

OŠ Marije Vere
Ljubljanska cesta 16a
1241 Kamnik

MERITVE IONIZIRAJOČEGA SEVANJA RADIOAKTIVNIH VIROV Z GEIGERJEVIM ŠTEVCEM IN MERILNIKOM RADONA

RAZISKOVALNA NALOGA s področja: FIZIKA

Avtor:

Jernej Zavasnik, 9. b

Mentorica:

mag. Polona Mežnar

Kamnik, januar 2025

Zahvala

Zahvaljujem se ge. Vesni Slapar Borišek in g. Radku Isteniču z Izobraževalnega centra za jedrsko tehnologijo Reaktorskega centra IJS v Brinju pri Ljubljani, ki sta mi priskrbela odlično umerjen in kvaliteten Geigerjev števec ter nekatere vire ionizirajočega sevanja. Zahvaljujem se tudi moji mentorici, učiteljici kemije mag. Poloni Mežnar, ki me je vodila skozi raziskovalno nalogo, me sproti opominjala o izboljšavah ter odgovarjala na vsa moja vprašanja v povezavi z njo. Zahvaljujem se tudi učiteljici slovenščine, ge. Vanji Hočevar, ki mi je pomagala pri lektoriranju raziskovalne naloge. Zahvala gre tudi moji mami, sorodnikom in starim staršem, ki so mi omogočili, da sem dobil vire ionizirajočega sevanja za raziskovalno nalogo.

Kazalo

Povzetek.....	5
Abstract.....	5
Uvod	6
HIPOTEZE.....	6
TEORETIČNI DEL.....	7
1. Jedrska fizika.....	7
1.1 Kaj raziskuje jedrska fizika?	7
1.2. Zgradba atomskega jedra.....	7
1.2.1. Nukleoni.....	7
1.2.2 Močna jedrska sila.....	8
1.3 Izotopi in magična števila	9
1.4 Jedrski razpad in razpolovna doba.....	9
1.5 Vrste ionizirajočega sevanja radioaktivnih snovi.....	11
1.5.1. Sevanje α	11
1.5.2. Sevanje β^-	12
1.5.3. Sevanje γ	12
2. Dozimetrija.....	14
2.2 Doze	14
2.3 Vplivi doz na organizme	15
3. Sestava in delovanje obeh merilnih naprav	16
3.1 Geiger-Müllerjev števec.....	16
3.2 Merilnik za radon	17
4. Radon kot vir ionizirajočega sevanja.....	18
4.1 Kaj je radon?	18
EKSPERIMENTALNI DEL.....	20
5. Odkritja v jedrski fiziki.....	20
5.1 Skromni začetki	20
5.2 Stvaritev nove veje fizike.....	20
6. Eksperiment.....	23
6.1 Merjenje z Geiger-Müllerjevim števcem	24
6.2. Meritve z merilnikom za radon	28
7. Razprava	30
8. Zaključek	33
8. Viri in literatura.....	34
8.1 Spletni viri	34
8.2 Literatura	35
8.3 Viri slik	35

KAZALO SLIK

Slika 1: Zgradba atoma in subatomske delci.....	8
Slika 2: Razpadni niz naravnega urana-238	11
Slika 3: α jedrski razpad radija-226	12
Slika 4: Prodornost žarkov sevanja α , β in γ skozi materiale	13
Slika 5: Doze sevanja ob različnih dejavnostih	15
Slika 6: Shematski prikaz delovanja Geiger-Müllerjeve cevi.....	17
Slika 7: Merilnik za radon, ki smo ga uporabili pri eksperimentu	18
Slika 8: Ventilacijska metoda odvajanja radona pod tlakom	19
Slika 9: Rutherfordov eksperiment sipanja z zlato folijo in delci α	23
Slika 10: Geiger-Müllerjev števec MiniTrace in dvodelni Geiger-Müllerjev števec s sondo	26
Slika 11: Merjenje ionizirajočega sevanja radijeve ure.....	26

KAZALO TABEL

Tabela 1: Meritve virov ionizirajočega sevanja brez upoštevanja sevanja iz ozadja v obeh enotah.....	27
Tabela 2: Meritve virov ionizirajočega sevanja z upoštevanjem sevanja iz ozadja v obeh enotah (1,5 CPS oz. 0,17 $\mu\text{Sv/h}$)	28
Tabela 3: Meritve radona v prostorih v enoti Bq/m^3	30

Povzetek

Ionizirajoče sevanje je naravni proces, brez katerega živa bitja sploh ne bi obstajala, saj je ionizirajoče sevanje gonilna sila evolucije. Proces naravnega radioaktivnega razpada, pri katerem nastajajo delci ionizirajočega sevanja, organizmom v vsakdanjih količinah ne predstavlja nevarnosti, saj je cela paleta radioaktivnih izotopov prisotnih v naravi. Med pomembnejše vire naravnega ionizirajočega sevanja spadajo: plin radon, žarki iz vesolja in tal ter hrana in pijača. Največji problem za naš vsakdanjik je plin radon, ki je prisoten v prsti in vodi. Zanimalo me je, kako je jedrska fizika raziskovala svet atomskega jedra. Izvedel sem tudi meritve ionizirajočega sevanja radona in ionizirajočega sevanja različnih virov iz vsakdanjega življenja. Uporabil sem naslednje vire ionizirajočega sevanja: desertne krožnike iz uranovega stekla, z uranom glaziran krožnik, uro, ki ima številčnico in kazalce prevlečeno z radijem, uranovo rudo, mrežico za plinske svetilke, varilno elektrodo s torijem, umetno gnojilo, brazilske oreščke in upepeljen bananin olupak. Z Geiger-Müllerjevim števcem sem največjo količino ionizirajočega sevanja izmeril pri krožniku z uranovo glazuro v enoti CPS in pri mešani uranovi rudi v enoti $\mu\text{Sv/h}$, najmanj pa pri upepeljenem bananinem olupku in brazilskih oreščkih. Največjo količino radona sem izmeril v zaprti posodi z radijevo uro, najmanjšo pa v kleti sorodnikov.

KLJUČNE BESEDE: ionizirajoče sevanje, jedrski razpad, radon, viri ionizirajočega sevanja, Geiger-Müllerjev števec

Abstract

Ionising radiation is a natural process which is important, because it helped evolve the simple forms of life into more complex organisms like humans. The process of natural radioactive decay, where the particles of ionising radiations are created is not harmful to organisms in normal quantities of everyday life. A lot of natural radionuclides are present in the natural food chain. The most important sources of natural ionising radiation: radon gas, cosmic rays, food and drinking water. The biggest problem for everyday life in terms of ionising radiation is radon gas, which is the product of natural uranium and thorium decay. In the experimental part I was interested how nuclear physics was discovering the world of subatomic particles in atomic nuclei. In the experimental part I measured the ionising radiation of everyday radioactive sources and radon gas in different places. At the measurements I used these radioactive sources: uranium glass plates, uranium glassed plate, radium clock, thorium gas mantle, welding rods, artificial fertilizer, ash of banana peel and Brazil nuts. With Geiger-Müller counter I measured the highest dose of radiation at uranium glazed pot in unit $\mu\text{Sv/h}$ and at uranium ore in unit CPS. With the radon detector I measured the highest concentrations of radon in a closed box with radium clock and the lowest concentration in the basement.

KEY WORDS: ionising radiation, radioactive decay, radon, sources of ionising radiation, Geiger-Müller counter, radon detector

Uvod

V raziskovalni nalogi se ukvarjam z naravnim ionizirajočim sevanjem, ki ga bom meril z Geiger-Müllerjevim števcem in merilnikom radona. Z obema merilnikoma bom izmeril ionizirajoče sevanje predmetov iz vsakdanjega življenja. Cilj raziskovalne naloge je dokazati, da so radioaktivni viri pogosti v našem vsakdanjiku in ne škodujejo zdravju ljudi. Dandanes se v javnosti širijo dezinformacije o nevarnostih radioaktivnih virov, ki pa ne držijo. Razen medicinskih radioaktivnih virov, se v našem vsakdanjiku srečamo zgolj z naravnim ionizirajočim sevanjem, ki nima vpliva na zdravje ljudi. Pri eksperimentu sem meritve virov ionizirajočega sevanja z Geiger-Müllerjevim števcem ustrezno vnesel v tabele in odštel prisotno sevanje iz ozadja, katerega povzročitelja sta plin radon in kozmični žarki. Z Geiger-Müllerjevim števcem sem meril v dveh različnih enotah: v enoti CPS in $\mu\text{Sv/h}$. Merilnik za radon bom postavil na pet različnih mest in merilnik tam za točne meritve pustil sedem dni. Povprečno vrednost ionizirajočega sevanja radona in njegovih produktov v sedmih dneh bom vnesel v tabelo v enoti Bq/m^3 .

HIPOTEZE

1. Na splošno je ionizirajoče sevanje za človeka izredno nevarno in je lahko že ob manjši izpostavljenosti usodno zanj.
2. Naravno ionizirajoče sevanje ni zelo močno in smo mu vsakodnevno izpostavljeni s hrano in pijačo, plinom radonom ter iz vesolja, kjer na naš planet ves čas vpadajo delci, ki so posledica vesoljskih aktivnosti.
3. Večino letne doze prejmemo s strani jedrskih elektrarn, ki so zelo nevarne zaradi vsakodnevnih izpustov radioaktivnih snovi in proizvodnje jedrskih odpadkov.
4. Ob meritvi predmetov iz vsakdanjega življenja, ki oddajajo ionizirajoče sevanje bom največjo količino ionizirajočega sevanja nameril pri uri, ki ima številčnico in kazalce prevlečene z svetilno bravo z radijem, najmanj pa pri upepeljeni banani.
5. Največ plina radona v prostoru bom nameril v kleti moje prababice, saj je klet že stara in je zaprt prostor, kjer se radon kopiči v večjih količinah, prostora pa se ne zrači. Najmanj ga bom izmeril v moji sobi, saj se nahaja v drugem nadstropju, daleč od tal in se pogosto zrači.
6. Največja odkritja v jedrski fiziki smo dobili v zadnjih stotih letih.

