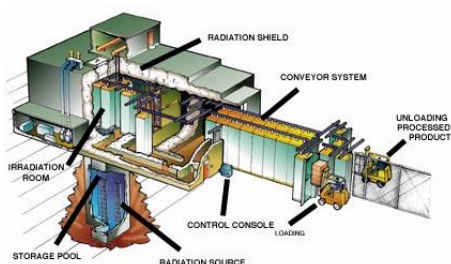
β delci sami niso radioaktivni. Nevarni so zaradi tega, ker so hitri in imajo zato visoko energijo, ki lahko povzroči ionizacijo v živih celicah. β sevalci se veliko uporabljajo v medicini, na primer izotop stroncija $^{90}_{38}\text{Sr}$ ali pa $^{131}_{53}\text{I}$ za zdravljenje hipertiroidizem, ko žleza ščitnica proizvaja preveč ščitničnih hormonov. Tako nastalo beta sevanje ima v tkivu domet do 2 mm. Jod se nabira v tistih delih tkiva, ki prekomerno delujejo, in jih uniči. Takšno zdravljenje je relativno varno.

Dodatni primer: pri β razpadu izotopa joda $^{131}_{53}\text{I}$ nastane izotop ksenona Xe. Napiši urejeno enačbo za to reakcijo.

γ razpad

To sevanje je od vseh najbolj prodorno, ima pa najmanjšo zmožnost ionizacije. γ sevanje je v bistvu visoko energijsko elektromagnetno valovanje z valovno dolžino pod 124 pm, ki spremlja α in β radioaktivni razpad nekaterih izotopov. Njegova energija pa je odvisna tudi od vrste radioaktivne snovi, ki je razpadla.

Zaradi velike energije se uporablja na primer v medicini in v živilski industriji za sterilizacijo, pri čemer uniči bakterije. Največ se za to uporabljata izotop cezija $^{137}_{55}\text{Cs}$ in kobalta $^{60}_{27}\text{Co}$.



Slika 7: Sterilizacija z uporabo virov gama sevanja. Zaščito zagotavljajo 2 m debele betonske stene. Desno je znak, ki označuje, da je bila hrana sterilizirana z radioaktivnim sevanjem (Vir: Wikipedia).

V jedrski medicini pa se gama sevanje uporablja tudi za ugotavljanje stopnje razširjenosti rakavih obolenj. Pacient pri tej preiskavi zaužije na primer izotop $^{99}_{43}\text{Tc}$ ali $^{201}_{81}\text{Tl}$, ki sta vira gama sevanja. Z gama kamero lahko dobimo prostorsko sliko razširjenosti tega sevalca oziroma tridimenzionalno sliko telesa, kjer se vidi tudi morebitne tumorje.

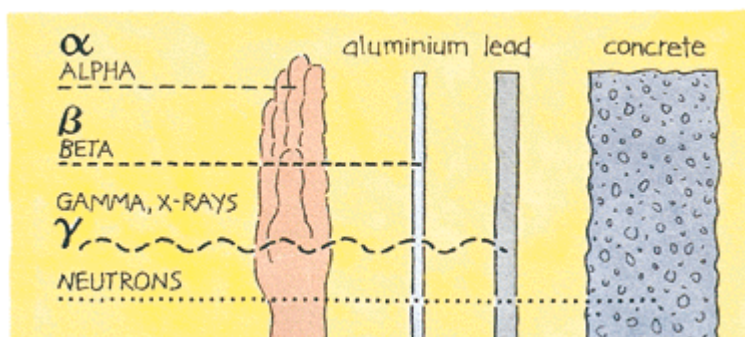


Slika 8: Uporaba jedrske energije v medicini (Vir: Wikipedia)

Zanimivost: γ žarki in rentgenski (X) žarki sta pravzaprav sinonima za valovanje s podobno valovno dolžino. Valovanji se razlikujeta le v načinu nastanka. γ sevanje nastane pri radioaktivnem razpadu snovi, rentgensko sevanje (X žarki) pa pri trku pospešenih elektronov s kovinsko tarčo. Navadno pa je energija γ sevanja, ki nastane pri razpadu jeder, še nekoliko večja oziroma valovna dolžina manjša kot pri rentgenskem sevanju.

