



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI  
FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU



# Analiza nuklearnog materijala nedestruktivnom metodom nuklearne forenzike

-*Master rad-*

Mentor: dr Jovana Nikolov

Kandidat: Mladen Babić

Novi Sad, 26. septembar 2018.

*Ovom prilikom bih želeo da se zahvalim mentoru dr Jovani Nikolov na svesrdnoj pomoći i korisnim sugestijama. Takođe, zahvalio bih se i kolegama iz laboratorije za nuklearnu forenziku u Budimpešti (KFKI) na odvojenom vremenu, strpljenju i korisnim savetima pri izradi ovog rada.*

# Sadržaj

<b>1. Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Nuklearna forenzika .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Pretnje po nuklearnu bezbednost.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Međunarodne organizacije koje se bave nuklearnom forenzikom (ITWG, GICNT, PSI) .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.1 ITWG.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2.2 GICNT.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.3 PSI.....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Nacionalna nuklearna bezbednost države.....</b>	<b>7</b>
<b>2.3.1 Sastanci o nuklearnoj bezbednosti .....</b>	<b>8</b>
<b>2.4 IAEA baza podataka o incidentima koji su ugrozili nuklearnu bezbednost.....</b>	<b>9</b>
<b>2.5 Nuklearna forenzika: ciljevi i primene.....</b>	<b>9</b>
<b>2.6 Kategorizacija i karakterizacija nuklearnog materijala .....</b>	<b>11</b>
<b>2.7 "Tragovi" u nuklearnoj forenzici.....</b>	<b>12</b>
<b>2.7.1 Fizičke karakteristike - dimenzija, masa, gustina, boja, mikrostruktura, morfologija.....</b>	<b>12</b>
<b>2.7.2 Izotopska merenja – radionuklidi, stabilni izotopi, potomci.....</b>	<b>13</b>
<b>2.7.3 Hemijska merenja – hemijska forma i hemijske osobine.....</b>	<b>14</b>
<b>2.7.4 Elementalna merenja – metalične nečistoće, retki i drugi elementi .....</b>	<b>15</b>
<b>2.8 Radiološko mesto zločina.....</b>	<b>15</b>

<b>3. Dozimetrija i gama spektrometrija .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Jonizujuće zračenje .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1.1 Naelektrisane čestice.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.2 Gama zračenje.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1.2.1 Fotoelektrični efekat .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.2.2 Komptonovo rasejanje .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1.2.3 Efekat stvaranja parova .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1.2.4 Atenuacioni koeficijent u funkciji energije.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Dozimetrija .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.1 Ekspoziciona doza .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.2 Apsorbovana doza.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.3 Ekvivalentna doza.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 Principi detekcije gama zračenja .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.1 Scintilacioni detektori.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.2 Poluprovodnički HPGe detektori .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4 In-situ gama sprekrometrija .....</b>	<b>43</b>
<b>4. Nuklearni materijali .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1 Uranijum .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2 Plutonijum.....</b>	<b>48</b>
<b>5. Eksperimentalni deo .....</b>	<b>51</b>
<b>5.1 Detektori .....</b>	<b>51</b>
<b>5.2 Određivanje starosti nuklearnog materijala .....</b>	<b>54</b>
<b>5.3 Izotopski sastav materijala.....</b>	<b>57</b>
<b>5.4 Uzorak "LDFFVL" .....</b>	<b>59</b>
<b>5.5 Diskusija.....</b>	<b>65</b>
<b>6. Zaključak .....</b>	<b>66</b>

<b>7. Literatura.....</b>	<b>67</b>
<b>8. Biografija .....</b>	<b>69</b>

# 1. Uvod

Kao relativno mlada naučna disciplina, nuklearna forenzika predstavlja vid upotrebe saznanja i veština iz oblasti nuklearne fizike u cilju ispomoći državnih organa u kriminalističkim istragama. Kao podgrana nauke o forenzici, nuklearna forenzika teži da otkrije vezu između mesta, ljudi, stvari i događaja analizirajući fizičke, hemijske i elementalne izotopske podatke koji su trajno zabeleženi na svakom nuklearnom materijalu.

Kako je u poslednjih nekoliko decenija interes za nuklearnom energijom naglo porastao, tako je i veći broj ljudi dolazio u kontakt sa radioaktivnim materijalom. Nažalost, sa ogromnim prednostima koje istraživanja u oblasti nuklearne energije donose, one takođe donose i brojne rizike: krijućarenje nuklearnog materijala (a samim tim i neplanirana ekspozicija), konstrukcija nuklearnog oružja, itd. Iz ovih razloga se baš i razvila potreba za disciplinom koja bi vršila monitoring nuklearne bezbednosti jedne države.

Najčešće korišćene metode nuklearne forenzičke su: gama spektrometrija, neutronska detekcija, masena spektrometrija, retrospektivna dozimetrija, elektronska mikroskopija, neutronska tomografija itd.

Gama-spektrometrija se ističe kao jedina nedestruktivna metoda koja se široko koristi za analizu nuklearnog ili drugog radioaktivnog materijala koji ne podleže regulatornoj kontroli. Zbog relativno kratkog vremena merenja koje je neophodno da se dođe do preliminarnih informacija o samom uzorku, ova metoda se uvek koristi kao primarna za karakterizaciju nuklearnog materijala.

Tema ovog rada je bila da se gama-spektrometrijskim merenjima uz odgovarajuću analizu odredi starost nuklearnog materijala što bi bilo korisno za dalje utvrđivanje njegovog porekla. Eksperimentalni deo ovog rada urađen je u saradnji sa laboratorijom za nuklearnu forenziku u Budimpešti (KFKI), koja je i regionalni IAEA (Međunarodna atomska agencija) trening centar za oblast nuklearne forenzičke.

Za potrebe ovog rada analiziran je uzorak nuklearnog materijala – određena je njegova starost na osnovu odnosa aktivnosti različitih izotopa uranijuma i procenjen je izotopski sastav. Proračuni obe metode se zasnivaju na metodi relativne kalibracione efikasnosti.

Gama-spektrometrijska metoda se pokazala kao relativno pouzdana za ovu vrstu analize, iako postoji i precizniji metod određivanja starosti nuklearnog materijala (ICP-MS).

## 2. Nuklearna forenzika

Cilj ovog poglavlja je postavljanje nauke o nuklearnoj forenzici u širi kontekst globalnih nuklearnih bezbednosnih rizika, kao i pristupanje legalnim aspektima ovog domena pozivajući se na postojeće međunarodne grupe. Takođe, u daljem tekstu se nudi pregled literature o obimu, primenama i osnovnim elementima nuklearne forenzičke.

