

Vaja 6: Zaznavanje radioaktivnosti

Matej Bažec

5. december 2018

Povzetek

Spoznali bomo, kaj je to radioaktivnost, zakaj do nje pride ter kako jo detektiramo in izmerimo. Seznanili se bomo z osnovnimi količinami, ki jih pri radioaktivnosti merimo, in z enotami, ki jih uporabljamo za navajanje rezultatov. Prikazali bomo praktičen način delovanja Geiger-Müllerjeve cevi in naredili nekaj osnovnih meritev.

1 Uvod

1.1 Kaj je radioaktivnost?

Kot radioaktivnost razumemo vse pojave, ki nastanejo zaradi sprememb v snovi na nivoju jedra ali manjših delcev. Alternativno lahko radioaktivnost definiramo kot sevanja z energijo višjo od 100eV. Po tej definiciji lahko k radioaktivnosti prištejemo tudi izvore visokoenergetskega sevanja nejedrskega izvora (npr. Röntgenske cevi).

Da bi razumeli, zakaj do radioaktivnosti sploh pride, se moramo malo poglobiti v strukturo jedra in sile, ki delujejo v njem. Vsa atomska jedra so sestavljena iz protonov in nevtronov. Prvi so pozitivno nabiti z nabojem e_0 (osnovni naboj, $1,60217662 \cdot 10^{-19}$ As), drugi pa električno nevtralni. Število protonov določa električno polje okrog jedra in s tem elektronsko strukturo atoma. Ta se odraža v kemijskih lastnosti elementa. Samo z električno silo se ne da opisati jedra, saj bi vsa jedra z več kot enim protonom (vodikova jedra) zaradi električne sile razneslo.

V resnici pa predstavlja električna sila manjši delež izmed sil med gradniki jedra. Bistveno močnejša sila, ki deluje med protoni in nevtroni, je jedrska sila (danes vemo, da je to preostanek močne sile, tako kot so medatomske in medmolekularne sile preostanek električne). Ta deluje enako (ne povsem) med dvema protonoma, med dvema nevtronoma ter med protonom in nevtronom. Navzven je ne čutimo, ker je izrazito kratkega dosega (nekaj fm).

Ravno njen kratek doseg je razlog, da postanejo večja jedra nestabilna. Neke vrste analogija je prisotna pri dežnih kapljicah. Majhne dežne kapljice padajo nemoteno in ne spreminjajo svoje oblike med padanjem. Velike kaplje pa po drugi strani opletajo, dokler se ne razcepijo na manjše kapljice. Podobno je pri atomskih jedrih. Svoj delež k nestabilnosti prispeva še odbojna elektrostatična sila med protoni. Zato je v težjih jedrih vedno presežek nevtronov v primerjavi s protoni. Edini stabilni jedri s presežkom protonov sta ^1H in ^3He .

Pri razpadu α jedro izseva helijevo jedro, pri razpadu β pa elektron in elektronski antinevtrino, pri čemer se en nevtron spremeni v proton. Obe sevanji spremlja sevanje γ kot posledica relaksacije vzbujenih novonastalih jeder.

2 Vrste radioaktivnih razpadov

Nestabilno jedro lahko razpade na več načinov. Omenimo samo najpomembnejše. Težka jedra najraje razpadejo tako, da izsevajo α delec, ki ni nič drugega kot jedro helija ^4He . Pri tem nastane jedro, ki ima vrstno število za 2 manjše in masno za 4. Drugi najpogostejši razpad jedra je razpad β (tudi β^-). Pri tem jedro izseva β delec (elektron) in elektronski antinevtrino $\bar{\nu}_e$ (ki ga ne zaznamo). Pri tem se en nevtron v jedru spremeni v proton. Ta razpad je najpogostejši pri jedrih, ki nastanejo iz več zaporednih alfa razpadov, zaradi česar imajo presežek nevtronov.

Pri obeh načinih razpadov ima nastalo jedro tipično višjo energijo od svoje lastne; pravimo, da je v vzbujenem stanju. Tako jedro se nato v zelo kratkem času (tipičen red velikosti je 10^{-12}s) relaksira v svoje osnovno stanje pri čemer izseva foton. Tako sevanje zaznamo kot elektromagnetno sevanje visoke frekvence (nad 10^{19}Hz , kar ustreza energijam nad 100keV) in mu pravimo sevanje γ .

Redkejši načini razpadov so jedrska fisija, kjer se večje jedro razbije na (pretežno) dve lažji jedri in nekaj prostih nevtronov, sevanje β^+ , kjer jedro izseva pozitron (antidelec elektrona), ujetje elektrona (jedro posrka vase enega od elektronov, ki krožijo okrog njega), emisija protona, emisija nevtrona in še nekaj drugih bolj eksotičnih razpadov.