TEORETIČNI DEL

1. Jedrska fizika

1.1 Kaj raziskuje jedrska fizika?

Jedrska fizika je veja fizike, ki se ukvarja s preučevanjem atomskega jedra. Jedrski fiziki z znanstvenimi metodami podrobno raziskujejo njegovo delovanje, razpad in odnose med delci, ki sestavljajo atomsko jedro. Področje jedrske fizike ni enako atomski fiziki, ki raziskuje zgolj atome in elektrone. Jedrska fizika je tesno povezana s kemijo, termodinamiko in kvantno mehaniko. Znanstveniki, ki se ukvarjajo s tem področjem, ob delu uporabljajo različne merilne naprave, kot je npr. Geigerjev števec, ki ga opisujem v tej raziskovalni nalogi. Kader, ki se ukvarja z raziskavami v jedrski fiziki in reaktorski tehniki, je zaposlen na inštitutih, univerzah, jedrskih trkalnikih, v jedrskih elektrarnah, bolnišnicah in vladnih uradih.^{1 2 3}

1.2. Zgradba atomskega jedra

1.2.1. Nukleoni

Da bi sploh razumeli odnose, sestavo in ionizirajoče sevanje, se moramo poglobiti v manjši svet, kot je svet atoma. Atomi so osnovni delci, iz katerih je zgrajena prav vsa materija. Atomi so v večini prazen prostor, kjer so elektroni zgoščeni v elektronskem oblaku, ki obkroža 10.000-krat manjše jedro. Za to raziskovalno nalogo je ključno prav jedro, ki je sestavljeno iz subatomskih delcev, ki jim v fiziki delcev pravimo nukleoni oz. hadroni. Med nukleone spadajo nevtroni in protoni. Protoni so delci, ki imajo pozitivni električni naboj. So pomembni, saj atomu določajo vrstno število, ki nam pokaže, kateri atom kemičnega elementa gledamo. Protone fiziki označujejo s simbolom Z, kemiki pa z oznako p+. Njihova masa je malce manjša od nevtrona in mnogo večja od elektrona. Imajo izjemno majhno maso, saj njihova masa znaša približno 1.673×10^{-27} kg. Protoni niso osnovni delci, zato so zgrajeni iz še manjših delcev: kvarkov in gluonov.⁴ Če bi si zamislili jedro, ki ima 8 protonov, bi dobili

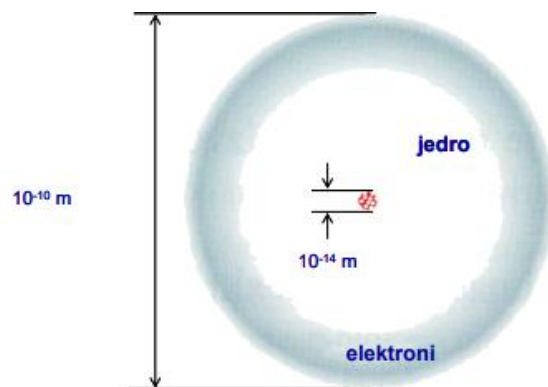
¹ <https://www.energy.gov/science/np/nuclear-physics> (pridobljeno dne: 3. 11. 2024)

² <https://physics.uiowa.edu/research/nuclear-and-particle-physics> (pridobljeno dne: 3. 11. 2024)

³ https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_physics (pridobljeno dne: 3. 11. 2024)

⁴ <https://www.britannica.com/science/physics-science/Nuclear-physics> (pridobljeno dne: 4. 11. 2024)

atomsko jedro kisika. Če bi prišteli še en proton, bi dobili atomsko jedro fluora, če bi prišteli še en proton, pa bi dobili atomsko jedro neona. Kako se elementi menjavajo zaradi vrstnih števil, je lepo vidno na periodnem sistemu elementov, kjer so razvrščeni po vrstnem številu. V protonu se nahajata dva (up) kvarka in (down) kvark, vse tri kvarke pa vežejo še osnovni delci brez mase, gluoni. Nevtrone bi lahko oklicali za nevtralne brate protonov, ker so nevtroni prav tako v jedru vezani s protoni z močno jedrsko silo, ki jo bomo spoznali kasneje. Nevtrone ni mogoče zaznati v elektromagnetnem polju, saj so električno nevtralni. Označimo jih s simbolom n^0 oz. z oznako N. Njihova masa je večja samo od protona, od elektrona pa je mnogo večja, približno 2000-kratna. Njihova približna masa znaša 1.674×10^{-27} kg. Nevtroni so zgrajeni iz dveh spodnjih kvarkov (down quark) in enega zgornjega kvarka (up quark). Zaradi velike mase nevtron po 15 minutah razpade na elektron in proton.^{5 6}



Slika 1: Zgradba atoma in subatomske delci

1.2.2 Močna jedrska sila

Beseda kvant v fiziki označuje delce, ki jih ni mogoče razstaviti na manjše komponente. Vidna svetloba, IR svetloba in ostala elektromagnetna valovanja so zgrajena iz kvantov fotonov, subatomske delci (protoni in nevtroni oz. nukleoni) pa niso osnovni delci, saj jih gradijo še manjši delci, ki jim pravimo kvarki in gluoni. Kvarke se v različnih zaporedjih nahajajo znotraj protonov in nevtronov.⁷ Kvarke veže še ena vrsta subatomskih delcev, ki jim pravimo gluoni. So posredniki močne jedrske sile, ki je najmočnejša sila izmed vseh štirih osnovnih sil, med katere spadajo: elektromagnetizem, gravitacija, močna in šibka jedrska sila. Atom urana vsebuje 92 protonov. Proton v uranovem atomskem jedru bi na površini jedra težil k izstopu iz

⁵ <https://www.britannica.com/science/neutron> (pridobljeno dne: 4. 11. 2024)

⁶ <https://www.space.com/protons-facts-discovery-charge-mass> (pridobljeno dne: 4. 11. 2024)

⁷ Bilban, Tina: Čudni kvantni svet. Dob, založba Miš, 2021, str. 46.

atomskega jedra s silo večjo od 310 N, vendar ga ob izstopu ovira izredno močna jedrska sila, ki kljubuje zakonom elektromagnetnega polja. Zakoni elektromagnetizma jasno povedo, da se dva delca, ki imata nasproten naboj, lahko z zelo majhno silo povežeta na dolge razdalje v prostoru, medtem ko močna jedrska sila na delce deluje s kratkim dosegom. Ko se premikamo po periodnem sistemu elementov, lahko opazimo da se število protonov vedno večja, s tem pa se večja tudi velikost atomskega jedra. Močna jedrska sila zato slabi, ko povečamo velikost atomskega jedra. Vedno težja atomska jedra niso več sposobna ohranjati ravnotežje v jedru, zato z radioaktivnim razpadom oddajajo ionizirajoče sevanje.⁸

1.3 Izotopi in magična števila

Beseda izotop pomeni, da ima nek atom elementa drugačno število nevtronov od običajnega atoma. Za primer si vzemimo vodik, ki ima tri izotope: H-1, H-2 (devterij) in H-3 (tritij). Običajen atom vodika je zgrajen iz enega protona in enega elektrona. Devterij ima poleg protona še dodaten nevtron, tritij pa poleg protona kar dva nevtrona.⁹ Magična števila imajo zabavno ime, vendar nimajo ničesar opraviti s čarovnijo. Magična števila so števila: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Čeprav se na videz zdijo običajna števila, so za jedrske fizike pomembna. Ko se atomska jedra ne držijo pravila, da morajo biti stabilna in ohranjati magična števila nukleonov, začnejo postajati nestabilna. Število protonov, nevtronov in elektronov se mora med sabo ujemati. Ob nestabilnosti atomskih jeder jedra atomov doživijo radioaktivni razpad, pri katerem oddajajo delce ionizirajočega sevanja. Primer magičnega števila nukleonov je izotop svinca svinec-208. Ta izotop je dvojno magičen, saj vsebuje 126 nevtronov in 82 protonov. Najbolj stabilen izmed vseh izotopov je helijev izotop He-4, ki je poleg običajnega vodika najpogostejša snov v vesolju.¹⁰

1.4 Jedrski razpad in razpolovna doba

Jedro nekega elementa, ki ne vsebuje magičnega števila nevtronov oz. jih ima nepravilno število, na vsak način hoče oddati odvečno energijo v obliki delcev, ki jo poznamo kot ionizirajoče sevanje. Le s tem načinom lahko nestabilni atomi dosežejo stabilnost jedra. Ta naravni pojav imenujemo radioaktivni razpad. Radioaktivni razpad

⁸ Al Khalili, Jim: *The physics book: Big ideas simply explained*. London, Dorling Kindersley Limited, 2020, str. 247.

⁹ <https://byjus.com/chemistry/isotopes-of-hydrogen/> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)

¹⁰ <https://www.vedantu.com/physics/magic-number> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)

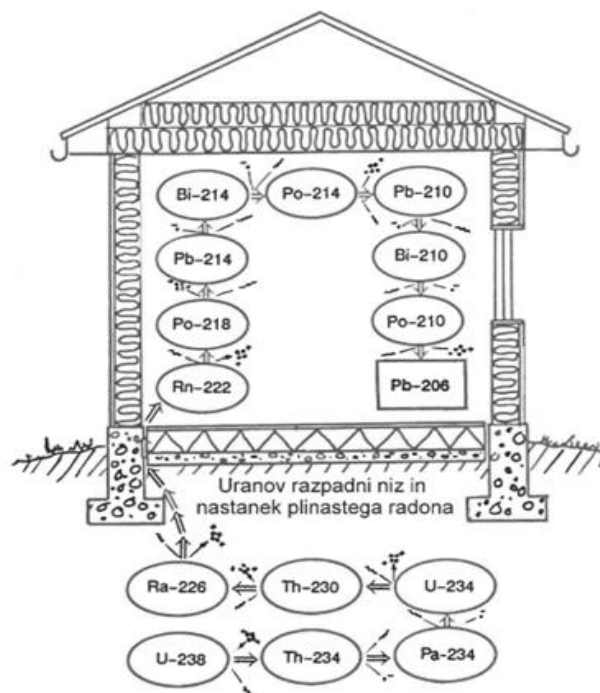
je spontan proces, pri katerem nestabilna jedra z oddajanjem ionizirajočega sevanja prehajajo proti bolj stabilnim stanjem. Stabilnost jedra je odvisna glede na jedro nekega izotopa. Za primer si vzemimo običajno ogljikovo jedro C-12, ki je stabilno in ni radioaktivno, saj ne oddaja ionizirajočega sevanja. C-13 ima en dodaten nevtron več in je še vedno stabilno. Vsi ostali izotopi ogljika pa so nestabilni in so radioaktivni. Srednjeveški kemiki, ki jih imenujemo alkimisti, so si stoletja prizadevali iz svinca pridelati zlato. Tega znanstvenikom ni uspelo do Rutherfordovega eksperimenta sipanja, ki je z delci α spremenil atom dušika v kisikovega, kar je bilo prvič v zgodovini znanosti, da smo iz prve snovi dobili tretjo. Preobrazba atomskih jeder pa se v naravi ves čas dogaja, saj radioaktivne snovi na vsak način poskušajo doseči stabilnost. Za primer si vzemimo uranov izotop U-238, ki ga najdemo v uranovi rudi. Zamislimo si, da gledamo kamnito hišo s kletjo, postavljeno tik nad bogatimi nahajališči uranove rude. V uranovih nahajališčih pod zemljo jedra urana-238 v uranovi rudi po več milijardah let razpadejo na torijeve atome Th-234, ti v protaktinijeve Pa-234 in tako dalje, dokler ne razpadejo v atome radioaktivnega plina radona Rn-222, ki tako vstopi v kamnito hišo skozi tla in tam doseže visoko koncentracijo v zraku. Z njegovo problematiko in vplivi na zdravje se bomo ukvarjali kasneje. Radon Rn-222 po 3 dnevih razpade na njegove razpadne produkte polonij Po-218 in druge, dokler ne doseže stabilnega izotopa svinca Pb-206. Tako preobrazbo snovi iz ene v drugo s pomočjo oddajanja ionizirajočega sevanja strokovno imenujemo razpadni niz ali razpadna veriga.¹¹ Večino radioaktivnih snovi kot se v naravnem okolju pojavljajo le znotraj razpadnih nizov in so zato v naravi zelo redke. Slika 2 prikazuje omenjeni razpadni niz, ki ga imenujemo uran-aktinijeva vrsta razpadnega niza, poznamo pa še uran-radijev in torijev razpadni niz.¹² Čas, ki ga potrebujejo atomska jedra, da se njihovo število zmanjša za polovico, imenujemo razpolovna doba. Snovi, ki imajo kratek razpolovni čas, imenujemo kratkoživi radionuklidi, ki se med sabo po razpolovni dobi lahko zelo razlikujejo (od nekaj desetink sekunde pa tja do nekaj mesecev). Dolgoživi radionuklidi imajo izjemno dolge razpolovne čase, ki so lahko tako dolgi, da presežejo starost našega planeta Zemlje.^{13 14}