Prodornost ionizirajočega sevanja

α , β in γ sevanje pa se razlikuje tudi po prodornosti v različnih snoveh. α žarki so sestavljeni iz večjih delcev, ki pri trčenju s snovjo hitro izgubijo svojo energijo. Prodornost teh žarkov je majhna, zadrži jih že list papirja, tanjša plast zraka ali pa koža. β sevanje je sestavljeno iz hitrih elektronov, ki so zato bolj prodorni. Prodrejo lahko v nekaj centimetrov debelo plast tkiva ali vode. Zadrži pa jih na primer 3 mm debela plošča iz aluminija. γ žarki (in rentgenski žarki) pa lahko prodrejo skozi človeško telo. Pred tem sevanjem se lahko zaščitimo le z debelimi plastmi betona, svinca ali vode. Popolnoma ga zadrži na primer šele dobra 2 m debela plošča iz svinca.



Slika 9: Prodornost različnih vrst sevanja (Vir: Wikipedia)

2. IONIZIRAJOČE SEVANJE – PREDSDOKI IN DEJSTVA

Naravno ozadje

Projekt delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada. Projekt se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007 – 2013, 3. razvojne prioritete: "Razvoj človeških virov in vseživljenjskega učenja", 3.1 prednostne usmeritve "Izboljšanje kakovosti in učinkovitosti sistema izobraževanja in usposabljanja" ter Javni razpis za izvajanje projekta naravoslovne kompetence za obdobje 2008 – 2011.



»Zelenjave z vrtov v občini Krško ne moremo prodati.«

»Jabolka iz sadovnjakov blizu odlagališča jedrskih odpadkov gotovo svetijo v temi.«

»Učenci v šoli ne bodo hoteli sedeti z našimi otroci.«

Zgoraj navedeni stavki so samo nekateri od pomislekov in predsodkov, ki jih imamo ljudje v zvezi z jedrsko energijo in ionizirajočim sevanjem.

V slovarju slovenskega knjižnega jezika piše pod geslom »predsodek« naslednje: predsodek je negativen, odklonilen odnos do koga ali česa, neodvisen od izkustva.

Vse, kar danes ljudje počnemo, nosi s sabo tudi določeno tveganje. Če kadimo, tvegamo, da bomo zboleli za pljučnim rakom. Če jemo nezdravo, tvegamo, da si bomo pokvarili želodec, ali da bomo imeli povišan krvni tlak. Pri smučanju tvegamo, da si bomo zlomili nogo. S pretirano uporabo transportnih sredstev tvegamo, da bomo veliko prezgodaj izrabili zaloge goriv, pa še okolju bomo naredili nepopravljivo škodo.

Tudi uporaba jedrske energije pomeni določeno tveganje. Naša naloga je, da tveganje poznamo in da to upoštevamo pri svojem ravnanju.

Znanost se med drugim ukvarja tudi s predsodki. Naloga znanosti je meriti, ovrednotiti in razlagati. Poskusimo torej na ta način spoznati tudi jedrsko energijo in radioaktivno sevanje.

Začnimo z meritvijo!

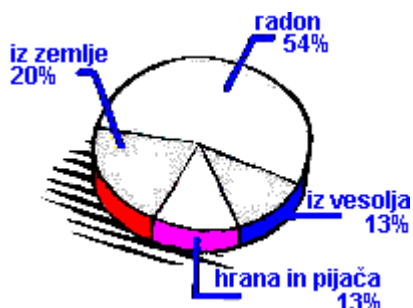
Eksperiment: Vključite Geiger – Müllerjev števec in ga približujte kupu umetnega gnojila in kupu keramičnih ploščic ali opeke. Kaj slišite? Koliko je klikov na minuto v posameznem primeru? Zapišite rezultate. Na zunaj ne bi mogli reči, da se z gnojilom ali opeko karkoli dogaja. Zakaj potem slišimo klikanje?

Vsak klik oziroma zvočni signal pomeni, da je v instrumentu prišlo do ionizacije plina. Čim bolj je vir radioaktiven, tem pogostejši so zvočni signali. Primerjajte rezultate teh meritev s tistimi, ki ste jih že prej izvedli (detektorji dima, KCI).

Pri poskusu ste lahko opazili tudi naslednje: bolj ko se približamo viru, več klikov slišimo, čeprav ničesar ne vidimo. Kaj je torej povzročilo te klike?

Za klike je »krivo« tako imenovano **ionizirajoče sevanje**, ki je na našem planetu stalno prisotno. Rečemo mu **naravno ozadje**. Vse živo na našem planetu – ljudje, živali, rastline – se je moralo prilagoditi sevanju naravnega ozadja.