2.1 Sevanje α

Do sevanja α pride pri težjih jedrih, ki so energetske neugodna. Pri tem nastane jedro z dvema elektronoma in protonoma manj ter delec alfa, ki je helijevo jedro. Slednji ima karakteristično energijo okrog 5MeV , ki zelo malo odstopa pri vseh jedrih s takim razpadom. Je pa nekoliko nižja za jedra z dolgo razpolovno dobo in nekoliko višja pri jedrih s kratko razpolovno dobo. Pravzaprav je bil majhen razpon energij (od 3MeV do 8MeV) glede na razpon razpolovnih dob (10^{-6}s do več milijard let) precej presenetljiv za tiste čase. Zvezi med razpolovnim časom in energijo alfa delca pravimo Geiger-Nuttallov zakon. Ta zveza je pomembna iz zgodovinskih razlogov, saj je bila eden prvih primerov, ki se ga je uspešno opisalo s takrat na novo nastajajočo kvantno mehaniko in z njo povezanimi pojavi (v tem konkretnem primeru je šlo za tuneliranje[2]).

Alfa sevanje je zelo neprodorno. Zaustavi ga lahko že tanek list papirja. Veliko se ga absorbira že v samem zraku. Pri tem nastane nekaj elektromagnetnega sevanja nižjih energij. Pri močnih alfa sevalcih (npr. polonij) je to lahko tako intenzivno, da se to sevanje vidi s prostim očesom kot modrikasto žarenje.

Samo po sebi alfa sevanje zdravju ni nevarno, saj se v najslabšem primeru absorbira v zgornjih plasteh kože. Zelo nevarno pa je lahko, če pridejo alfa sevalci v telo (bodisi z dihanjem bodisi z zaužitjem). Najbolj znamenit primer tovrstne zastrupitve je umor Litvinenka leta 2006.

2.2 Sevanje β

Pri razpadu β razpade eden od nevtronov na proton (ki ostane v jedru), elektron (ki ga zaznamo kot sevanje) in elektronski antinevtrino, ki ga ne moremo zaznati, saj je električno nevtralen in interagira z okolico le s šibko silo (nevtrinski detektorji sicer obstajajo, a so to zelo velike in kompleksne naprave). Pogosto je pri jedrih, ki imajo presežek nevtronov. Taka jedra so tipično produkti eno ali večkratnih alfa razpadov.

Za razliko od energije alfa delca, ki je fiksna za določen tip jedra, ima izsevani elektron zvezno porazdeljeno energijo na skali do 1MeV . Razlog za to je, da se kinetična energija in gibalna količina porazdelijo med tri nastale delce - novo jedro, elektron in nevtrino. Pomembna razlika med obema sevanjema je tudi ta, da je za beta razpad odgovorna šibka sila (preko vmesnega W^- bozona).

Sevanje beta interagira z ostalimi nabitimi delci, zato se relativno hitro absorbira in je slabo prodorno. Popolnoma ga lahko ustavi že tanka plast aluminija. Temu ustrezno je tudi zdravstveno tveganje pri izpostavljenosti sevanju. Povzroča predvsem poškodbe na izpostavljenih delih telesa, v notranja tkiva pa ne prodre.

2.3 Sevanje γ

Pri razpadih α in β imajo novonastala jedra precej višjo energijo od svoje lastne. Ta energija se v zelo kratkem času (reda velikosti 10^{-12}s) sprosti v obliki fotonov (elektromagnetnega valovanja) visokih energij in posledično tudi frekvenc. Izsevanemu valovanju pravimo sevanje γ .

Pri razpadu α težje jedro izseva helijevo jedro, zaradi česar se mu masno število zmanjša za 4, vrstno pa za 2. Energija izsevanega delca je okrog 5MeV . Sevanje ni prodorno; zaustavi ga lahko že tanek list papirja. Je pa nevarno, če pride alfa sevalec v organizem z zaužitjem ali dihanjem.

Sevanje β je značilno za jedra s presežkom nevtronov. Pri tem razpadu se jedru masno število ne spremeni, vrstno se poveča za 1. Sevanje je slabo prodorno; zaustavi ga lahko že tanka plast aluminija.