### 2.1 Pretnje po nuklearnu bezbednost

Brojne primene nuklearne energije su dovele do povećanja količine opasnih i radioaktivnih materijala, nuklearnih instalacija, nuklearne opreme kao i broja zemalja koje ih poseduju. Kao rezultat toga, rizik neautorizovanog posedovanja i ilegalnog upotrebljavanja nuklearnih materijala i radioaktivnih izvora za kriminalne ili terorističke akte se povećao. Nuklearni i radioaktivni materijali koji se koriste u mirnodopske svrhe poseduju ogroman destruktivni potencijal, radiološku opasnost i visoku toksičnost. Zbog toga je nužno povećati fizičku zaštitu ovih materijala protiv upotrebe u kriminalne svrhe. Neautorizovano posedovanje i ilegalno trgovanje nuklearnim materijalima može biti uzrok opasnostima povezanim za globalnu proliferaciju, te samim tim predstavljaju rizik ne samo za ljudsko zdravlje i bezbednost populacije, već se takođe mogu upotrebiti za konstrukciju jednostavnih nuklearnih eksplozivnih uređaja<sup>1</sup> [1].

Nuklearno krijumčarenje je jedno od glavnih izazova kojima se internacionalna zajednica mora pozabaviti budući da ilegalna upotreba radioaktivnih materijala predstavlja pretnju za ceo svet. Ovo se najviše odnosi na radioaktivne materijale vezane za oružje kao što su obogaćeni uranijum i plutonijum. Ova specifična kategorija materijala je od velikog interesa ne samo zemljama koje pokušavaju da razviju tajni nuklearni program, već i terorističkim organizacijama. Samim tim, pretnja od nuklearnog terorizma je postala glavna tema diskusije internacionalnih zajednica gde se baš specijalna pažnja poklanja pretnjama koje se javljaju usled konstrukcije improvizovanih nuklearnih eksplozivnih uređaja i radioloških disperzionih uređaja.

Na današnjem globalnom nivou, sve više i više napora bi trebalo da se uloži u prevenciju, detekciju i adekvatni odgovor svih zemalja na datu nuklearnu pretnju. Prema definiciji IAEA, nuklearna pretnja je: "Osoba ili grupa ljudi sa namerom i sposobnostima za počinjavanje kriminalnog akta povezanog sa nuklearnim

---

<sup>1</sup> Najpovoljniji geometrijski oblik za izradu improvizovanog eksplozivnog uređaja koji zahteva najmanju količinu specijalnog nuklearnog materijala je sfera.

materijalima i drugim radioaktivnim materijalima. Takođe, bilo koji pripadajući objekti ili povezane aktivnosti za koje država smatra da imaju negativan uticaj na nuklearnu bezbednost se smatraju pretnjama".

Dobro je poznato da terorističke organizacije imaju interesa u nabavljanju nuklearnog i radioaktivnog materijala za izgradnju uređaja koji može da izazove katastrofalne posledice za populaciju jedne države. Teroristički napad koji uključuje upotrebu nuklearnog ili radioaktivnog materijala se može predstaviti kao lanac događaja predstavljenih na sledećoj listi:

- 1.** Planiranje i uključivanje ljudi u akciju
- 2.** Nabavljanje i sabotaža nuklearnog materijala
- 3.** Izgradnja nuklearnog uređaja
- 4.** Transportacija uređaja do lokacije od interesa
- 5.** Detonacija uređaja

Uspešan sled ovih koraka može dovesti do napada na nuklearnu bezbednost koja obuhvata sabotažu nuklearnog ili radiološkog postrojenja, sabotažu ili krađu dostave radioaktivnog nuklearnog materijala, krađu RED, RDD i IND uređaja, kontaminaciju hrane, vode i vazduha i sl. Svi ovi događaji imaju ozbiljne socijalne, ekonomске, fiziološke i zdravstvene posledice.

RED (*Radiological exposure device*) je dizajniran da uzrokuje stohastičke i/ili determinističke efekte jonizujućeg zračenja namernom ekspozicijom javnosti jonizujućem zračenju. U tom slučaju stepen opasnosti od krađe zavisi od količine i tipa radioaktivnog materijala, razdaljine i vremena provedenog od strane "žrtava" u blizini izvora. Primeri zloupotrebe ovakvog uređaja su: postavljanje radioaktivnog izvora ispod sedišta u javnom transportu, sakrivanjem aktivnog uzorka u jako populisanim područjima itd.

RDD (*Radiological dispersal device*) predstavlja radioaktivni izvor povezan sa konvencijalnim eksplozivom ili neeksplozivnim sredstvima za raspršivanje kao što su ventilacioni sistemi i sprejevi. Namena ovog uređaja je da rasprši radionuklide radi izazivanja destrukcije, štete ili povrede. Posledice RDD-a se mogu ogledati u direktnim okolnostima pri potencijalnim eksplozijama ili indirektno putem ekspozicije zračenju [2]. Za sada, ne postoji nijedan prijavljen slučaj namernog detoniranja RDD-a. Međutim, za izgradnju jednog ovakvog uređaja nije potrebno veliko znanje i iskustvo, i zapravo je veoma lako to učiniti čim se ilegalno dobavi jak radioaktivni izvor. Stoga, verovatnoća za RDD događaj ostaje visoka i zato se moraju preuzeti ozbiljne mere kako bi se ovi

događaji sprečili. Jedna od mera prevencije je implementacija strogog zavođenja i kontrole radioaktivnih izvora dostupnog u državi.

Već pomenuti IND (*Improvised nuclear device*) je uređaj napravljen od specijalnog nuklearnog materijala koji se koristi u oružiju, kakvi su obogaćeni uranijum i plutonijum, i čija je svrha da rezultuje nuklearnom detonacijom tj. nekontrolisanom nuklearnom lančanom reakcijom. Dizajniranje i pravljenje ovakvog tipa uređaja zahteva visok nivo znanja nuklearne fizike i nuklearnog inženjeringu kao i kvantitativno velika količina specijalnog nuklearnog materijala (kilogrami ili desetine kilograma). Prema tome, verovatnoća za neautorizovanim posedovanjem jednog ovakvog uređaja od strane terorističke organizacije je veoma mala. Posledice jednog uspešnog IND događaja bi bile katastrofalne. Tu bi se uključila direktna šteta od inicijalne eksplozije, široko rasprostranjena radioaktivna kontaminacija, ogromni fiziološki uticaji na populaciju itd.