¹¹ Wahlstrom, Bjorn: *Spoznajmo radioaktivnost*. Ljubljana, Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije, 2000, str. 19.

¹² https://radioactivity.eu.com/articles/phenomenon/radioactive_series (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)

¹³ Kladnik, Rudolf: *Svet elektronov in atomov, fizika za srednješolce 3*. Ljubljana, DZS, 2004, str. 194.

¹⁴ <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/z3tb8mn/revision/3> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)



Slika 2: Razpadni niz naravnega urana-238

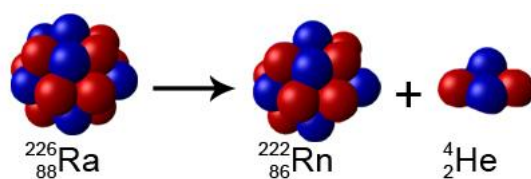
1.5 Vrste ionizirajočega sevanja radioaktivnih snovi

1.5.1. Sevanje α

Pri radioaktivnem razpadu α se jedro atoma pomiri z oddajanjem delcev α oz. helionov (helijevo jedro), ki vsebuje par nevtronov in par protonov. Delci α potujejo z različnimi energijami in so relativno težki delci, ki lahko potujejo do 3 cm daleč po zraku. Ti delci lahko ustvarijo ionizacijo, kar pomeni, da električno nevtralni atomi postanejo električno nabiti ioni, ki so izgubili elektrone v valenčni lupini.¹⁵ Ko nestabilno atomsko jedro odda α delce, iz sebe sprosti štiri nukleone (dva protona in dva nevtrona). Ko razpade jedro, ki je vir delcev α , nastane nov element, ki se zaradi dveh izgubljenih protonov pomakne za dve mesti nazaj na periodnem sistemu elementov. Plutonij z vrstnim številom 94 se po izredno dolgem času transformira v uran, ki ima vrstno število 92 in se zato nahaja dva elementa za plutonijem. Delci α so težki in hitro reagirajo z različnimi materiali. Njihovo pot ne glede na energijo zaustavi že pisarniški list papirja ali tanek listič lepenke. Ti delci ob vstopu v organizem s hrano, pijačo in z vdihavanjem telesu povzročijo hude poškodbe notranjih organov, saj ti delci potujejo skozi dihalne poti in prebavila, kjer obsevajo

¹⁵ <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/alpha-particles> (pridobljeno dne: 29. 11. 2024)

telo od znotraj in močno poškodujejo celice. Viri α delcev so naslednji izotopi: radon-222, uran-235, americij-241, plutonij-238, polonij-210 ...¹⁶



Slika 3: α jedrski razpad radija-226

1.5.2. Sevanje β^-

β^- aktivna jedra so čudaška, ker oddajajo elektrone, ki se sploh ne nahajajo znotraj jedra in nastajajo s preobrazbo nevtronov v protone, ti pa se transformirajo v elektrone in nevtrine. β delci so veliko hitrejši in lažji od delcev α , njihova hitrost je relativno blizu svetlobni (270.000 m/s). Z razpadom β^- se atomska jedra znebijo odvečnega nevtrona, nevtron pa se spremeni v proton, zato se število protonov poveča za enega. Ti delci imajo visoko kinetično energijo, ki je odvisna od vrste beta aktivnih atomskih jeder. Ob elektronih oz. β delcih nastane še ena vrsta delcev, ki jih imenujemo nevtrini. Njihovo ime izhaja iz italijanske pomanjševalnice za nevtron. Lahko bi jih označili za »prikazen« izmed vseh delcev, saj nimajo električnega naboja in imajo izredno majhno maso. Razlog za nastanek teh delcev je, da β jedrski razpad ne upošteva zakona o ohranitvi mase, vendar se ta masa izgubi in spremeni v nevtrine, ki so kot majhni »paketki energije« oz. kvanti. Sedaj vemo, da se ob preobrazbi nevtrona v proton ustvari delec β in nevtrino. Skozi material, ki vpija te delce, se β delci gibajo v križem-kražem smeri in se orientirajo proti pozitivnemu polu v elektromagnetnem polju. Ti delci zaradi svoje majhne mase in visoke hitrosti prosto prehajajo skozi tkivo in lahko predrejo človeško telo. Zaustavi jih lahko plastika ali aluminijasta folija. Za organizme je ionizirajoče sevanje β^- na zunaj zelo nevarno, v notranjosti človeškega telesa pa so delci α neprimerljivo bolj nevarni kot delci β . Viri β delcev so izotopi: vodik-3, žveplo-35, kalij-40, cezij-137 ...^{17 18}

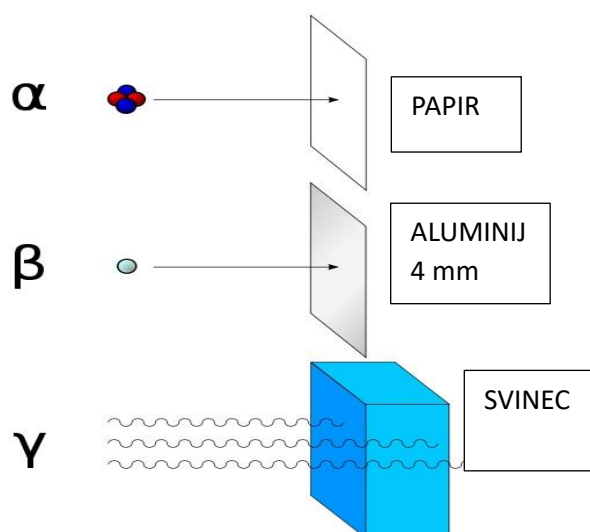
1.5.3. Sevanje γ

¹⁶ Kladnik, Rudolf: Svet atomov in elektronov, fizika za srednješolce 3. Ljubljana, DZS, 2004, str. 192.

¹⁷ Kladnik, Rudolf: Svet elektronov in atomov, fizika za srednješolce 3. Ljubljana, DZS, 2004, str. 192.

¹⁸ <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/beta-particle> (pridobljeno dne: 29. 11. 2024)

Razpad γ je silak izmed vseh vrst ionizirajočega sevanja. Delci γ so dejansko sestavljeni iz fotonov ali svetlobnih delcev, ki so zares majhni delci brez mase. Ta vrsta sevanja spada med elektromagnetna valovanja in je najprodornejše valovanje, ki ga poznamo. Gama žarki so svetloba s kratko valovno dolžino in potujejo s svetlobno hitrostjo, ki je ne more preseči nobeno telo v vesolju. Gama aktivna jedra imajo znotraj jedra presežke energije in se pomirijo z oddajanjem fotonov, ki ne spremenijo same sestave jedra. Jedra atomov z visoko energijskimi žarki γ so po oddajanju teh žarkov bolj umirjena in nimajo težav s presežki energije. Vire γ žarkov spremlja tudi ionizirajoče sevanje α ali β^- , saj ne odnesejo odvečne energije in po teh dveh stanjih jedro še vedno ostane v vzbujenem stanju. Delno jih lahko zaustavi le kombinacija debelega sloja gostejših materialov, npr. svinca, vode in betona. Ti žarki lahko prepotujejo ogromne razdalje, tudi do enega kilometra.¹⁹ Uspešnost zaščitnega materiala je odvisna od energije ionizirajočega sevanja in debeline zaščitnega materiala. Ker je foton delec brez mase, in potuje s svetlobno hitrostjo in veliko energijo, je za živeče organizme ta vrsta sevanja brez primerne zaščite izredno nevarna. Žarki γ ob večji izpostavljenosti povzročajo izjemno močne opekline, poškodbe dednega zapisa, povečajo lahko možnost za rakava obolenja, žarki γ uničujejo tudi spermije in zarodke. Najpomembnejši viri gama žarkov so: kobalt-60, jod-131, stroncij-90, tehnecij-99m ...²⁰



Slika 4: Prodornost žarkov sevanja α , β in γ skozi materiale

¹⁹ Kladnik, Rudolf: Fizika za srednješolce 3, Svet elektronov in atomov. Ljubljana, DZS, 2004, str. 193.

²⁰ Wahlstrom, Bjorn: Spoznajmo radioaktivnost. Ljubljana, Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije, 2000, str. 17.