Fotoni sami po sebi niso električno nabiti. Zato lahko prodirajo globoko v snov. Za čas odkritja so jih uporabljali za slike kostnega tkiva (dandanes se za to uporablja Röntgenske žarke). Za njihovo absorpcijo potrebujemo debelo plast svinca ali ekvivalentno plast druge masivne snovi. Zaradi prodornosti so tudi najbolj nevarni za človeško zdravje. Zaščitna obleka pred njimi ne varuje.

Sevanje γ spremlja sevanje α in β zaradi relaksacije vzbujenih novonastalih jeder. Je elektromagnetno valovanje zelo visokih frekvenc in energij. Je zelo prodorno; zaustavi ga komaj debela plast svinca.

3 Vrste detektorjev

Detektorje sevanja delimo predvsem na dve skupini - plinske (ionizacijske) in polprevodniške. Pri prvih je osnova delovanja ionizacija atomov v plinu, pri drugih pa tvorba para elektron - vrzel. Zgodovinsko so pomembne tudi mehurčne in meglične celice in fotografski filmi.

3.1 Plinski ionizacijski števeci

Najbolj popularna skupina merilcev radioaktivnosti so plinski ionizacijski števeci. V to kategorijo sodijo Geiger-Müllerjeva cev, ionizacijska komora in proporcionalni števeci. Pri vseh je skupno, da so sestavljeni iz dveh elektrod pod napetostjo med katerima je prisoten plin. Ko ionizirajoči delec zadene plin, ga ionizira; to pomeni, da zbije elektron iz atoma, tako da nastaneta prost elektron in pozitivni ion.

Pri ionizacijski komori nato elektron potuje proti pozitivni elektrodi, ion pa proti negativni. To zaznamo kot tok. Napetost na elektrodah mora biti zadosti nizka, da ne pospeši ionov in elektronov do te mere, da bi ti lahko dodatno ionizirali plin. Zato je tok neodvisen od napetosti, ampak le od koncentracije ionizirajočih delcev. Na žalost pa je ta tok tako majhen, da je ionizacijska komora uporabna le pri visokih radiacijah. Njena prednost pa je v tem, da dela neprestano in nima mrtvega časa, kot ga ima npr. Geigerjeva cev.

Proporcionalni števeci delujejo pri nekoliko višjih napetostih. Zaradi tega ima nastali par elektron-ion zadosti visoko energijo, da ionizira molekule plina pri trku z njimi. Novonastali pari lahko nato povzročijo ionizacijo ionizacijo novih molekul, zaradi česar nastane plaz. Višjo energijo ko ima ionizirajoči delec, več prvotnih parov bo generiral. Vsak od teh parov bo nato povzročil svoj plaz. Število plazov bo torej sorazmerno z energijo delca.

Najbolj primitivna a hkrati tudi najbolj uporabljena oblika plinskega števca je Geiger-Müllerjeva cev. Deluje v ravnem delu karakteristike, to je odvisnosti števila dogodkov na časovno enoto od napetosti. Ko cev preleti ionizirajoči delec sproži plaz, ki ga zaznamo kot tokovni suneč. Ne zanima nas energija plazov ampak samo število plazov. Vsakega od teh plazov zabeležimo kot en dogodek. Ker se v tipičnih nizkoradioaktivnih aplikacijah število sunkov pojavlja vsakih nekaj sekund, moramo meriti vsaj minuto, da dobimo uporaben rezultat.

3.2 Scintilacijski števec

Scintilator je snov, ki se ob preletu nekega sevanja zasveti. Zelo popularni scintilatorji so fluorescentne barve. Te namreč absorbirajo UV svetlobo in jo emitirajo nazaj v vidnem spektru. Na podobnem principu delujejo belilni dodatki v pralnih praških ali premaz cevi v sijalkah. Pogosto so te snovi organski kristali, čeprav poznamo tudi anorganske kristale, tekočine in celo pline.

Svetlobo iz scintilatorja nato preusmerimo na fotopomnoževalko. To je naprava, ki ima na vhodni strani fotokatodo. Tam fotoni zbijejo elektron. Elektron nato pospešimo s pomočjo električnega polja do tako visoke energije, da lahko ob trku v pozitivno elektrodo iz nje zbije nekaj elektronov, ki jim pravimo sekundarni elektroni. Sekundarne elektrone nato ponovno pospešimo. Postopek nato ponavljamo, dokler ne dosežemo zadostnega števila elektronov, ki ga nato zaznamo kot tokovni suneč.

Scintilatorju povezenim s fotopomnoževalko pravimo scintilacijski števec. Scintilacijski števci so priročni, ker lahko z njimi detektiramo tudi nevtrone. Nevtroni sicer direktno ne interagirajo s scintilatorjem, lahko pa interagirajo z jedri (največkrat je to vodik) v scintilatorju.