Kroz istoriju je postojalo nekoliko primera kriminalnih događaja povezanih sa upotrebom nuklearnog ili radioaktivnog materijala koje je prijavila IAEA:

- ***France: La Hague reprocessing plant (1978)***

Šef je pokušao da ubije svog kolegu sa radioaktivnim diskovima koje je postavio ispod sedišta kola žrtve.

- ***Russia: Izmailovo Park Moscow (1995)***

Novinar je dobio tajnu poruku da je radioaktivno oružje sakriveno u Izmailovo parku u istočnom delu Moskve. Prateći dojavu, pronađen je kontejner sa aktivnim izvorom cezijuma-137 ( $^{137}Cs$ )

- ***Germany: WAK- small scale reprocessing plant in Karlsruhe (2001)***

Čovek koji je ukrao šipke polonijuma sa radnog mesta i koji je kasnije osumnjičen da je istim pokušao otrovati bivšu ženu.

- ***England: London (2006)***

Trovanje Aleksandra Litvinenka polonijumom-210 ( $^{210}Po$ )

Ovi primeri samo dodatno naglašavaju potrebu za smanjenjem rizika neautorizovanog posedovanja radioaktivnih materijala. Stoga, IAEA podržava sve napore država članica kako bi se uspostavio efektivan nuklearno bezbednosni režim. Koordinacija obaveštajnih službi, zakonskih službenika i nuklearnih forenzičara predstavlja jednu vrstu slojevite zaštite koja sprečava pojavu terorističkog napada.

## **2.2 Međunarodne organizacije koje se bave nuklearnom forenzikom (ITWG, GICNT, PSI)**

Inernacionalne zajednice su oformile brojna partnerstva čime bi pojačali kooperaciju, kolaboraciju, razmenu informacija i deljenja najboljih praksi u datim situacijama među partnerskim zemljama. Primeri takvih partnerstava su ITWG (*The Nuclear Forensic International Technical Working Group*), GICNT (*The Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism*) i PSI (*The Proliferation Security Initiative*).

### **2.2.1 ITWG**

ITWG je izdao svoje prvo obaveštenje u decembru 2016. god u kojem je izjavljeno da je: "ITWG grupa neformalnih praktičara nuklearne forenzičke koji su posvećeni unapređenju naučne discipline tj. nuklearne forenzičke, sa ciljem prevencije i odgovora na incidente koji uključuju nuklearni i drugi radioaktivni materijal van regulatorne kontrole" [3]. Drugim rečima, ITWG predstavlja tehničku platformu gde predstavnici svih entiteta koji mogu biti uključeni u detekciju, prevenciju i odgovor na događaj koji je narušio nuklearnu bezbednost, dele iskustva i lekcije naučene iz pravih slučaja i vežbi.

ITWG se sastoji iz pet timova:

- 1. Grupa za sakupljanje dokaza** – Primarni fokus jeste kolekcija predmeta od interesa, gde se uključuju radioaktivni uzorci kao i bilo koji predmeti kontaminirani radionuklidima, za forenzičku analizu.
- 2. Grupa za vežbe** – Ova grupa je zadužena za koordinaciju i implementaciju inter-komparativnih vežbi u nuklearnoj forenzici koje se nazivaju CMX (*Collaborative Material Exercise*). Laboratorije koje odluče da učestvuju u CMX seriji su snabdevene uzorkom radioaktivnog materijala, i od njih se zahteva da izdaju nalaze prateći pravilo ITWG za izdavanje nalaza (Nalaz nakon 24h, nakon sedam dana i konačno nakon dva meseca). Okončanje tzv. vežbe se vrši sastankom za reviziju gde učesnici vežbe diskutuju najbolje prakse i tehnike primenjene na datim uzorcima.
- 3. Grupa za smernice** – Zaduženje ove grupe jeste produkcija tehničkih dokumenata (ITWG smernica) koji opisuju tehnike i procedure primenjene u nuklearno forenzičkoj analizi.
- 4. Grupa za nacionalne biblioteke nuklearne forenzičke** – Zaduženje ove grupe jeste da organizuje niz vežbi putem interneta koje se još nazivaju i *Galaxy Serpent* vežbe, putem kojih učestvujuće organizacije dobijaju zadatak da izvedu prototip nuklearno forenzičke biblioteke koristeći ponuđene podatke.

**5. Grupa za trening** – Ova grupa se fokusira na deljenje tehnikalnosti rada ITWG-a sa organizacijama koje iskazuju interes za razvoj i/ili jačanje nauke o nuklearnoj forenzici.

## **2.2.2 GICNT**

Ova organizacija je ustanovljena 2006. god kao volontersko partnerstvo 86 nacija i pet internacionalnih organizacija koje su posvećene prevenciji, detekciji i odgovoru na nuklearni terorizam [4]. Aktivnost GICNT-a je organizovana pod dejstvom tri grupe: grupa zadužena za rad NFWG (*Nuclear Forensics Working Group*), za detekciju NDWG (*Nuclear Detection Working Group*) i za adekvatan odgovor RMWG (*Response and Mitigation Working Group*).

Cilj NFWG grupe jeste da podigne svest o nuklearnoj forenzici, nega međunarodnih veza, sprovođenje zajedničkih vežbi i deljenje ideja o najboljim praksama. Ne tako davno, grupa je ostvarila plan za period od 2017-2019. god u kojem je naveden niz koraka odnosno inicijativa u podržanju razvijanja budućih aktivnosti.

U cilju ojačanja nuklearne bezbednosti na nacionalnom i regionalnom nivou, u najboljem interesu države jeste da razvije jaku svest o nuklearnoj forenzici i generalno nuklearnim pretnjama. Dva evidentna načina za to su:

- Razvijanje nacionalne laboratorije za nuklearnu forenziku kao jedinstvene institucije koja nudi nuklearnu forenziku kao ispomoć državi.
- Razvijanje nacionalne biblioteke za nuklearnu forenziku putem koje bi informacije, sposobnosti i iskustva neophodna za identifikaciju nuklearnog ili radioaktivnog materijala van regulatorne kontrole bili dostupni. Neophodne sposobnosti i informacije u ovakvom tipu biblioteke bi bili snabdeveni od strane: laboratorija za nuklearna istraživanja, nuklearnih postrojenja, medicinskih postrojenja itd.

## **2.2.3 PSI**

PSI organizacija je osnovana 2003. god i sačinjena je od 103 partnerske države koje se pridržavaju tzv. *“Statement of Interdiction Principles”*. Prema rečima inicijatora ove grupe, PSI predstavlja “Multinacionalni odgovor na sve pretnje proliferacije od strane oružja masivne destrukcije. Težnja grupe je da ukloni proliferaciju povezani sa trgovinom oružja, materijalima i dobavljačkim sistemima” [5].