Vir sevanja naravnega ozadja so kozmični žarki iz oddaljenega vesolja in od našega sonca ter radioaktivne snovi v globinah našega planeta. Zrak, ki ga dihamo, vsebuje na primer tudi plin radon, ki je vzrok za velik del naravnega ozadja. Ljudje, ki živijo na granitnih področjih, prejmejo več sevanja kot ostali. Piloti letal in ljudje, ki živijo na večji nadmorski višini, so bolj izpostavljeni kozmičnim žarkom. Tam je zemeljska atmosfera redkejša, zato slabše ščiti pred sevanjem.



Slika 10: sevanje naravnega ozadja iz različnih virov (Vir: ARAO)

Viri ionizirajočega sevanja pa so lahko tudi umetni: sem spadajo vsi izotopi in ostali predelani viri sevanja, ki jih je ustvaril človek za potrebe industrije, medicine in jedrskih elektrarn. Manjši viri sevanja pa so nastali tudi zaradi koncentrirane uporabe tehnoloških materialov, ki izvirajo iz zemlje ali kamna: les, opeka, cevi, žebliji itd. Vsak od teh seva.

Projekt: V svojem bivalnem okolju izberite različne lokacije in jih premerite z Geigerjevim števcem. Vključite tudi morebitne jame. Naredite mape ozemlja, v katere vrišite rezultate meritev.

Ionizirajoče sevanje je v splošnem sestavljeno iz protonov, nevtronov, elektronov, helijevih jeder, in še nekaterih drugih delcev. Lahko pa je tudi elektromagnetno valovanje z visoko energijo. Učinek, ki ga ima to sevanje na organizem, pa je odvisen od prejete doze.

Doza sevanja

Človeško telo ne more zaznati radioaktivnega sevanja. Energijo ionizirajočega sevanja, ki ga prejme telo, imenujemo *doza*. Doza je torej merilo za energijo, ki se pri sevanju absorbira v enoti mase telesa. Enota za dozo je *gray (Gy)*, ki je en joule na kilogram: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} / \text{kg}$.

Različne vrste sevanja pa nimajo enakega biološkega vpliva. Delec α na primer povzroči pri prehodu skozi tkivo veliko več škode od delca β . Rastline oziroma nižje razviti organizmi so na sevanje bolj odporni kot višje razviti organizmi in človek. Zato v zvezi s sevanjem uporabljamo tudi *efektivno dozo* z



enoto sievert (Sv). En sievert sevanja povzroči enak biološki efekt na telo, ne glede na vrsto sevanja. Efektivno dozo en sievert je na primer prejelo telo, ki je bilo obsevano z dozo 1 Gy sevanja γ ali pa dozo 0,05 Gy sevanja α .

V praksi uporabljamo tisočkrat manjšo enoto milisievert (mSv). Važen pa je tudi čas trajanja izpostavljenosti sevanju.

Značilno sevanje ozadja kjerkoli na našem planetu pomeni efektivno dozo okrog 2 do 3 mSv/leto. Naravno ozadje je lahko ponekod tudi močnejše, na primer do 50 mSv/leto v nekaterih krajih Indije, pa tja do 260 mSv/leto pri kraju Ramsar v Iranu.

Naravno ozadje pomeni okrog 90 % prejete doze za populacijo na Zemlji; preostanek je umetnega izvora, ki obsega različna področja medicine in industrije. Na poletu v ZDA na primer prejmemo zaradi kozmičnega sevanja efektivno dozo okrog 0,05 mSv.



Slika 11: Polet z letalom, 0,05 mSv

V Sloveniji prejme posameznik iz raznih virov efektivno dozo okrog 2,4 mSv na leto. Jedrska elektrarna doprinese k temu 0,001 mSv. Poklicno izpostavljen delavec (na primer v jedrski elektrarni, v zdravstvu itd.) pa lahko v enem letu prejme efektivno dozo največ 20 mSv. Takšen delavec mora nositi zaradi varnosti zaščitna oblačila, oziroma delati za zaslonom.