2. Dozimetrija

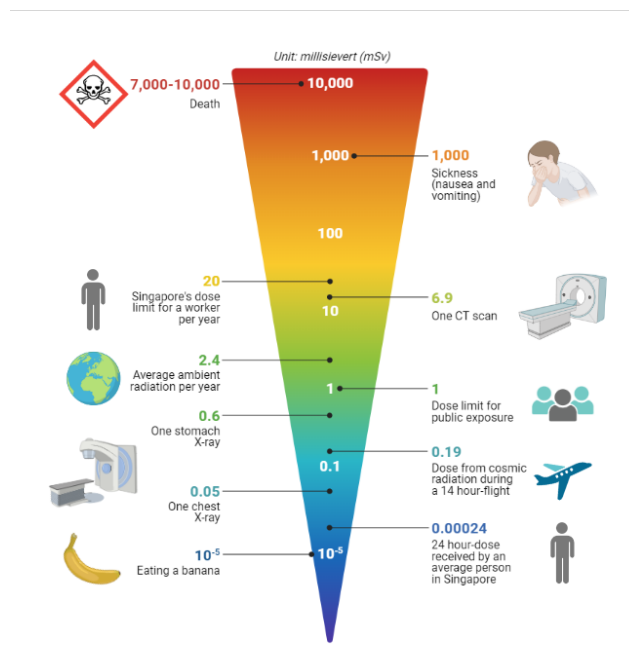
2.2 Doze

Ionizirajoče sevanje je lahko zelo nevarno, če z radioaktivnimi snovmi ne ravnamo pravilno in nismo primerno zaščiteni. V redkih primerih jedrske nesreče ali jedrske vojne bi lahko prejeli zelo visoko količino sevanja, ki jo imenujemo doza. Poznamo odprte in zaprte vire, ki vsebujejo radioaktivni vir. Doze razvrščamo v naslednje skupine: efektivna, absorbirana in ekvivalentna doza. Absorbirana doza predstavlja količino energije ionizirajočega sevanja, ki jo absorbira katerakoli snov in jo merimo v enoti gray (Gy), ekvivalentna doza se uporablja za prejeto dozo določenega organa ali dela telesa, ki pa jo merimo v enoti mSv. Efektivna doza pa je količina ionizirajočega sevanja, ki jo je prejelo celotno telo in je seštevek vseh vrednosti efektivne doze, merimo jo v enoti mSv.²¹ Ko bi pojedli banano, bi bili izpostavljeni približno 0.1 μ Sv, Slovenci smo v eni uri povprečno izpostavljeni 0.1 μ Sv. Eno rentgensko slikanje prsnega koša znaša 0.05 mSv, kar je veliko manj kot čezoceanski let iz Pariza v New York, ki bi meril 0.19 mSv. V času rentgenskega slikanja želodca bi prejeli 0.6 mSv. 1 mSv je mejna doza za posameznike zaradi uporabe virov sevanja (brez naravnega sevanja). Povprečna letna svetovna doza zaradi sevanja iz ozadja je 2.4 mSv, za Slovenijo pa ta vrednost znaša približno 6 mSv (upoštevamo: radon, kozmično sevanje, hrano, sevanje iz tal). CT slikanje, imenovano tudi rentgenska tomografija, je podobno ostalim rentgenskim slikanjem, le da gre za mehansko napravo, ki omogoča slikanje telesa z različnih strani hkrati. Taka rentgenska slikanja so lahko zelo dolga, zato je doza temu primerno tudi večja, znaša približno 6.9 mSv.²² Osebe, ki so poklicno izpostavljene sevanju, npr. radiologi, po slovenski zakonodaji ne bi smele preseči doze 20 mSv na leto. Pri bolnikih, ki se zdravijo z metodami radioterapije, se lahko njihova doza zelo poviša od dovoljene tolerančne doze. Pacienti, ki se zdravijo z radioaktivnimi snovmi, imajo zvišane diagnostične referenčne ravni, saj je tveganje vredno, ker osebi radioaktivna snov pomaga pri zdravljenju in ji lahko reši življenje. Strožje omejitve veljajo za nosečnice, ki se ukvarjajo z radioaktivnimi snovmi, njihova doza ne bi smela biti večja od 1 mSv. Vlade v različnih državah običajno postavijo še strožje omejitve glede radioaktivnih izpustov jedrskih elektrarn v okolico, ki znaša največ do 0,1 mSv na

²¹ [http://icrpaedia.org/Absorbed, Equivalent, and Effective Dose](http://icrpaedia.org/Absorbed,_Equivalent,_and_Effective_Dose) (pridobljeno dne 7.12. 2024)

²² <https://www.nea.gov.sg/our-services/radiation-safety/understanding-radiation/health-effects-of-ionising-radiation-on-people> (pridobljeno dne: 7. 12. 2024)

leto. Kljub temu jedrske elektrarne poskrbijo za izredno nizke izpuste radioaktivnih emisij v okolico, zato minimalno prispevajo k letni dozi ljudi, ki živijo na območju jedrskih elektrarn. V slovenski zakonodaji imamo zapisane mejne doze za prebivalstvo in radiološke delavce.²³



Slika 5: Doze sevanja ob različnih dejavnostih

2.3 Vplivi doz na organizme

Vplive doz pa izražamo v enoti za absorbirano dozo grayjih (Gy), ki predstavlja količino energije v enoti joule (J), ki jo vpije kilogram neke snovi. Smrtne doze so ogromne vrednosti ionizirajočega sevanja, ki jih izražamo v enoti gray. Dozam, ki so zelo visoke in jih prejmemo v krajših časovnih obdobjih pravimo akutne doze in so lahko življenjsko ogrožajoče. Majhne doze predstavljajo manjšo naravno izpostavljenost (npr. ionizirajoče sevanje radona in njegovih razpadnih produktov v domači kleti). Da bi bila neka količina doze smrtna, je znano le v nekaterih primerih iz zgodovine (Černobilska jedrska nesreča leta 1986 in odvrženi jedrski bombi na Hirošimo in Nagasaki leta 1945). V Černobilski jedrski nesreči je kmalu umrlo 31

²³ Wahlstrom, Bjorn: *Spoznajmo radioaktivnost*. Ljubljana, Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije, 2000, str. 53.

gasilcev, ki so gasili grafitni požar.²⁴ Černobilski gasilci so v zelo kratkem časovnem obdobju nekaj dni prejeli od 12.000 do 16.000 mSv, kar so nepredstavljivo visoke doze. V nekaj tednih se jim je zrušil imunski sistem, po več kot petih letih pa se je pojavila levkemija, zato večina černobilskih gasilcev danes ni več živih.²⁵ Če smo izpostavljeni malce prekoračeni dozi sevanja, se nam lahko spremeni le krvna slika, ki se sčasoma povrne nazaj v normalo in ima malo ali nič od zgoraj navedenih simptomov.²⁶

3. Sestava in delovanje obeh merilnih naprav

3.1 Geiger-Müllerjev števec

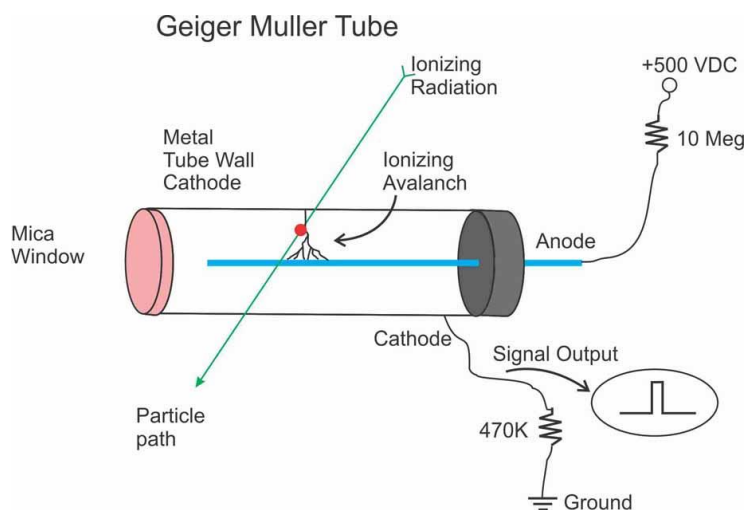
Geigerjev števec, imenovan tudi Geigerjev-Müllerjev števec, je posebna aparaturna za merjenje ionizirajočega sevanja v štirih osnovnih oblikah: žarki alfa, žarki beta, žarki gama, rentgenski žarki. Geigerjev števec je sestavljen iz kovinskega ohišja, v kateri se nahaja Geiger-Müllerjeva cev napolnjena z nizkotlačnimi nereaktivnimi žlahtnimi plini. Ta cev je vezana na električni krog pod veliko električno napetostjo. Delci ionizirajočega sevanja povzročijo ionizacijo plina, zato se elektroni zadenejo v pozitivno nabito elektrodo in steče električni krog. Cev ima pozitivno nabito iglo, obdano z negativno nabitim ovojem, zato je Geiger-Müllerjeva cev kondenzator. Prisotnost ionizirajočega sevanja je lahko prikazana s številnimi enotami, ki se razlikujejo glede na proizvajalca, vrsto sevanja in namembnost. Digitalni izpis nam lahko prikaže hitrost doze ali štetje pulzov (dogodkov) na časovno enoto. Medtem ko se Sv/h in $\mu\text{Sv/h}$ uporabljata za zaznavanje žarkov X in γ žarkov se enoti cpm in cps uporabljata za zaznavanje α in β sevanja. Vedeti moramo, da Geigerjev števec ne zmore zaznati energije radioaktivnega sevanja, zazna lahko namreč prisotnost le tega. Opremljen je z zvočnikom, ki ob detekciji delcev ionizirajočega sevanja odda

²⁴ Wahlstrom, Bjorn: *Spoznajmo radioaktivnost*. Ljubljana, Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije, 2000, str. 62.

²⁵ <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/health/health-effects-chernobyl-accident/>
(pridobljeno dne: 7. 12. 2024)

²⁶ Wahlstrom, Bjorn: *Spoznajmo radioaktivnost*. Ljubljana, Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije, 2000, str. 63.

zvočni signal v obliki klikov. Večja kot je pogostost klikov, več ionizirajočega sevanja je detektor zaznal.^{27 28}



Slika 6: Shematski prikaz delovanja Geiger-Müllerjeve cevi

3.2 Merilnik za radon

Merilnik za radon je preprosta naprava za zaznavanje v zraku prisotnega radioaktivnega plina radona, ki oddaja delce α , in za nevarne razpadne produkte, npr. (polonij Po-218). V Sloveniji si ga lahko brezplačno izposodimo na Upravi RS za varstvo pred sevanji, kjer sem ga prevzel tudi jaz. Merilnik za radon delce α sprejme preko celice, ki zaznava vstop delcev α in razpadne produkte v celici. Ko pride delec v celico, to zazna fotodioda, ki pošlje električni tok po električnem vezju in število delcev, izraženih v enoti, se prikaže na digitalnem zaslonu.²⁹ Celica zaznava delce v zraku na 25 cm^3 v časovnih odsekih po 30 minut. Za pravilno štetje ga najprej umerimo s tipko reset (ponastavitev), kar pomeni, da nam meri vsebnost radona od zadnje ponastavitve. Na digitalnem zaslonu se nam v angleščini prikaže napis LONG TERM AVERAGE, ki prikazuje povprečno koncentracijo radona od zadnje

²⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger_counter (pridobljeno dne: 6.10. 2024)

²⁸ <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/science-101/what-is-a-geiger-counter.html> (pridobljeno dne: 6.10. 2024)