## **2.3 Nacionalna nuklearna bezbednost države**

Na internacionalnom nivou, nuklearna zaštita je regulisana nizom multilateralnih instrumenata:

- Sporazum o neproliferaciji nuklearnog oružija, koji je stupio na snagu 1970. godine i koji sadrži 190 članica.
- Konvencija o fizičkoj zaštiti nuklearnog materijala i njen amandman iz 2005. godine. Stupljen na snagu 1987. godine i potvrđen od strane 153 zemlje [6].
- Internacionalna konvencija o supresiji akti o nuklearnom terorizmu koja je stupila na snagu 2007. godine.
- Obiman sporazum o zabrani nuklearnog testiranja koji je potpisano od strane 183 a potvrđen od strane 166 država. Stupanje na snagu zavisi od potvrđivanja svih zemalja pomenutih u Aneksu II (SAD, Izrael, Indija, Pakistan, Iran itd.)

Nuklearna bezbednost je interes internacionalne zajednice ne samo na planeti Zemlji, već i u Svemiru i dubokim okeanima. Sledеći legalni stepeni zaštite za Kosmos i okeane su razvijeni kako bi se isti zaštitili od nuklearnog materijala:

- Sporazum o principima aktivnosti država o istraživanju i upotrebljavanju Svemira, uključujući Mesec i ostala nebeska tela. Stupio na snagu 1967.
- Sporazum o zabrani postavljanja nuklearnih oružija i ostalih razornih oružija na okeansko dno. Stupio na snagu 1972.

Kao dodatak multilateralnim instrumentima, nuklearna bezbednost se takođe pominje od strane saveta bezbednosti Ujedinjenih nacija kroz odluke 1373 (2001 godine.) i 1540 (2004. godine), kojima poziva na nacionalnu, regionalnu i internacionalnu saradnju kako bi se ojačao globalni odgovor na izazove i pretnje po internacionalnu bezbednost.

Od svih gore pomenutih instrumenata zaštite, sporazum o neproliferaciji nuklearnog oružija se smatra ključnim za internacionalnu bezbednost i nastanak tzv. neproliferacionog režima. Tri međusobno povezana stuba ovog sporazuma (neproliferacija, razoružanje i mirnodopske upotrebe) pružaju adekvatan okvir za održanje i jačanje internacionalnog mira i bezbednosti dok istovremeno promoviše upotrebu energije u mirnodopske svrhe. Takođe, ovaj sporazum ima benefita od sopstvenog verifikacionog instrumenta – Internacionalne agencije za atomsku energiju

(IAEA<sup>2</sup>), za koju se smatra da je međunarodna nadzorna organizacija u pitanjima nuklearne bezbednosti, neproliferacije i razoružanja. Ustanovljena 1956. godine, IAEA se trenutno sastoji od 168 zemalja članica.

U svom govoru tokom internacionalne konferencije o nuklearnoj zaštiti<sup>3</sup>, generalni direktor IAEA, Muhamed El Baradei je ukazao na to da je IAEA kategorizovala četiri potencijalna rizika po nuklearnu bezbednost:

- Krađa nuklearnog oružja.
- Pribavljanje nuklearnog materijala za izgradnju nuklearnih eksplozivnih uređaja.
- Maliciozna upotreba radioaktivnih izvora – uključujući upotrebu tzv. "prljavih bombi" (*dirty bombs*).
- Radiološki hazardi uzrokovani sabotažom nuklearnog postrojenja ili transportnog vozila [7].

### 2.3.1 Sastanci o nuklearnoj bezbednosti

Danas, nuklearna bezbednost ima veći značaj zbog povećanog nivoa pretnji i globalnog rasta terorizma pomenutog u ranijim poglavljima. Štaviše, nerešeni regionalni konflikti mogu predstavljati dodatne izazove jer mogu dovesti do ilegalnog trgovanja, uključujući tu i nuklearni i radioaktivni materijal. Na primer, u prethodnim godinama smo bili svedoci porasta serije konfliktova u regionu Crnog mora koji može imati negativan uticaj na nuklearnu bezbednost. Povodom toga, internacionalne zajednice su prepoznale potrebu za kooperaciju u polju nuklearne bezbednosti, uključujući aktivnost u različitim praksama i treninzima i razmeni informacija, kao i pojačanoj graničnoj kontroli.

Po ovom pitanju, predsednik Amerike, Barak Obama, je 2009. godine pokrenuo sastanke o nuklearnoj bezbednosti (*Nuclear Security Summits*) tokom svog govora u Pragu. Prvi sastanak o nuklearnoj bezbednosti je održan 2010. godine, a kao njegov produkt nastao je radni plan za godine koje dolaze. Za polje nuklearne forenzike, plan nalaže sledeće: "Države članice moraju tražiti način da rade zajedno kako bi formirali nacionalne sposobnosti za nuklearnu forenziku, gde se uključuje kreacija nacionalnih biblioteka, kako bi se ohrabrla kooperacija između država u borbi protiv ilegalnog trgovanja nuklearnim i radioaktivnim materijalom". Poslednji sastanak ovog tipa je održan 2016. godine. Države članice će svakako nastaviti da se sastaju kako bi unapredili i održali nuklearnu bezbednost.