Povejmo še, da so razni človeški organi različno občutljivi na sevanje. V tabeli spodaj so navedene tipične efektivne doze iz različnih virov naravnega ozadja, ki smo jim izpostavljeni v letu dni.

| VIR SEVANJA | EFEKTIVNA DOZA mSv /leto |
|------------------|-----------------------------|
| Kozmično sevanje | 0,27 |
| Zemlja | 0,28 |
| Radon | 2 |
| Telo | 0,39 |



| | |
|--------|------|
| Skupaj | 2,94 |
|--------|------|

Sevanju naravnega ozadja se ne moremo izogniti. Z zračenjem prostorov na primer lahko nekoliko zmanjšamo nabiranje plina radona.

V spodnji tabeli so navedene različne manjše efektivne doze, ki jim je izpostavljena večina ljudi v letu dni.

| VIR SEVANJA | EFEKTIVNA DOZA mSv /leto |
|---------------------|-----------------------------|
| Pitna voda | do 0,06 |
| Gradbeni material | 0,036 |
| Kmetijski proizvodi | 0,01 |
| Goriva: | |
| premog | 0,003 |
| naravni plin | 0,003 |
| TV sprejemniki | do 0,01 |
| Detektorji dima | do 0,00001 |

Projekt: napiši esej, ki bo povzel vse do sedaj zbrane podatke. Dodatne informacije poišči s spletom. Esaj naj bo kritična razprava o sevanju naravnega ozadja v tvojem okolju in o možnih sevalcih.

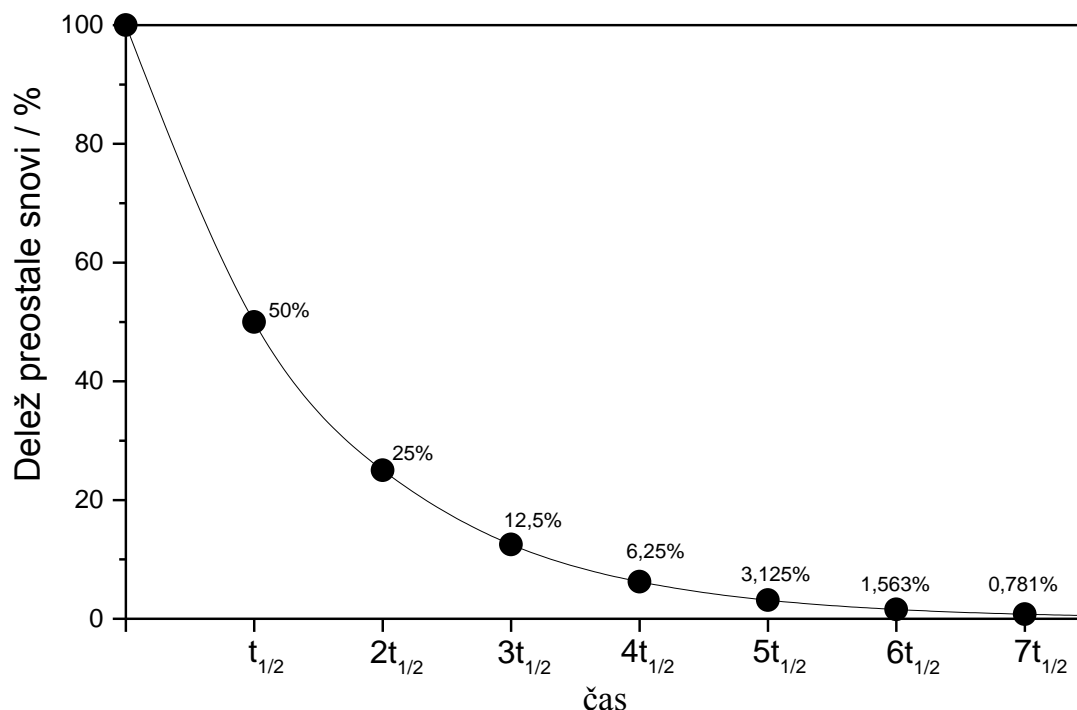
Aktivnost in razpolovni čas

Pri radioaktivnem razpadu se radioaktivnost snovi zmanjšuje. V zvezi s hitrostjo razpadanja jeder je tudi enota za radioaktivnost oziroma *aktivnost* snovi. To je becquerel (Bq), 1 razpad na sekundo. Če pride v neki količini radioaktivne snovi do razpada enega jedra na sekundo, rečemo, da ima aktivnost 1 becquerel:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}.$$

1 Bq je majhna aktivnost, zato v praksi uporabljamo tisočkrat (kBq) ali milijonkrat večjo enoto (MBq). Pozimi je povprečna aktivnost zraka v bivalnih prostorih okrog 70 Bq/m³.