²⁹ <https://help.airthings.com/en/articles/3119863-radon-charcoal-testing-vs-airthings-accuracy> (pridobljeno dne: 18.10. 2024)

ponastavitve. Izpis SHORT TERM AVERAGE 1 DAY prikazuje povprečno koncentracijo radona v zadnjem dnevu in izpis SHORT TERM AVERAGE 7 DAY pa prikazuje povprečno koncentracijo radona v roku celotnega tedna. Vrednosti 1 DAY in 7 DAY pa se izmenjujeta v spodnjem delu zaslona. Za pravilne meritve ga moramo na zelenem mestu pustiti 7 dni, saj so le tedenske meritve zanesljive.³⁰ Za štetje delcev radona in njegovih razpadnih produktov se uporabljata dve enoti: Bq/m³ in pCi/L. Bq/m³ je enota, ki nam prikaže aktivnost nekega radioaktivnega vira na kubični meter zračne mase. Enota pCi/L predstavlja oddajanje radioaktivnega sevanja na liter zraka.³¹



Slika 7: Merilnik za radon, ki smo ga uporabili pri eksperimentu

4. Radon kot vir ionizirajočega sevanja

4.1 Kaj je radon?

Radon je radioaktiven kemični element, ki nosi v periodnem sistemu atomsko število 86. Je plin brez vonja, barve in okusa. Uvrščamo ga v VIII. skupino periodnega sistema in je zato žlahtni plin. Nima vonja, okusa in barve. Njegov najbolj stabilen izotop je Rn-222 in je v naravi zelo redek. Radon se pojavlja le v sledih v razpokah, jaških uranovih rudnikov, kletah, prsti, permafrostu, razpokah, gejzirjih in blatnih vrelicah. Je posledica verige razpadanja urana U-238, torija Th-232 in radija Ra-226.³² Je drugi najbolj pogost povzročitelj pljučnega raka na svetu takoj za tobačnimi izdelki. Njegov najbolj stabilen izotop Rn-222 je radioaktiven in zato oddaja lahka helijeva

³⁰ <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/URSVS/Navodila-za-uporabo-merilnika-radona.pdf> (pridobljeno dne: 18. 10. 2024)

³¹ <https://www.airthings.com/resources/radon-detector> (pridobljeno dne: 18. 10. 2024)

³² Dixon, Gail, Parsons, Paul: *Periodni sistem, terenski vodnik po elementih*. Ljubljana, Modrijan, 2014, str. 198.

jedra oz. delce α . Ima razpolovno dobo 3,8 dneva in v tem času oddaja ionizirajoče sevanje ter se spremeni v nov izotop elementa, v tem primeru v polonij Po-218. Po 3,1 minutah Po-218 razpade na nestabilen izotop svinca Pb-214 in tako radon Rn-222 počasi razpada v radonove hčere oz. razpadne produkte, ki si vzamejo veliko časa za razpad in razpadajo po principu uran-radijevega razpadnega niza, dokler ne dobimo stabilnega izotopa svinca Pb-206. Plin radon je nevaren za zdravje, saj ob dolgoročnem vdihavanju radonovih α aktivnih potomcev lahko dobimo pljučnega raka, saj se radonovi razpadni produkti na naša pljuča prilepijo in jih obsevajo z delci α . Za zaščito pred radonom za podzemne prostore uporabljamo kvalitetnejše gradbene materiale in prostore redno zračimo ali pa radon z ventilacijsko metodo pod tlakom odvajamo iz kleti po cevi z izpustom radona v okolico.^{33 34}



Slika 8: Ventilacijska metoda odvajanja radona pod tlakom

³³ <https://www.zvd.si/sevanje-in-dozimetrija/radon/> (pridobljeno dne: 18. 10. 2024)

³⁴ <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-12/documents/radon-22-decay-chain.pdf> (pridobljeno dne: 25. 10. 2024)

EKSPERIMENTALNI DEL

V eksperimentalnem delu sem raziskal razvoj jedrske fizike in odkritja v povezavi z naravnim ionizirajočim sevanjem ter izvedel meritve z Geiger-Müllerjevim števcem in merilnikom radona.

5. Odkritja v jedrski fiziki

5.1 Skromni začetki

Začetki jedrske fizike segajo v daljno leto 1896, ko je fizik Antoine Becquerel v domačem laboratoriju opravljaj običajno raziskavo o oddajanju fosforescence uranovih soli. Ko je zrnca uranove soli postavil med vir fosforescence in filmskega traku ter kovinsko ploščico, preluknjano s krogom, se je na fotografskem negativu pojavil temen obris, kar je pokazalo, da do takrat še neznani žarki prosto prehajajo čez različne snovi. Za svoje dosežke in odkritje popolnoma novega naravnega fenomena je leta 1903 prejel Nobelovo nagrado za fiziko.³⁵

5.2 Stvaritev nove veje fizike

Marie Skodlowska Curie je bila genialna poljska fizičarka, ki je bila prva ženska na prestižni univerzi Sorbona v Parizu. Tam je spoznala svojega bodočega moža Pierra Curieja, s katerim sta se nekaj let po prihodu na univerzo poročila. Pridružila sta se raziskovanju še tedaj neznanih žarkov, ki so jih oddajale soli urana. Z možem sta več let prečiščevala tona uranove rude iz češkega rudnika Joachimov, ki naj bi bila bogata z majhnimi količinami neznanih elementov. Naposled sta leta 1898 izolirala človeštvu neznana elementa radij in polonij in zapisala metodo kemičnega ločevanja radija iz uranove rude. Za svoje dosežke sta zakonca Curie skupaj s Henrijem Becquerelom leta 1903 prejela Nobelovo nagrado za fiziko, po Marie Curie je

³⁵ *Staguhn, Gerhard: V iskanju najmanjšega delca sveta. Tržič, založba Učila, 2002, str. 26.*

poimenovan tudi kemični element kirij in pariški inštitut za rakave bolnike.³⁶ J. J. Thompson pa je leta 1897 odkril elektrone s katodno cevjo, ki je zmožna proizvajati snop elektronov skozi razredčeni plin. Po legendi naj bi si zgradbo atoma zamislil kot potico z rozinami, kjer naj bi se negativni elektroni prosto gibali z negativnim nabojem, sam atom pa naj bi po njegovem modelu atoma imel pozitivni naboj.³⁷ To teorijo je leta 1911 ovrgel učenec J. J. Thompsona Ernest Rutherford, ki je izvedel pomemben eksperiment jedrskega sipanja z zlato folijo. Pri eksperimentu je uporabil nekaj mikrometrov debelo zlato folijo in jo obstreljeval z delci α (helijevimi jedri), odbili pod kotom večjim od 90° na polovici atoma, kar je pomenilo, da mora poleg negativno nabitih elektronov tudi atomsko jedro, ki je pozitivno nabito, saj vsebuje protone. Delci α so se prebili skozi zelo tanko zlato folijo in so se pod kotom, večjim od devetdesetih stopinj, odbili do detektorja, ki jih je zaznal. Šest let kasneje mu je uspelo razbiti še jedro dušika z bombardiranjem z delci α , kar je povzročilo odboj protonov in nastanek povsem druge snovi – kisika, kar je bila prvo umetno transformiranje snovi iz ene v drugo. Ta dva sta le ena izmed mnogih poskusov, ki jih je opravil E. Rutherford, in vsi so dokazali, da je atom v večini prazen prostor z majhnim jedrom v centru in elektroni, ki krožijo po svojih tirnicah. V svojem življenju je odkril delce α in delce β , skozi eksperimente je dokazal, da nekateri kemični elementi razpadajo na lažje elemente ter posodobil Thompsonov model atoma v jedrski model atoma, ki se v veliki večini uporablja še danes.³⁸ Za svoje znanstveno delo na področju fizike in kemije je prejel Nobelovo nagrado za kemijo leta 1908. Njemu v čast so poimenovali tudi krater na luni in umeten element rutherfordij.³⁹ Sočasno je v tistem času deloval najbolj znan znanstvenik vseh časov, Albert Einstein, ki je s teorijo relativnosti in posebno relativno teorijo dosegel preboj na skoraj vseh področjih fizike. Posebna relativnostna teorija razkriva povezavo med časom, maso, prostorom in energijo. Čeprav se na prvi pogled zdi, da se Einsteinova posebna relativnostna teorija nanaša le na vesolje, v resnici deluje na vsako telo, vključno z nukleoni (delci atomskega jedra). Ti dve dragoceni odkritji sta nas prinesli do potrditve jedrskih reakcij in hitrosti jedrskih delcev, ki so jih kasneje odkrili v pospeševalnikih. Iz te teorije izhaja tudi v javnosti zelo poznana enačba $E=mc^2$, ki

³⁶ <https://www.nobelprize.org/womenwhochangedscience/stories/marie-curie> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)

³⁷ <https://www.khanacademy.org/science/chemistry/atomic-structure-and-properties/history-of-atomic-structure/a/discovery-of-the-electron-and-nucleus> (pridobljeno dne 15 .11. 2024)

³⁸ [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Chemistry_for_Changing_Times_\(Hill_and_McCreary\)/03%3A_Atomic_Structure/3.04%3A_Rutherford%27s_Experiment-The_Nuclear_Model_of_the_Atom](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Chemistry_for_Changing_Times_(Hill_and_McCreary)/03%3A_Atomic_Structure/3.04%3A_Rutherford%27s_Experiment-The_Nuclear_Model_of_the_Atom) (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)

³⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford#Early_life_and_education (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)

pomeni, da je lastna energija snovi enaka masi snovi pomnoženi s kvadratom svetlobni hitrosti v vakuumu. Relativnostna teorija pa govori o lastnosti časa in gravitacijski sili oz. teži, kar ni enako posebni relativnostni teoriji. Gravitacijska sila po relativnostni teoriji ni prisotna pri delcih, ki lahko dosežejo svetlobno hitrost, kar je 300 000 m/s.⁴⁰ ⁴¹ Med drugo svetovno vojno je pomembno prispeval k izumu jedrskega orožja v projektu Manhattan, po vojni pa si je prizadeval za mirno uporabo jedrske energije. Ti dve teoriji sta le eni izmed 50 iznajdb, ki so spremenile naše razumevanje sveta od velikega poka do jedrskih elektrarn. Za obe teoriji mu je bila leta 1921 podeljena Nobelova nagrada za fiziko, po njem so poimenovali tudi radioaktiven kemijski element Einsteinij.⁴² Do leta 1932 je po zaslugi Rutherfordovega poskusa sipanja atom veljal za večinoma prazen prostor, kjer je skoraj vsa masa zbrana v jedru atoma s protoni. Rutherfordov model atomskega jedra je imel do leta 1932 pomanjkljivost, saj atomsko jedro sestavljajo tudi nevtroni, ki so nevtralni delci in zato niso reagirali s pozitivno nabitimi delci α . Nevtrone so raziskovali angleški fizik James Chadwick in hči zakoncev Curie Irene Joliot-Curie s svojim možem. Pet let prej je nevtrone nevede proizvedel nemški fizik Walter Bothe, ko je polonijev vir delcev α (helijevih jeder) usmeril v tarčo (berilijevo folijo), nakar se je v meglični celici pojavila sled električno nevtralnih delcev. Irene Joliot-Curie in Frederic Joliot-Curie sta eksperiment ponovila in si napačno razložila Bothejev eksperiment v meglični celici kot fotone, ki so se odbili od tarče. James Chadwick je ponovil Bothejev poskus z drugačnim razmišljanjem, saj je sklepal, da so nevtroni masivni ter nevtralni delci, ki se nahajajo v atomskem jedru in ne vplivajo na oblak elektronov, ki se nahaja izven jedra. To je bil pomemben korak za nadaljnje raziskave pri obstreljevanju atomskega jedra.⁴³ Za odkritje nevtrona v fiziki je leta 1935 prejel Nobelovo nagrado, po 2. sv. vojni pa je bil član Mednarodne jedrske komisije OZN.⁴⁴