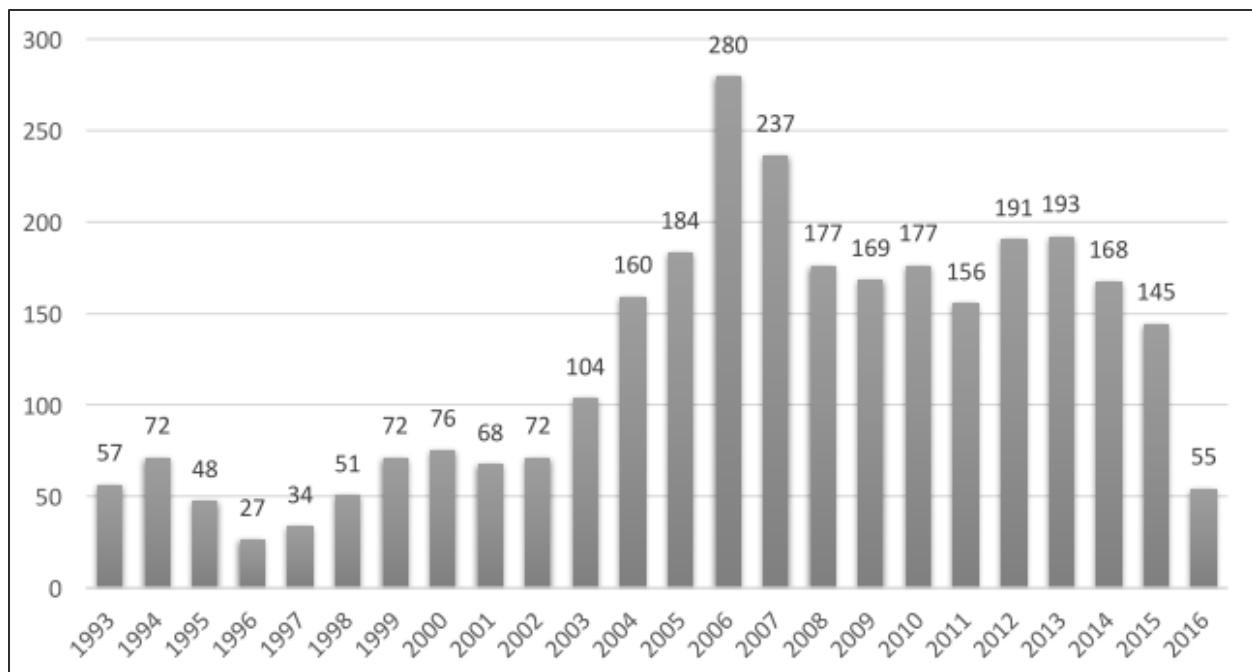
---

<sup>2</sup> The International Atomic Energy Agency.

<sup>3</sup> International Conference on Nuclear Security: Global Directions for the Future.

## 2.4 IAEA baza podataka o incidentima koji su ugrozili nuklearnu bezbednost

Baza podataka o incidentima i trgovini tj. ITDB (*The Incident and Trafficking Database*) je formirana od strane IAEA-e, kako bi se održavao nivo razmene informacija među državama članicama. Cilj baze podataka jeste da sakuplja, održava i analizira informacije o incidentima vezanim za ilegalan transport i vezane neregulatorne aktivnosti koje uključuju nuklearni materijal ili radioaktivne izvore. Nažalost, baza podataka nije u mogućnosti da preda informaciju o poreklu i poslednjem autorizovanom dejstvu radioaktivnih materijala, ali je u mogućnosti da poveže slučajevе međusobno. Ovo omogućava da se česte pretnje, rizici i šabloni uoče među slučajevima i time znatno olakša odgovor na datu pretnju. U periodu između 1993. i 2006. godine je zabeleženo 2973 incidenta [8] koji su uključivali radioaktivni materijal (Slika 2.1).



Slika 2.1 Zabeleženi slučajevi u periodu od 1993-2006. godine.

## 2.5 Nuklearna forenzika: ciljevi i primene

Prepoznavajući prisustva globalne pretnje po populaciju i bezbednost, grupa od osam zemalja (G8) je sazvala uprave da se posvete identifikaciji i eliminaciji ponude i potražnje ilegalnog fisionog materijala. Samim tim, identifikacija nuklearnih materijala i

spoznavanje njegovog mesta porekla je od velikog značaja. Ovo predstavlja cilj novog polja nauke tzv. nuklearne forenzičke, koja prema IAEA definiciji: "Ispituje nuklearni i radioaktivni materijal ili dokaze za koje se sumnja da su kontaminirani radionuklidima u kontekstu legalnih procedura pod nadzorom internacionalnog ili nacionalnog zakona vezanog za nuklearnu bezbednost" [9].

Radioaktivni materijali nepoznatog porekla dolaze u neautorizovani posed i okolinu sledećim načinima:

- Akcidenti pri kojima se radioaktivni materijal raspršuje.
- Ilegalno ostavljanje radioaktivnog otpada.
- Ilegalna trgovina nuklearnim i radioaktivnim materijalima.
- Ostavljanje tragova deklarisanog izvora ili izvora skrivene aktivnosti.

Prema definiciji IAEA, ilegalna trgovina obuhvata bilo kakvu sumnju u posedovanje, upotrebu, transfer ili sakrivanje radioaktivnog materijala bez odgovarajuće legalne autorizacije. Međutim, ovu definiciju ne treba striktno shvatiti jer ne spadaju svi neautorizovani akti sa radioaktivnim materijalima u ilegalne. Naime, neki od slučajeva koji se mogu dogoditi imaju veze sa administrativnim procedurama i posebnim nacionalnim zakonima države pa samim tim ne zahtevaju dodatnu pažnju bezbednosnih organa.

Tokom istrage slučajeva o ilegalnoj trgovini, najčešće se javljaju pitanja o tome da li je materijal namerno zloupotrbљen, poreklo materijala i ukoliko se pronađe, krijumčarski put kojim je radioaktivni materijal dospeo u zemlju. Dalje, eksperți – nuklearni forenzičari analiziraju materijal i pokušavaju da odgovore na pitanja u skladu sa nacionalnim akcionim planom prema preporukama ITWG kojima se obrazlaže niz koraka koji se moraju preuzeti kada se radioaktivni materijal zapleni.

Nauka o nuklearnoj forenzici se sučeljava sa analizama nuklearnog ili radioaktivnog materijala presretnutog u ilegalnoj trgovini. Tokom ovih analiza, utvrđuje se tzv. otisak materijala (praktično bilo koji trag po kojem je taj materijal unikatan tj. prepoznatljiv). Ovi tragovi se sastoje iz izotopske i elementalne kompozicije, odnosa izotopa i masa, godine (ovaj pojam se odnosi na protekli vremenski period od poslednjeg pročišćavanja i/ili separacije), koncentracije elementalnih nečistoća, hemijske forme i fizičkih parametara. Takođe, poređenjem datih otisaka materijala sa već prisutnim otiscima u nacionalnoj biblioteci nuklearne forenzičke, moguće je odrediti potencijalne proizvođače i istoriju produkcije radioaktivnog materijala. Dakle, glavna uloga nuklearne forenzičke je identifikacija

porekla i istorije ispitivanog radioaktivnog materijala na osnovu njegovih izotopskih, hemijskih i fizičkih otisaka čime bi obezbedili dokaze za dalju kriminalnu istragu.

Stepeni nuklearne bezbednosti se sastoje iz:

1. Prevencija (prva linija odbrane) – uključuje fizičku zaštitu i obezbeđivanje nuklearnog i radioaktivnog materijala.
2. Detekcija (druga linija odbrane) – uključuje detekciju na granicama korišćenjem mobilnih monitoring sistema.
3. Odgovor (treća linija odbrane) – uključuje posledičan odgovor na već počinjen kriminalni akt.