Čas, v katerem razpade ena polovica izotopov nekega radioaktivnega elementa, imenujemo *razpolovni čas* $t_{1/2}$ tega elementa. To pomeni, da se po preteku razpolovnega časa radioaktivnost nekega izotopa zmanjša na polovico začetne, po preteku dveh razpolovnih časov na četrtino in tako naprej. Po preteku sedmih razpolovnih časov je prisotne manj od en procent začetne količine izotopa. Radioaktivnost snovi se zmanjšuje eksponentno v odvisnosti od časa, glej sliko.



Slika 12: Po preteku razpolovnega časa se radioaktivnost izotopov vsakič zmanjša na polovico prejšnje.

Vsi radioizotopi imajo značilen razpolovni čas, ki je lahko od nekaj delčkov sekunde pa vse do nekaj bilijonov let. V tabeli so navedeni razpolovni časi in vrsta sevanja za nekatere izotope.

| izotop | $^{215}_{84}\text{Po}$ | $^{218}_{84}\text{Po}$ | $^{214}_{83}\text{Bi}$ | $^{226}_{86}\text{Rn}$ | $^{234}_{90}\text{Th}$ | $^{210}_{82}\text{Pb}$ | $^{226}_{88}\text{Ra}$ | $^{238}_{92}\text{U}$ | $^{206}_{82}\text{Pb}$ |
|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| $t_{1/2}$ | 0,000164 sekund | 3,05 minut | 19,9 minut | 3,8 dni | 24 dni | 22,3 let | 1600 let | $4,51 \cdot 10^9$ let | stabi- len |
| emitirano sevanje | α | α | β, γ | α | β | β | α, γ | α | - |

Zanimivost: »Nekateri od navedenih radioizotopov nastanejo pri radioaktivnem razpadu $^{238}_{92}\text{U}$ v naravi. Vsak od njih razpada naprej, dokler na koncu ne nastane stabilen izotop $^{206}_{82}\text{Pb}$. Tej vrsti razpadov rečemo uranova serija, ki je pomemben vir sevanja ozadja. Brez tega bi se naš planet že zdavnaj ohladil, in bi bil kot tak neuporaben za življenje.

V človeškem telesu se nahaja povprečno okrog 0,1 miligrama izotopa $^{238}_{92}\text{U}$.«



Naslednji poskus bo ilustriral obliko krivulje hitrosti radioaktivnega razpada.

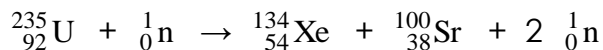
Eksperiment: dobite čim več kovancev, in jih dajte v kartonasto škatlo s pokrovom. Škatlo s sunkom navzgor in navzdol pretresite, odprite, in odstranite kovance s cifro navzgor. Zabeležite število preostalih kovancev v škatli, in izračunajte njihov delež v procentih. Škatlo ponovno pretresite, odstranite tiste s cifro navzgor, in izračunajte delež preostalih v škatli. Ponavljajte postopek toliko časa, dokler ni škatla prazna. Narišite diagram: na ordinati naj bo odvisnost deleža preostalih kovancev v škatli, na abscisi pa število poskusov. Krivulja bo podobna tisti za razpolovne čase. Bolje je, če poskus naredite s čim več kovanci.

Dodatni primer: razpolovni čas izotopa $^{226}_{86}\text{Rn}$ je 3,8 dni. Napiši enačbo za α razpad tega izotopa. Koliko časa je potrebno, da je v zaprti stavbi navzočih le še 12,5 % začetne količine tega izotopa?

3. JEDRSKE REAKCIJE

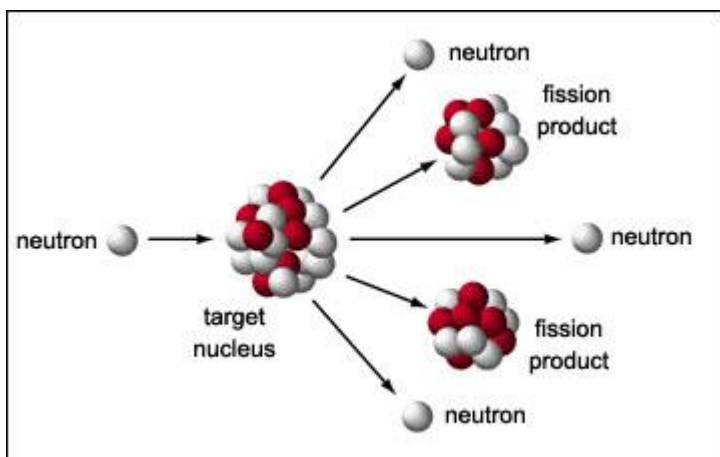
Cepitev jeder (fisija)