3.3 Polprevodniški števci

Namesto ionizacije plina lahko izkoristimo tvorbo parov elektron-vrzel v polprevodnikih. Polprevodnik rahlo dopiramo enkrat s donorskimi, drugič pa za akceptor-skimi primesmi. Tako dobimo klasičen p-n stik (dioda), ki ga damo pod napetost v zaporni smeri. Ko foton preleti polprevodnik, lahko tvori par elektron-vrzel, ki se zaradi napetosti pospešujeta vsak v svojo smer. Prihod para na elektrodo zaznamo kot tokovni sunek.

Pri preletu lahko isti foton generira več parov, pri čemer se mu vsakič energija zmanjša za energijo, ki je potrebna za tvorbo para. Ker je slednja znana in je odvisna samo od vrste polprevodnika, je število parov (in posledično amplituda tokovnega sunka) odvisna od vstopne energije fotona.

3.4 Meglična in mehurčna celica

Iz zgodovinskega zornega kota sta zelo pomembni meglična in mehurčna celica, se pa jih danes razen v pedagoške namene ne uporablja. Meglična celica deluje na principu prenasičene pare (največkrat vodne, ni pa nujno). To je v režimu, ko bi se plinska faza morala kondenzirati v kapljice, vendar se zaradi visoke površinske napetosti slednje ne tvorijo.

Ko ionizirajoči delec preleti meglično celico, ionizira eno od molekul vode. Ta nato deluje kot kondenzacijsko jedro, okrog katerega se tvori kapljica. Kapljica nato sipa svetlobo, kar nam omogoča, da vizualiziramo prelet delca skozi celico.

Na podobnem principu deluje mehurčna celica, le da imamo v njej pregreto kapljevino (največkrat je to utekočinjen plin). To je kapljevina, ki bi morala pri danem tlaku in temperaturi povreti, vendar ne povre zaradi površinske napetosti. Ionizirajoči delci nato tvorijo jedra, v katerih se tvori plinska faza.

4 Merjenje radioaktivnosti

4.1 Fizikalne količine in merske enote

Zaradi različnih tipov jedrskih razpadov in različnih energij, ki so pri tem prisotne, se vseh radioaktivnih pojavov ne da spraviti pod isto streho. Kljub temu pa obstaja težnja, da se radioaktivne pojave pomeji, pri čemer se poskušamo osredotočiti na specifično lastnost, ki nas zanima.

Prva količina, ki jo bomo definirali je aktivnost materiala. Pove nam, koliko jeder v dani časovni enoti razpade. Enota zanjo je Bq (becquerel po Henriju Becquerelu), definiran pa je kot en razpad danem materialu v 1 sekundi. To je zelo majhna enota, zato aktivnost po navadi podajamo v večjih enotah, kjer becquerelu dodamo SI prepono (kBq, MBq ...). Za primer - zaradi naravne vsebnosti radioaktivnega izotopa kalija, v človeškem telesu vsako sekundo razpade 4400 kalijevih jeder, kar ustreza aktivnosti 4,4kBq.

Ker je aktivnost odvisna od količine radioaktivnega materiala, večkrat definiramo specifično aktivnost kot aktivnost na maso materiala. Ta je odvisna samo od materiala in ne od njegove količine enota zanjo je Bq/kg.

Včasih nas bolj kot število razpadov zanimata izsevana in absorbirana energija. V primeru slednje definiramo absorbirano dozo, kot absorbirano energijo na enoto mase. Enota zanjo je Gy (gray po Louisu Haroldu Grayu) ustreza pa absorbiranemu 1J na 1kg obsevanega materiala.

Aktivnost materiala je število razpadov na dano časovno enoto. Enota zanjo je Bq in je enak enemu razpadu na sekundo.

Absorbirana doza je količina, ki nam pove, koliko energije se je absorbiralo na enoto mase danega materiala. Enota zanjo je Gy in ustreza 1J/kg.

Absorbirana doza nam nič ne pove o zdravstvenih učinkih sevanja. Zato definiramo tudi ekvivalentno dozo, ki nam pove kakšen vpliv bo imela absorbirana doza na zdravje. Enota zanjo je Sv (sievert po Rolfu Maximilianu Sievertu) in je ekvivalent 1Gy gama sevanja. Treba je seveda upoštevati, da vsa tkiva niso enako občutljiva na isto sevanje. Zato definiramo tudi efektivno dozo, ki upošteva tudi obsevano tkivo. Tako 1Sv absorbirane doze na koži povzroči samo 0,01Sv efektivne doze, medtem ko bo ista absorbirana doza v pljučih povzročila 0,12Sv efektivne doze. Efektivna doza 1Sv predstavlja 5,5% tveganje, da bo oseba, ki jo je prejela, obbolela za rakom[1].