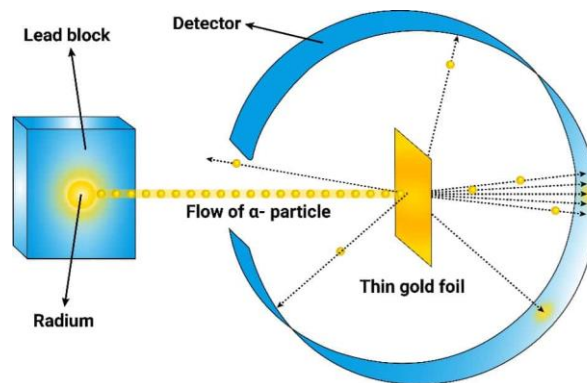
⁴⁰ <https://study.com/academy/lesson/theory-of-relativity-definition-example.html>
(pridobljeno dne: 15. 11. 2024)

⁴¹ <https://www.newscientist.com/lastword/mg26034611-400-is-the-speed-of-light-in-high-gravity-different-from-in-low-gravity/> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)

⁴² <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Einsteinium#section=Description> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)

⁴³ [https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Exemplars_and_Case_Studies/Case_Studies/Nuclear_Energy_for_Today%27s_World/02._Discovery_of_the_Neutron_\(1932\)](https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Exemplars_and_Case_Studies/Case_Studies/Nuclear_Energy_for_Today%27s_World/02._Discovery_of_the_Neutron_(1932)) (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)

⁴⁴ Al Khalili, Jim. *The physics book: Big ideas simply explained*. London, Dorling Kindersley Limited, 2020, str. 242, 243.



Slika 9: Rutherfordov eksperiment sipanja z zlato folijo in delci α

6. Eksperiment

V naravi so snovi, ki oddajajo ionizirajoče sevanje, vseprisotne, vendar je nevarnost le-teh minimalna. Celotna flora in favna se verjetno ne bi nikoli razvila brez sevanja iz vesolja, ki je poskrbelo za genetsko raznolikost med osebki in je še danes gonilna sila evolucije, saj delci ionizirajočega sevanja spreminjajo sestavo molekul DNK, ki napovejo izgled in lastnosti organizmov. Brez ionizirajočega sevanja in radioaktivnega razpada na Zemlji ne bi mogli opravljati običajnih dejavnosti. Ko poleti odidemo na morje in se grejemo na toplem Soncu, nam sončenje omogoča nešteto jedrskih reakcij vodika znotraj Sonca, ki nam energijo dovaja v obliki toplote in svetlobe. Tudi paleontologije in arheologije ne bi poznali brez naravne radioaktivnosti, ki je določevalni ključ za določanje starosti neke najdbe s pomočjo naravnega radioaktivnega izotopa ogljika C^{14} . Z njim lahko do desetletja natančno dokažemo starost biološkega vzorca. Pri otroških zabavah so helijevi baloni z različnimi motivi risanih junakov nepogrešljivi, pa vendar tudi ti ne bi obstajali brez ionizirajočega sevanja, saj je skoraj ves helij v ozračju nastal ob jedrskem razpadu uranove rude, ki sprošča helijeva jedra v obliki delcev α .

6.1 Merjenje z Geiger-Müllerjevim števcem

Eksperimentalni del moje raziskave predstavlja merjenje naravnega ionizirajočega sevanja izbranih predmetov iz vsakdanjega življenja. Uporabil sem naslednje vire ionizirajočega sevanja: desertne krožnike iz uranovega stekla, uro, ki ima številčnico in kazalce prevlečene s svetilno barvo z radijem, starinski z uranom glaziran servirni krožnik iz 30-ih let 20. stoletja, mešano uranovo rudo, mrežico plinske svetilke s torijevim dioksidom, varilno elektrodo z 2 % torija, s kalijem obogateno gnojilo, brazilske oreščke in upepeljen bananin olupek. Večino predmetov sem našel doma, na spletnih straneh za starine, nekatere so mi podarili sorodniki, uranovo rudo pa sem kupil na ameriški spletni strani United Nuclear, ki dobavlja razne kemikalije in laboratorijsko opremo. Preden sem izvedel eksperiment z radioaktivnimi snovmi, sem se zavedal, da so te snovi lahko nevarne za zdravje, če z njimi ne rokujemo pravilno. Vsi ti predmeti so k sreči zaprti vir ionizirajočega sevanja, nizko radioaktivni in niso zdravstveno ogrožajoči. Eksperiment sem varno izvedel s pomočjo jedrskih strokovnjakov na ICJT IJS, ki so poskrbeli za mojo varnost in mi pripravili merilnik (Geigerjev-Müllerjev števec). Pri meritvi sem uporabil Geiger-Müllerjev števec znamke MiniTrace. Meritve virov ionizirajočega sevanja iz vsakdanjega življenja sem izrazil v enotah CPS in $\mu\text{Sv/h}$. Po izvedenih meritvah sem odštel sevanje iz ozadja, ki sem ga izmeril v prostoru in je bilo 1,5 CPS oz. $0,17 \mu\text{Sv/h}$, da sem dobil zgolj vrednost vira ionizirajočega sevanja.

Pričakoval sem, da bo ura, ki ima številčnico in kazalce prevlečene s svetilno barvo z radijem, najbolj radioaktiven predmet izmed vseh virov, vendar se je izkazalo, da je starinski z uranom glaziran krožnik najbolj radioaktiven vir v enoti CPS (1098 CPS), v enoti $\mu\text{Sv/h}$ pa je uranova ruda najbolj radioaktivna s $4,68 \mu\text{Sv/h}$. Po znamki ure z radijem sem ugotovil, da je ura stara več kot 100 let in je temu primerno tudi manj radioaktivna, saj se je večina barvila na kazalcih odluščila. Ura z radijem je merila 48,5 CPS oz. $0,51 \mu\text{Sv/h}$, kar je povišana doza, a kljub temu je ura dovolj varna, da jo vsakodnevno uporabljamo.

Desertni krožniki iz uranovega stekla so značilno zelene barve in zasvetijo pod UV-svetlobo. Pri njih sem izmeril 0,5 CPS ali $0,15 \mu\text{Sv/h}$, kar so normalne vrednosti in so zato dovolj varni, da bi na njih postregli hrano. Eden izmed razlogov, zakaj so krožniki tako nizko radioaktivni, je, da je bila količina urana za izdelavo teh krožnikov zares majhna.

Mrežica za plinske svetilke ima premaz iz torijevega dioksida, ki je radioaktivna spojina in je bila nekoč uporabljena za povečanje bele svetlobe plinskih svetilk. Pri mrežici za plinske svetilke sem nameril 798,5 CPS oz. 2,36 $\mu\text{Sv/h}$, kar je bilo veliko več, kot sem pričakoval pred meritvami.

Uranova ruda je pretežno β in γ vir ionizirajočega sevanja, uranova ruda pa poleg urana vsebuje še radij, torij, polonij in ostale radioaktivne elemente. Pri uranovi rudi sem nameril 283,5 CPS oz. 4,68 $\mu\text{Sv/h}$, kar sem pričakoval, saj je uranova ruda mešanica naravnih radionuklidov, od katerega so nekateri močno radioaktivni.

Varilna elektroda z 2 % torija je imela vrednost 6,5 CPS oz. 0,67 $\mu\text{Sv/h}$, kar je bilo veliko manj, kot sem pričakoval, saj sem mislil, da mrežica za plinske svetilke vsebuje manj torija kot varilne elektrode. Še danes se take elektrode najdejo v nekaterih delavnicah, vendar so prešle iz uporabe, saj so torij zamenjali s cenejšim ogljikom in bakrom. Vseeno pa so dovolj varne, da jih lahko uporabljamo za varjenje. Umetno gnojilo se je med viri ionizirajočega sevanja znašlo zaradi visoke vsebnosti kalija, od katerega je majhen delež tudi radioaktiven (K-40), prav tega sem meril z Geiger-Müllerjevim števcem. Nameril sem 0,5 CPS oz. 0,11 $\mu\text{Sv/h}$, kar sem tudi pričakoval, saj je delež radioaktivnega kalija K-40 v gnojilu izredno majhen.

Brazilski oreščki so bogati tako z radioaktivnim kalijem kot z radionuklidi iz prsti, saj imajo drevesa, na katerih rastejo oreščki, globoke korenine, s katerimi črpajo naraven uran in torij iz tal. Pri brazilskih oreščkih sem nameril enako količino ionizirajočega sevanja kot pri upepeljeni banani, kar je 0,1 CPS oz. 0,01 $\mu\text{Sv/h}$.

Bananin olupek sem pred meritvami s plinskim gorilnikom upepelil, s tem postopkom sem odstranil vodo in večino organskih spojin. Kar je ostalo od olupka, so bili zgolj ogljik in minerali, izmed katerih je v največjem deležu prisoten kalij. Zelo majhen delež kalija je K-40, ki je radioaktiven. Nameril sem 0,1 CPS oz. 0,01 $\mu\text{Sv/h}$, zato sem meril zgolj sevanje iz ozadja. To pomeni, da banane in brazilski oreščki niso radioaktivni, razlog za to je, da sem za eksperiment uporabil zelo majhne količine obeh plodov, delež K-40 pa je bil očitno izredno nizek. Banane so naravno radioaktivne, a so tako nizko radioaktivne, da jih lahko uživamo.