Jedra nekaterih težjih izotopov lahko sama od sebe razpadejo na dve lažji jedri. Takšno cepitev jeder pa lahko sprožijo tudi nevtroni, ki se vrinejo v jedro. Iz izotopa urana $^{235}_{92}\text{U}$ na primer nastane pri obstreljevanju z nevtroni zelo nestabilen izotop $^{236}_{92}\text{U}$, ki hitro razpade na manjša jedra, ki jih imenujemo cepitveni produkt. Reakcijo lahko poenostavljeno napišemo takole:



Cepitvena produkta pri reakciji, izotop elementa ksenona in stroncija, sta le dva od več možnih.

Na vsako razcepljeno jedro urana se sprostijo po dva do trije nevtroni, ki povzročijo cepitev novih izotopov urana, in tako naprej.



Slika 13: Verižna reakcija (Vir: Wikipedia)

Takšni reakciji rečemo *jedrska verižna reakcija*. Poteče zelo hitro, posledica pa je ogromna količina *jedrske energije*, ki se pri njej sprosti. K njej največ prispevata kinetična energija nastalih cepitvenih produktov in γ – sevanje.

Kontrolirana jedrska reakcija poteka na primer v jedrskem reaktorju, ki je glavni del vsake jedrske elektrarne. To pomeni, da sme od dveh do treh nevtronov, ki se sprostijo pri vsaki cepitvi, samo eden zadeti naslednje jedro urana. Število sproščenih nevtronov v jedrskem reaktorju kontrolirajo z uporabo kontrolnih palic iz bora ali kadmija, ki absorbirajo nevtrone. Hitrost nevtronov pa se zmanjša s prehodom skozi tako imenovan moderator, na primer vodo. Jedrsko energijo v tem primeru pretvorijo v toploto, ki upari vodo, para pa poganja parne turbine.

Cepitveni produkti so prav tako radioaktivni; pomenijo del radioaktivnih odpadkov iz jedrskih elektrarn, zato jih je treba pravilno skladiščiti. Z njimi je povezana večina ekoloških problemov v zvezi s pridobivanjem energije iz jedrskih elektrarn.



Slika 14: Jedrska elektrarna Krško (Vir: jedrska elektrarna Krško)

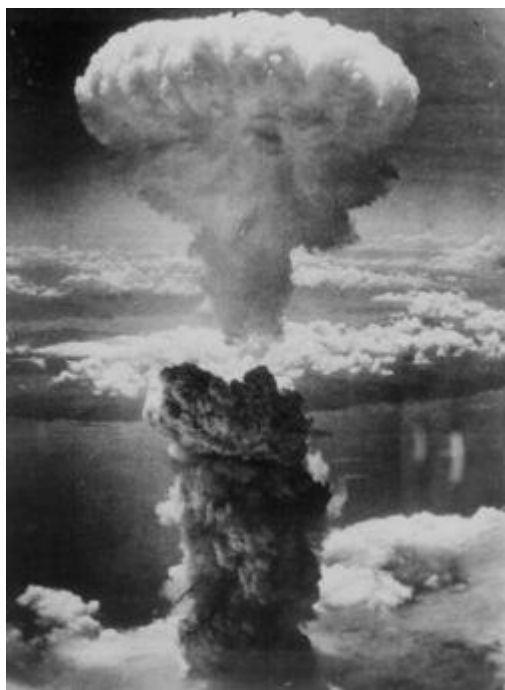


Izotopa, ki največkrat prideta v poštev pri cepitvi jeder, sta $^{235}_{92}\text{U}$ in $^{239}_{94}\text{Pu}$. Takšnim snovem rečemo *jedrsko gorivo*. Cepitveni produkti pa so v obeh primerih kemijski elementi z relativnimi atomskimi masami okrog 100.