Nuklearna forenzika se može svrstati kao detekcija i kao odgovor na incident, jer je u mogućnosti ne samo da reproducira mesto zločina, već i da znatno ublaži efekte radiološkog incidenta.

## **2.6 Kategorizacija i karakterizacija nuklearnog materijala**

Bilo koji potvrđeni znak za opasnost uzrokovani radijacijom ili nuklearnim materijalom, bilo da potiče od bolnica, veštačkih djubriva ili zagadenja okoline, zahteva adekvatan odgovor. Stoga, tim stručnjaka iz oblasti nuklearne forenzike i službenika zaštite od zračenja MEST (*Mobile Expert Support Team*) dolazi na scenu kako bi se izvršila kategorizacija radioaktivnog materijala. Ovo se vrši kako bi se pre došlo do važnih informacija o materijalu koje se potom prosleđuju policiji. Glavni zadaci MEST grupe su identifikacija rizika vezanih za zaplenjeni radioaktivni materijal, određivanje tipa prisutnog zračenja (alfa, beta, gama ili neutronsko zračenje), deklarisanje forme materijala ili forme kontejnera u kome se materijal nalazi, pronalaženje tradicionalnih forenzičkih dokaza i konačno davanje preporuke za dalje korake u istrazi. Kategorizacija se obavlja merenjem radioizotopskog sastava materijala pomoću instrumenata:

- Sonde za detekciju alfa/beta kontaminacije kojima se određuje da li ima kontaminacije i da li eksperti mogu stupiti bezbedno na mesto zločina.
- Uredaji za identifikaciju radionuklida baziranih na *NaI* ili *CdZnTe* kristalima. Ovi detektori omogućavaju inicijalnu identifikaciju gama emitujućih nuklida. Doduše, zbog veoma niske energetske rezolucije, rezultati vrlo često budu nezadovoljavajući.

- Prenosni sistemi za gama spektrometriju bazirani na kristalu germanijuma visoke čistoće HPGe (*High Purity Germanium*) koji zbog svoje visoke energetske rezolucije mogu dati informaciju o tipu radionuklida koji emituje gama zračenje. Takođe, u moguće je izvršiti i inicijalnu analizu izotopske kompozicije plutonijumskih i uranovih uzoraka.

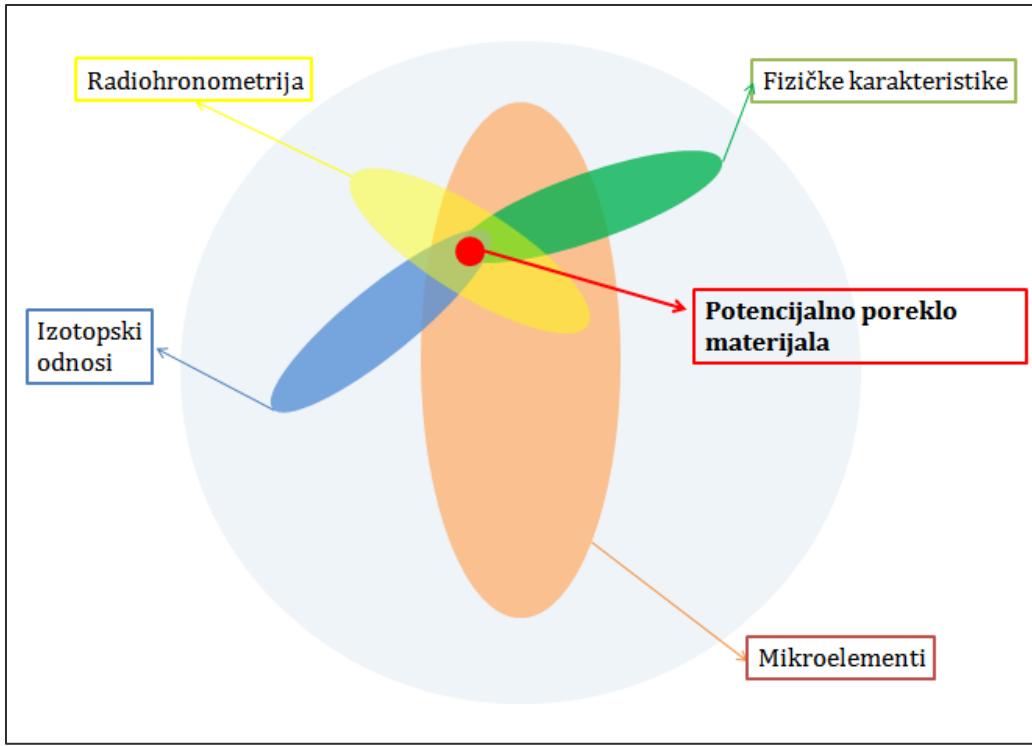
Preliminarna procena radioaktivnog materijala daje informaciju preko koje se može oformirati adekvatan odgovor na događaj koji je potencijalno ugrozio nuklearnu bezbednost. Takođe, informacije o kategorizaciji materijala mogu otkriti da li je neki zakon bio narušen, i sa tim na umu policija je u mogućnosti da privede osumnjičene za zločin. Preliminarna kategorizacija radioaktivnog materijala se obavlja u autorizovanoj laboratoriji za nuklearnu forenziku u cilju otkrivanja prirode materijala i otkrivanja potencijalnih dokaza koji se mogu upotrebiti na sudu. ITWG preporučuje da se prvi izveštaj mora izdati u roku od 24 sata. Ovaj izveštaj bi trebalo da sadrži opservacije sa terena i dovoljno informacija za razvijanje daljeg plana za nuklearno forenzičku analizu. Izveštaj uglavnom sadrži informacije o veličini i obliku uzorka, fizičkoj formi, boji, oznakama, površinskoj topografiji, izotopskom sastavu i sl.

## 2.7 “Tragovi” u nuklearnoj forenzici

U nuklearnoj forenzici, tragovi ili otisci mogu snabdeti informacije o vezama između zaplenjenog radioaktivnog materijala i drugog materijala, mesta, puta ili čak ljudi uključenih u kriminalni akt. Ovi tragovi se sastoje od fizičkih, hemijskih, izotopskih i elementalnih karakteristika uzorka. Na slici 2.2 je šematski prikazano određivanje potencijalnog porekla materijala. Većina tragova se može dobiti putem četiri vrste merenja, a to su: određivanje fizičkih i hemijskih karakteristika i pronalaženje elementalnog i izotopskog sastava. Na slici 2.3 su ilustrovani tipovi merenja i vremenski okviri preporučeni od strane ITWG.