Slika 10: Geiger-Müllerjev števec MiniTrace in dvodelni Geiger-Mullerjev števec s sondo



Slika 11: Merjenje ionizirajočega sevanja radijeve ure

Tabela 1: Meritve virov ionizirajočega sevanja brez upoštevanja sevanja iz ozadja v obeh enotah

VIR IONIZIRAJOČEGA SEVANJA	MERITEV 1 [CPS]	MERITEV 2 [μ Sv/h]
Desertni krožnik iz uranovega stekla	2	0,32
Ura, ki ima številčnico in kazalce prevlečene s svetilno barvo z radijem	50	0,51
Starinski z uranom glaziran servirni krožnik	1100	2,72
Mešana uranova ruda	285	4,85
Mrežica za plinske svetilke s torijevim dioksidom	800	2,53
Varilna elektroda z 2 % torija	8	0,84
Umetno gnojilo	2	0,28
Brazilski oreščki	1,6	0,18
Upepeljen bananin olupek	1,6	0,18

Tabela 2: Meritve virov ionizirajočega sevanja z upoštevanjem sevanja iz ozadja v obeh enotah (1,5 CPS oz. 0,17 $\mu\text{Sv/h}$)

VIR IONIZIRAJOČEGA SEVANJA	MERITEV 1 – SEVANJE IZ OZADJA [CPS]	MERITEV 2 – SEVANJE IZ OZADJA [$\mu\text{Sv/h}$]
Desertni krožnik	0,5	0,15
Ura, ki ima številčnico in kazalce prevlečene s svetilno barvo z radijem	48,5	0,34
Starinski z uranom glaziran servirni krožnik	1098,5	2,55
Mešana uranova ruda	283,5	4,68
Mrežica plinske svetilke s torijevim dioksidom	798,5	2,36
Varilna elektroda z 2 % torija	6,5	0,67
Umetno gnojilo	0,5	0,11
Brazilski oreščki	0,1	0,01
Upepeljen bananin olupek	0,1	0,01

6.2. Meritve z merilnikom za radon

Opravil sem še en eksperiment, ki sem ga izvajal z merilnikom za radon, ki je po sestavi podoben Geiger-Müllerjevemu števcu. Ta meri ionizirajoče sevanje delcev α , ki ga oddajajo radon in njegovi razpadni produkti. Merilnik za radon se brez posebnih dovoljenj lahko izposodi na Upravi RS za varstvo pred sevanji. Opravil sem meritve na naslednjih mestih: v svoji sobi, v zaprti domači kurilnici, v kleti sorodnikov in v šolskem zaklonišču. Merilnik za radon sem postavil tudi v zaprto posodico z uro, ki ima na kazalcih premaz iz radija. Radon je plin brez vonja, barve in okusa, ki oddaja ionizirajoče sevanje v obliki delcev α , ki ob dolgotrajnem vdihavanju zraka, bogatega z njimi, povzročijo pljučnega raka in so drugi glavni krivec za tobačnimi izdelki, ki povzročajo raka na dihalih. Glavni problem ni radon, vendar njegovi razpadni

produkti, ki so trdni delci in ob vstopu v pljuča oddajajo veliko ionizirajočega, s čimer tvegamo povečano možnost respiratornih rakavih obolenj.

Radon sem meril z merilnikom za radon znamke Airthings. Meritve sem v različnih prostorih izvajal sedem dni, merilnik pa je sam izračunal povprečje vsebnosti radona. Največjo količino ionizirajočega sevanja radona sem nameril v zaprti posodi z radijevo uro, kot sem pričakoval. Ker radij na urinih kazalcih razpada v radon, sem sklepal, da iz posode ne bi mogel ulti, saj sem posodo tesno zaprl. Nameril sem 10.000 Bq/m^3 , kar pomeni 10 000 jedrskih razpadov radona na kubik zračne mase. To so zares velike količine radona, saj je bila posoda tesno zaprta.

V domači kurilnici sem v delu s cisterno za kurilno olje, ki nima oken in je vedno zaklenjena, tla pa so premazana z umetno neprepustno maso, sklepal, da bo količina radona visoka. V hiši, zgrajeni v 80-ih letih 20. stoletja, sem izmeril 1040 Bq/m^3 , kar je že visoka vrednost, ki presega 300 Bq (mejna vrednost radona v prostorih). Kljub temu je domača kurilnica v pritličju, bivalni prostori pa so nadstropje višje, zato radon ne doseže bivalnih prostorov. Morda k temu prispeva tudi to, da je hiša sezidana na skalnatem področju.

V šolskem zaklonišču sem izmeril 870 Bq/m^3 , kar je povišana vrednost za podzemne prostore. Sklepal sem, da bo vrednost visoka, saj se zaklonišča ne zrači redno in je podzemen prostor. Vrednost radona v šolskem zaklonišču je visoka, vendar nima vpliva na zdravje zaposlenih in učencev, saj se v zaklonišču dalj časa ne zadržuje nihče in je namenjen zgolj shranjevanju. V moji sobi, ki se nahaja v drugem nadstropju hiše sem izmeril 90 Bq/m^3 , kar je običajno za notranje prostore, ki jih obseva kozmično sevanje. Za mojo sobo nisem pričakoval visokih vrednosti, ker se redno zrači in se nahaja v drugem nadstropju, daleč od tal.

V starejši hiši moje prababice (zgrajene v 60-ih letih 20. stoletja) sem bil prepričan, da bodo vrednosti najvišje za kletne prostore, saj je klet vkopana v zemljo, vendar sem bil presenečen, ker so bile vrednosti neizmerno nizke (50 Bq/m^3). Sprva sem bil prepričan, da je merilnik za radon napačno meril, zato sem sedemdnevno meritve ponovil. Moja prababica je po meritvah ugotovila, da okna niso dobro zatesnjena, zato se je prostor ves čas zračil. Verjetno je k nižjim meritvam prispevalo tudi dejstvo, da hiša stoji na laporju ob potoku.

Tabela 3: Meritve radona v prostorih v enoti Bq/m³

KRAJ MERITVE	MERITEV [Bq/m ³]
Šolsko zaklonišče	870
Domača kurilnica	1040
Klet prababice	50
Moja soba	90
Zaprta posoda z radijevo uro	10 000

7. Razprava

Po končani raziskavi sem preveril hipoteze.

1. Na splošno je ionizirajoče sevanje za človeka izredno nevarno in je lahko že ob manjši izpostavljenosti usodno zanj.

Prva hipoteza ne drži, saj je naravno ionizirajoče sevanje neškodljivo za zdravje organizmov in v običajnih okoliščinah. To seveda ne velja za umetne vire ionizirajočega sevanja, ki so veliko bolj nevarni in nastajajo zgolj v jedrskih reaktorjih in pospeševalnikih delcev. Izpostavljenost radonu v velikih količinah bi lahko povzročila nastanek pljučnega raka samo v daljšem časovnem obdobju, ki lahko traja do deset let, oseba pa bi v prostoru z velikimi količinami radona občutila bolečine v prsih, kašljanje in bljuvanje krvavih izcedkov.

2. Naravno ionizirajoče sevanje ni zelo močno in smo mu vsakodnevno izpostavljeni s hrano in pijačo, plinom radonom ter iz vesolja, kjer na naš planet ves čas vpadajo delci, ki so posledica vesoljskih aktivnosti.

Druga hipoteza drži, saj je naravno ionizirajoče sevanje v naravi povsod prisotno. To je t. i. sevanje iz ozadja in je neizogibno. Na naš planet – Zemljo vedno vpadajo kozmični žarki, ki so posledica aktivnosti Sonca in ogromnih trkov nebesnih teles. Poleg kozmičnih žarkov so organizmi naravno izpostavljeni radionuklidom iz prsti in vode, ki v telo vstopajo s prehranjevanjem. Pomemben vir ionizirajočega sevanja je tudi plin radon in ionizirajoče sevanje iz tal.

3. Večino letne doze prejmemo s strani jedrskih elektrarn, ki so zelo nevarne zaradi vsakodnevnih izpustov radioaktivnih snovi in proizvodnje jedrskih odpadkov.

Tretja hipoteza ne drži, saj največjo letno dozo prebivalstva predstavlja umetno ionizirajoče sevanje medicinskih virov, npr. rentgensko slikanje in seveda sevanje iz ozadja, ki se mu ne moremo izogniti.

4. Ob meritvi predmetov iz vsakdanjega življenja, ki oddajajo ionizirajoče sevanje bom največjo količino ionizirajočega sevanja nameril pri uri, ki ima številčnico in kazalce prevlečene z svetilno bravo z radijem, najmanj pa pri upepeljeni banani.

Četrta hipoteza delno drži. Ura, ki ima številčnico in kazalce prevlečene s svetilno bravo z radijem, je stara več kot 100 let, zato je večina radijevega premaza na kazalcih odpadla in zato je bila tudi ura veliko manj radioaktivna. Ura je v obeh uporabljenih enotah merila 48,5 CPS ali 0,34 $\mu\text{Sv/h}$. Najbolj radioaktiven je bil z uranom glaziran krožnik v enoti CPS (1098 CPS), v enoti $\mu\text{Sv/h}$ pa uranova ruda z 4,68 $\mu\text{Sv/h}$. Pri obeh predmetih sem meril vse tri tipe ionizirajočega sevanja: α , β in γ žarke, pri radijevi uri pa le α in γ žarke. Po mojih pričakovanjih sta bila najmanj radioaktivna vira ionizirajočega sevanja upepeljen bananin olupak in brazilski oreščki, v obeh enotah sem izmeril 0,1 CPS oz. 0,01 $\mu\text{Sv/h}$. Pri upepeljenem bananinem olupku in brazilskih oreščkih sem meril radioaktiven izotop kalija K-40, ki se v največjih količinah nahaja v bananah in oreščkih. Za tako nizke vrednosti meritev je prispevala majhna količina obeh virov in dejstvo, da sta oba vira ionizirajočega sevanja nizko radioaktivna. Tako sta povsem varna za prehranjevanje.

5. Največ plina radona v prostoru bom nameril v kleti moje prababice, saj je klet že stara in je zaprt prostor, kjer se radon kopiči v večjih količinah, prostora pa se ne zrači. Najmanj ga bom izmeril v moji sobi, saj se nahaja v drugem nadstropju, daleč od tal in se pogosto zrači.

Peta hipoteza ne drži, saj sem nepričakovano izmeril neobičajno nizke vrednosti radona, zato sem sedemdnevno meritev ponovil. Pričakoval sem izjemno visoke vrednosti radona, saj se klet prababice ne zrači in je polna razpok, skozi katere bi lahko v klet uhajal radon. Izmeril sem le 50 Bq/m³, kar je najnižja izmerjena vrednost in je enaka količini radona na prostem. Razlog zato je bilo slabo zatesnjeno okno, zato se je klet ves čas zračila. Vzrok za tako nizko meritev je bil tudi to, da je hiša zgrajena na laporju ob potoku. Največjo vrednost radona sem po pričakovanjih izmeril v zaprti posodi z radijevo uro. Sklepal sem, da radijev premaz na kazalcih ure razpada v radon, ki pa v zaprti posodi ne bi mogel uiti na prosto. Izmeril sem 10 000 Bq/m³, kar je visoka vrednost.