Zaposleni v okoljih s povečanim sevanjem imajo tipično pri sebi dozimeter, ki meri akumulirano dozo, ki ne sme preseči predpisanih vrednosti. Sicer pa se doza po navadi ne meri direktno, ampak kot stopnja doze, ki je definirana kot doza na časovno enoto. Tipične vrednosti zanjo so v območju do nekaj $\mu\text{Sv/h}$.

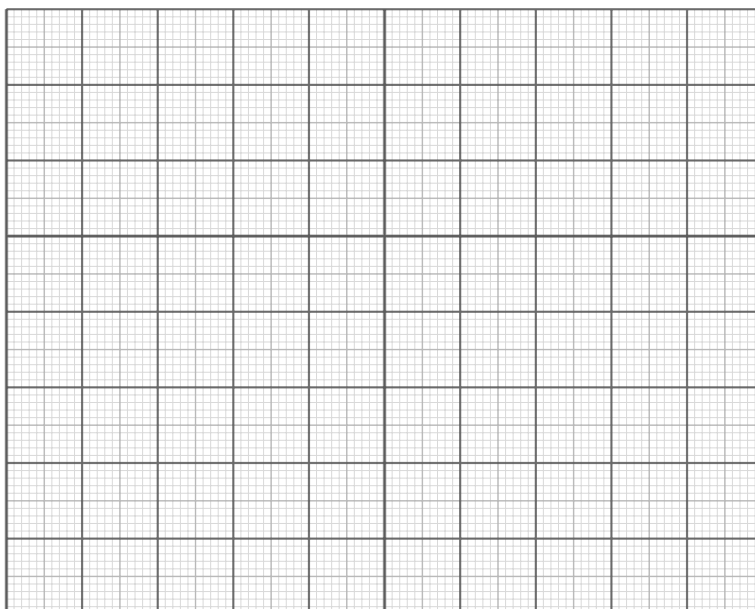
Ekvivalnetna doza je ekvivalent absorbirane doze glede na zdravstvene učinke, ki jih dan tip sevanja ima. Efektivna doza upošteva tudi, katero tkivo je bilo obsevano. Obe imata enoto Sv (sievert).

4.2 Prikaz delovanja GM cevi

Za prikaz principa delovanja Geiger-Müllerjeve (GM) cevi bomo uporabil cevko, ki jo bomo priključili na visokonapetostni izvir. Za to bo služila napetostna lestev priključena na avtotransformator, s katerim bomo določali napetost, ki jo bomo odčitavali na voltmetru. Ker so sunki iz GM cevi tokovni, bomo zaporedno nanjo priključili upornik, na katerem bomo gledali napetost na osciloskopu.

Da postavimo GM cev na pravo delovno napetost, moramo poznati njeno karakteristiko. Pri prenizkih napetostih je namreč polje prenizko, da bi vzpodbudilo nastanek plazov. Posamezen ioniziran delec ali elektron pa imata premajhen naboj, da bi lahko iz njega zaznali tok. Ko začnejo plazovi nastajati preidemo v proporcionalno področje. Ko pa napetost še povišamo, se pojavi ravni del karakteristike, kjer bomo opravljali meritve.

Pri različnih napetostih preštej število sunkov na intervalu od 5 minut. Poišči delovno območje GM cevi. Pazi, da ne prekoračiš napetosti, ko začne GM cev prebijati. Takrat jo lahko trajno poškodujemo. Nariši karakteristiko.



4.3 Merjenje sevanja različnih vzorcev

Za konec bomo še pomerili ozadje in nekaj vzorcev nizkoradioaktivnih materialov (kalijeve soli, mineralna gnojila, varilne elektrode s torijem ...)

Napetost nastavi na sredino delovnega območja. Za tri različne vzorce preštej število sunkov na intervalu od 5 minut. Hkrati meri tudi aktivnost s profesionalnim merilcem in primerjaj meritvi. Število sunkov preuredi v število dogodkov na minuto (DNM) tako za prototip (p) kot za profesionalni merilec(m).

material	DNM (p)	DNM (m)	Razmerje

Literatura

- [1] ICRP publication 103. *Annals of the IRCP*, 37:2–4, 2007.
- [2] J. Strnad. *Fizika 4. del*. DMFA, Ljubljana, 1991.
- [3] M. Valič. *Fizikalne meritve*.