Zanimivost: Fosilni jedrski reaktorji

V sedemdesetih letih dvajsetega stoletja so znanstveniki v rudniku Oklo v Gabonu (Zahodna Afrika) našli 15 naravnih jedrskih reaktorjev, ki se delovali pred dvema milijardama let. Za njihovo delovanje je bila bistvena prisotnost vode, ki je ravno dovolj upočasnila nevtrone, da so ti lahko cepili naslednja jedra. Reaktorji so delovali kakšnih milijon let. Naravna verižna reakcija se je končala, ko je preostalo premalo izotopov urana, da bi potekala še naprej.

Na podobnem principu so zasnovane določene vrste jedrskih bomb: v takšni bombi poteče nekontrolirana jedrska reakcija, jedrska energija pa se sprosti v obliki mogočne eksplozije z veliko rušilno močjo. Zaradi hitrega nastanka velike mase vročih plinov spremlja takšno eksplozijo ogromen gobast oblak, ki je sestavljen iz prahu, dima, ognja, radioizotopov in ostalih produktov pri cepitvi. Cepitveni produkti so radioaktivni: tako imenovan »radioaktivni dež« po jedrski eksploziji pomeni veliko nevarnost za vse preživele še dolgo po eksploziji. Z vetrovi se lahko razširi tudi daleč stran od mesta eksplozije.



Slika 15: Hirošima avgusta 1945 (Vir: obe sliki Wikipedia)



Američani so avgusta 1945 na japonski mesti Hirošimo in Nagasaki odvrgli jedrski bombi moči 13 kiloton TNT ($60 \text{ kg } {}^{235}_{92}\text{U}$, Hirošima) in 21 kiloton TNT ($6,4 \text{ kg } {}^{239}_{94}\text{Pu}$, Nagasaki). Posledice bombardiranja: okrog 200 000 ubitih civilistov in še večje število obolelih.

TNT je okrajšava za 2,4,6 - trinitrotoluen, ki je klasični eksploziv. Moč jedrske eksplozije je izražena z maso v kilotonah TNT, ki bi morala eksplodirati za podoben učinek. Energija pri eksploziji 1 kilotone TNT je $4,184 \cdot 10^{12} \text{ J}$. Toliko energije nastane na primer pri zgorevanju okrog 143 ton premoga.

Zlitje jeder (fuzija)

Pod določenimi pogoji lahko pride do zlitja atomskih jeder, pri čemer se sprosti veliko energije. Zlitje vodikovih jeder poteka pri zelo visokih temperaturah nekaj sto milijonov kelvinov v Soncu in drugih zvezdah. Pri tem nastanejo helijeva jedra in nevtroni. Ta pojav je vir toplotne in svetlobne energije, ki smo je deležni na našem planetu s Sonca.

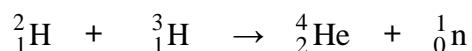


Slika 16: Sonce je naravni fuzijski reaktor (Vir: Wikipedia).

Zanimivost: za zlitje jeder je potrebna na začetku velika količina energije. Razlog je odbojna elektrostatska sila med pozitivno nabitimi protoni v jedru. Čim pa se dve jedri zadosti približata, nad odbojno silo prevlada močna jedrska sila, ki deluje na kratkih razdaljah. Pri tem drugem delu pojava se sprosti veliko energije, tako da je zlitje v celoti energetsko ugoden proces.



Za pridobivanje energije je za sedaj najbolj obetavna reakcija zlitja vodikovih izotopov devterija in tritija:



Pri tej reakciji se sprosti tudi ogromno energije. Trenutno pa so tehnične ovire za izkoriščanje zlitja jeder pri pridobivanju energije še prevelike.

Bolj »uspešna« je uporaba zlivanja jeder v vojaške namene: leta 1952 je eksplodirala prva ameriška vodikova bomba z močjo 10,4 megatone TNT (450 krat več kot fisijska bomba na Nagasaki). To orožje vsebuje primarno fisijsko jedrsko bombo, ki eksplodira najprej, pri čemer nastane zadosti energije, da se začne reakcija zlitja jeder.



Slika 17: Prva vodikova bomba (Vir: Wikipedia)

Prispevek vseh dosedanjih jedrskih eksplozij v ozračju je okrog 7 mSv.

Dodatni primer: ena od možnih fuzijskih reakcij je tudi zlitje dveh jeder tritija, pri katerem nastanejo izotop helija in dva nevtrona. Napiši enačbo za to reakcijo.