### 2.7.1 Fizičke karakteristike - dimenzija, masa, gustina, boja, mikrostruktura, morfologija

Masa uzorka se može odrediti sa velikom preciznošću zahvaljujući današnjoj tehnologiji, dok se veličina i oblik (geometrija) određuju tradicionalno, korišćenjem šestara, optičkog mikroskopa i/ili 3D skenerom. Veličina analiziranih uzoraka može varirati od nekoliko milimetara do desetina centimetara (npr. peleti za nuklearne reaktore, potrošeni uranijumske kolimatori na bazi iridijuma korišteni u defektoskopima, itd.). Kako bi se izbegla unakrsna kontaminacija uzorka, bezkontaktna merenja se preferiraju.



**Slika 2.2** Određivanje potencijalnog porekla materijala [10]

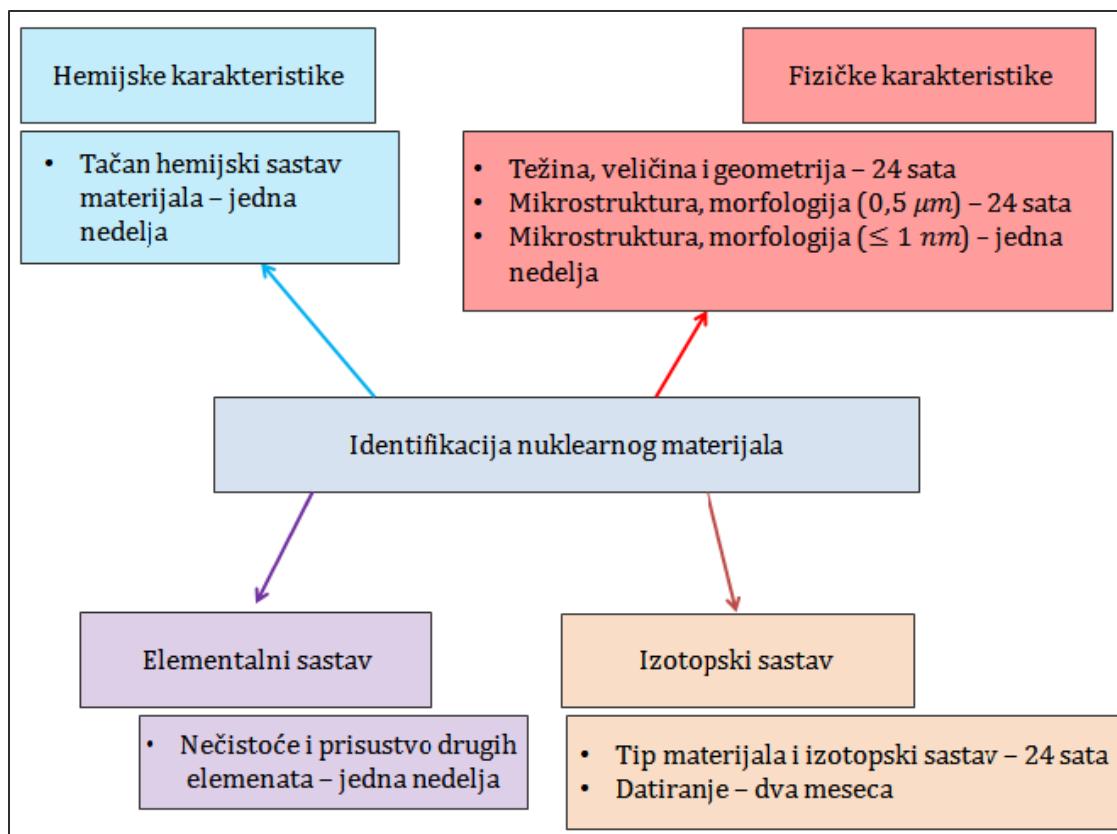
Dimenzija i težina uranijumskih i plutonijumskih peleta nudi direktnе informacije o tipu nuklearnog reaktora u kom su proizvedeni. Sa druge strane, težina uzorka, geometrija i oblik su takođe korisni za Monte Carlo simulacije HPGe detektora radi kalibracije efikasnosti maksimalne energetske efikasnosti.

### 2.7.2 Izotopska merenja – radionuklidi, stabilni izotopi, potomci

Uzorci uranijuma i plutonijuma se nalaze u raznim izotopskim sastavima. Svi uzorci uranijuma koji sadrže bar 0,71%  $^{235}U$  se smatraju prirodnim uranijumom (*Natural Uranium*). Za one uzorce koji sadrže više od 0,71% ali manje od 20%  $^{235}U$  se kaže da su nisko obogaćeni uranijumom (*Low Enriched Uranium*). Uzorci koji sadrže između 1,8 i 6,5 % se inače koriste u nuklearnim elektranama. Svaki uzorak koji sadrži preko 20%  $^{235}U$  se smatra visoko obogaćenim uranijumom. Zastupljenost od čak 90%  $^{235}U$  svrstava uzorak u specijalni nuklearni materijal koji može poslužiti za konstrukciju ranije pominjanog improvizovanog nuklearnog eksploziva (IND).

Svi plutonijumski uzorci se dobijaju veštačkim putem kada se goriva uranijuma ozrače snopom neutrona. Izotop od interesa je  $^{239}Pu$ . Plutonijumski uzorci sa koncentracijom  $^{239}Pu$  višom od 93% se smatraju specijalnim nuklearnim materijalom. Dve tehnike se preferiraju za određivanje izotopskog sastava nuklearnog materijala.

Najviše primenjiva, relativno jeftina i nedestruktivna metoda je gama spektrometrija koja će detaljno biti opisana u narednim poglavljima. Vrlo je korisna za brzu karakterizaciju proučavanog radioaktivnog uzorka. Međutim, za preciznu analizu sa osetljivošću do ppb<sup>4</sup>, više se teži ka upotrebi masenog spektrometra. Naravno, i on ima svoje mane budući da je metoda destruktivna i samim tim uključuje uništenje uzorka.



Slika 2.3 Tipovi merenja i vremenski okviri

### 2.7.3 Hemijska merenja – hemijska forma i hemijske osobine

Difrakcija X zracima je često upotrebljavana tehnika za karakterizaciju hemijske kompozicije i nanokristalnog karaktera proučavanog nuklearnog materijala. Tehnika je nedestruktivna i brzo daje rezultate, pa je samim tim vrlo povoljna metoda.