6. Največja odkritja v jedrski fiziki smo dobili v zadnjih stotih letih.

Šesta hipoteza drži, saj so bili rentgenski žarki odkriti leta 1895, od tega pa mineva že 130 let. Rentgenske žarke je nenačrtovano odkril Wilhem Rontgen, ko je v katodno cev vstavil kovinsko antikatodo, ki je proizvedla žarke, ki so prehajali skozi večino materialov. Tako so čez nekaj let izumili rentgen, ki je osnovni pripomoček sodobne medicine. Henri Becquerel je leto kasneje na filmski negativ postavil zrnca uranove soli, nakar so se pojavile nenavadne temne lise. Sklepal je, da gre za nov naravni pojav, ki ga je Marie Curie kasneje poimenovala radioaktivnost. Marie Curie je z možem iz uranove rude izolirala do takrat neznana radioaktivna elementa: polonij in radij. Ernest Rutherford je s poskusom sipanja z zlato folijo odkril atomsko jedro, ki mu je določil pozitivno nabite delce protone in negativno nabite elektrone, ki okoli jedra krožijo po tirnicah. James Chadwick je leta 1932 odkril nevtralnno nabite delce – nevtrone. Proizvedel jih je z obstreljevanjem berilijeve folije z delci α , ki so iz berilija odbili nevtrone. Ti gradniki atomov so nevtralni v elektromagnetnem polju, zato nevtroni nimajo naboja. Tako so fiziki nepopolnemu modelu atoma poleg protonov v jedru dodali še nevtrone. V naslednjem desetletju pa so fiziki in kemiki poskrbeli, da jedrska fizika ni ostala zgolj v laboratorijih, temveč je postala vir električne energije.

8. Zaključek

Na začetku raziskovalne naloge sem si zastavil cilj, da potrdim, da je naravno ionizirajoče sevanje v vsakdanjih količinah nenevarno in povsem običajno. Danes mediji v javnosti širijo dezinformacije o tej temi in javnost vedno manj zaupa jedrski fiziki, saj se jo družba na nek način boji. Ta raziskovalna naloga lahko prepriča ljudi, da je sevanje nekaj povsem običajnega, brez njega ne bi poznali sodobnega načina življenja. Ionizirajoče sevanje se drži znanega slovenskega pregovora, da je ogenj dober služabnik, a slab gospodar. Tudi ionizirajoče sevanje je v medicini uporabno pri zdravljenju rakavih obolenj, lahko pa seje uničenje, ki ga človeštvo ni prej nikoli poznalo v obliki jedrskega orožja. V eksperimentu sem potrdil, da so vsi radioaktivni viri iz vsakdanjega življenja povsem varni za uporabo, ker vsebujejo le manjše količine teh snovi in tudi ob dolgoročni uporabi nimajo vpliva na zdravje ljudi. Vrednosti radona v prostorih šole, doma in v kleti moje prababice so se izkazale za zmerne. Razlog zato je kvalitetna uporaba materialov pri gradnji podzemnih prostorov in geološka zgradba tal, v katero je prostor vkopan. Geiger-Müllerjev števec ima tudi določene omejitve pri merjenju ionizirajočega sevanja, saj meri zgolj prisotnost in količino delcev, ki je vstopila v Geiger-Müllerjevo cev, ne more pa izmeriti energije teh delcev. Možnost nadaljnjih raziskav bi bil lahko eksperiment z meglično celico, ki je preprost detektor delcev. Deluje na zelo nizko temperaturo ohlajen suhi led in gobo nasičeno z izopropilnim alkoholom, ki posledično oddaja hlape. Ti hlapi pod zelo nizko temperaturo poskušajo zmrzniti, vendar jim pot prekrizajo α in β delci. Ko delec s hlapi reagira, za seboj pusti sled bele barve. Na tak način so fiziki odkrili različne vrste delcev npr. nevtrone in nekatere kvante. Meglična celica nam na kratko povedano omogoča, da žarke sevanja vidimo s prostim očesom in njihovo energijo ter vrsto delcev razlikujemo po obliki sledi, ki jo za seboj pustijo. Eksperiment z viri ionizirajočega sevanja bi lahko dopolnil tako, da bi vse te vire postavil v meglično celico in opazoval kakšne sledi se pojavljajo v njihovi bližini. Tako bi lahko izvedel, kakšno energijo imajo žarki tega vira, pa tudi vrsto ionizirajočega sevanja, delce pa bi lahko videl s prostim očesom.

8. Viri in literatura

8.1 Spletni viri

1. <https://www.energy.gov/science/np/nuclear-physics> (pridobljeno dne: 3. 11. 2024)
2. <https://physics.uiowa.edu/research/nuclear-and-particle-physics> (pridobljeno dne: 3. 11. 2024)
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_physics (pridobljeno dne: 3. 11. 2024)
4. <https://www.britannica.com/science/physics-science/Nuclear-physics> (pridobljeno dne: 3. 11. 2024)
5. <https://www.britannica.com/science/neutron> (pridobljeno dne: 4. 11. 2024)
6. <https://www.space.com/protons-facts-discovery-charge-mass> (pridobljeno dne: 4. 11. 2024)
7. <https://byjus.com/chemistry/isotopes-of-hydrogen/> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)
8. <https://www.vedantu.com/physics/magic-number> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)
9. https://radioactivity.eu.com/articles/phenomenon/radioactive_series (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)
10. <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/z3tb8mn/revision/3> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)
11. <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/alpha-particles> (pridobljeno dne: 29. 11. 2024)
12. <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/beta-particle> (pridobljeno dne: 29. 11. 2024)
13. http://icrpaedia.org/Absorbed_Equivalent_and_Effective_Dose (pridobljeno dne 7. 12. 2024)
14. <https://www.nea.gov.sg/our-services/radiation-safety/understanding-radiation/health-effects-of-ionising-radiation-on-people> (pridobljeno dne: 7. 12. 2024)
15. <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/health/health-effects-chernobyl-accident/> (pridobljeno dne: 7. 12. 2024)
16. https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger_counter (pridobljeno dne: 6. 10. 2024)
17. <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/science-101/what-is-a-geiger-counter.html> (pridobljeno dne: 6. 10. 2024)
18. <https://help.airthings.com/en/articles/3119863-radon-charcoal-testing-vs-airthings-accuracy> (pridobljeno dne: 18. 10. 2024)
19. <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/URSVS/Navodila-za-uporabo-merilnika-radona.pdf> (pridobljeno dne: 18. 10. 2024)
20. <https://www.airthings.com/resources/radon-detector> (pridobljeno dne: 18. 10. 2024)
21. <https://www.zvd.si/sevanje-in-dozimetrija/radon/> (pridobljeno dne: 18. 10. 2024)
22. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-12/documents/radon-22-decay-chain.pdf> (pridobljeno dne: 25. 10. 2024)
23. <https://www.nobelprize.org/womenwhochangedscience/stories/marie-curie> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)
24. <https://www.khanacademy.org/science/chemistry/atomic-structure-and-properties/history-of-atomic-structure/a/discovery-of-the-electron-and-nucleus> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)
25. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Chemistry_for_Changing_Times_\(Hill_and_McCreary\)/03%3A_Atomic_Structure/3.04%3A_Rutherford%27s_Experiment-_The_Nuclear_Model_of_the_Atom](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Chemistry_for_Changing_Times_(Hill_and_McCreary)/03%3A_Atomic_Structure/3.04%3A_Rutherford%27s_Experiment-_The_Nuclear_Model_of_the_Atom) (pridobljeno dne: 15.11. 2024)
26. https://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford#Early_life_and_education (pridobljeno dne: 15.11. 2024)
27. <https://study.com/academy/lesson/theory-of-relativity-definition-example.html> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)
28. <https://www.newscientist.com/lastword/mg26034611-400-is-the-speed-of-light-in-high-gravity-different-from-in-low-gravity/> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)
29. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Einsteinium#section=Description> (pridobljeno dne: 15. 11. 2024)
30. [https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Exemplars_and_Case_Studies/Case_Studies/Nuclear_Energy_for_Today%27s_World/02._Discovery_of_the_Neutron_\(1932\)](https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Exemplars_and_Case_Studies/Case_Studies/Nuclear_Energy_for_Today%27s_World/02._Discovery_of_the_Neutron_(1932)) (pridobljeno dne: 15.11. 2024)

8.2 Literatura

1. Wahlstrom, Bjorn: Spoznajmo radioaktivnost. Ljubljana, Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije, 2000.
2. Bilban, Tina: Čudni kvantni svet. Dob, Založba Miš, 2021.
3. Al Khalili , Jim: The physics book: Big ideas simply explained. London, Dorling Kindersley Limited, 2020.
4. Kladnik, Rudolf: Fizika za srednješolce 3, svet elektronov in atomov. Ljubljana, DZS, 2004.
5. Istenič, Radko: Mala enciklopedija jedrske energije. Ljubljana, samozaložništvo, 2013.
6. Dixon, Gail, Parsons, Paul: Periodni sistem: terenski vodnik po elementih. Ljubljana, založba Modrijan, 2014.
7. Staguhn, Gerhard: V iskanju najmanjšega delca sveta. Tržič, založba Učila, 2002.

8.3 Viri slik

Slika 1: Jenčič, Igor. Jedrska fizika. Ljubljana, ICJT Milana Čopiča IJS, 2023.

Slika 2: Wahlstrom, Bjorn. Spoznajmo radioaktivnost. Ljubljana, Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije, 2000.

Slika 3: <https://study.com/academy/lesson/alpha-decay-definition-equation-example.html>
(pridobljeno dne: 14. 12. 2024)

Slika 4: https://www.radioaktivnost.si/rvo_public/RVO/BasicInformation (pridobljeno dne: 27. 12. 2025)

Slika 5: <https://www.biorender.com/template/effective-radiation-dose> (pridobljeno dne: 9. 1. 2025)

Slika 6: <https://www.imagesco.com/nuclear-science/geiger-counter/experiment-3.html>
(pridobljeno dne: 16. 1. 2025)

Slika 7: <https://www.airthings.com/home> (pridobljeno dne: 16. 1. 2025)

Slika 8: <https://www.thenavagepatch.com/radon-your-uninvited-unseen-unwanted-house-guest/>
(pridobljeno dne 20. 1. 2025)

Slika 9: <https://www.vrlabacademy.com/en/Blog/ExperimentsThatChangedRutherford>
(pridobljeno dne: 20. 1. 2025)

Slika 10: Osebni arhiv (22. 1. 2025)

Slika 11: Osebni arhiv (22. 1. 2025)