Postoji niz hemijskih jedinjenja karakterističnih za uranijum i plutonijum. Kako bi procenili masu izotopa, hemijska forma proučavanog uzorka se mora odrediti. Hemijska forma predstavlja otisak specifičnog ciklusa nuklearnog goriva pri kojem je

<sup>4</sup> Parts Per Billion.

ono ekstraktovano. Uranijum koji se pronađe u ilegalnom trgovinu se najčešće nalazi u formi  $UO_2$ ,  $U_3O_8$  i u vidu metaličnog uranijuma. Sa druge strane, plutonijum se najčešće javlja u formi plutonijum oksida  $PuO_2$ . Međutim, postoji niz poznatih hemijskih jedinjenja vezanih za plutonijum, među kojima su sva nestabilna.

#### **2.7.4 Elementalna merenja – metalične nečistoće, retki i drugi elementi**

Nakon proizvodnje peleta za nuklearno gorivo, elementalne nečistoće se drastično smanjuju. Međutim, neke od nečistoća prisutne u materijalu u vreme analize mogu ukazati na poreklo materijala kao i do tačke pri kojoj je došlo do gubitka autorizovanog posedstva ovog materijala. Na primer, koncentracije retkih elemenata u zemlji mogu uputiti do lokacije gde je materijal iskopan; Er i Gd mogu biti tragovi zapaljivih otrova; Cr, Fe, Co i Ni mogu biti otisci alata od nerđajućeg čelika koji su bili u kontaktu sa zaplenjenim materijalom; Ca, Mg i Cl mogu ukazivati na procese gde je uključena voda, pa opet samim tim dovesti do porekla, odnosno lokacije. Najviše primenjivana metoda za elementalne analize je induktivno kuplovana plazma masena spektrometrija (ICP - MS<sup>5</sup>).

### **2.8 Radiološko mesto zločina**

Nakon što je došlo do probora štita nuklearne bezbednosti jedne države, timovi eksperata izlaze na teren kako bi se primenio adekvatan odgovor na trenutnu pretnju. Timovi policije i forenzičara na mestu događaja formiraju mesto zločina kome samo ovlašćene osobe imaju pristup kako ne bi došlo do kontaminacije potencijalnih dokaza. Ukoliko se, sa određenom dozom sigurnosti, utvrđi da je zločin imao jakih veza sa nuklearnim ili radioaktivnim materijalom, mora se otići korak dalje i formirati tzv. radiološko mesto zločina (Slika 2.4).

Za razliku od “običnog” mesta zločina, koje obrađuju policajci i forenzičari, radiološko mesto zločina stupa na snagu kada se detektuje potencijalna opasnost izlaganja radioaktivnom materijalu. Stoga, vrlo je važno voditi računa o:

- Vremenu koje pojedinci provode u kontrolisanoj zoni.
- Rastojanju između radiokontaminiranih dokaza i forenzičara koji ih sakuplja, kao i o tehnika sakupljanja samih dokaza.
- Opremi za zaštitu od zračenja.
- Izbegavanju unakrsne kontaminacije.
- Individualnog izlaganja zračenju.

---

<sup>5</sup> Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry.

Pri dolasku na radiokontaminirano mesto zločina, neophodno je prvo izvršiti kontrolu kontaminacije područja. Kontrolu terena vrše bar tri ovlašćene osobe: jedna koja nosi detektor površinske kontaminacije, druga koja poseduje dozimetar i treća koja sve to beleži i drži u blizini ambalažu za prikupljanje dokaza. Nakon izvršene kontrole mesta zločina, neophodno je dekontaminirati tim koji je vršio kontrolu.



**Slika 2.4** Radiološko mesto zločina

# 3. Dozimetrija i gama spektrometrija

Široka primena radioizotopa u industriji i medicini je neminovno dovela do većeg izlaganja populacije zračenju nego što je to bio slučaj u prošlosti [11]. Kao rezultat toga je mnogo više ljudi, planirano ili neplanirano, izloženo radioaktivnom zračenju pa je neophodno razumeti na koji način ovo zračenje utiče na biološka tkiva. Iako je princip po kojem radioaktivno zračenje interaguje sa bilo kojom materijom isti (gde se misli na određeni tip zračenja, ne generalno), posledice se znatno razlikuju kada je u pitanju materijal. Naime, organske strukture su daleko kompleksnije od neorganskih, pa sama interakcija zračenja sa organskom materijom može da izazove niz posledičnih<sup>6</sup> (indirektnih) štetnih reakcija. Izučavanje dejstva zračenja na organske strukture je stvorilo potrebu za rađanje novih disciplina koje bi težile da okarakterišu štetno dejstvo zračenja (dozimetrija, radiobiologija itd). Prvi korak u procesu detaljnijeg sagledavanja bioloških promena nastalih kao posledica zračenja je uvođenje određenih fizičkih veličina (doza), kojima bi se dejstvo zračenja moglo kvantitativno i kvalitativno opisati. Oblast koja se bavi mehanizmima pod kojim dolazi do predaje energije zračenja organskim strukturama kao i načinima izračunavanja i merenja doza se naziva dozimetrija.

Sa druge strane, kako će se eksperimentalni deo ovog rada odnositi na ispitivanje radioaktivnog uzorka metodom gama spektrometrije, posebna pažnja će biti posvećena opisivanju interakcije gama zračenja<sup>7</sup> sa materijom kao i problematici vezanoj za detekciju ovog tipa zračenja.

## 3.1 Jonizujuće zračenje

Dva osnovna mehanizma interakcije zračenja sa materijom su ionizacija i ekscitacija. Po definiciji, ionizacija predstavlja proces gde zračenje poseduje dovoljnu količinu energije da izbije jedan ili više elektrona iz elektronskog omotača i time poremeti elektroneutralni status atoma tj. napravi jon, dok ekscitacija predstavlja proces gde zračenje ne poseduje dovoljnu količinu energije kako bi jonizovalo materiju ali ipak predavanjem ovog iznosa energije elektronu dolazi do njegovog prelaska na neku višu orbitalu (pobuđeno stanje), čime elektron biva ekscitovan. Bitno je napomenuti da se oba mehanizma dešavaju u elektronskom omotaču atoma. Kako bi

<sup>6</sup> Kao rezultat procesa u kojima zračenje predaje svoju energiju atomima sredine kroz koju se prostire, mogu postojati posledice po funkcionisanje nekih makromolekula, ćelija i tkiva.

<sup>7</sup> Pod pojmom "zračenje" se svrstava čestično i talasno zračenje. Mehanizmi interakcije sa sredinom kroz koju prolaze se poprilično razlikuju, čak i međusobno (čestično zračenje se može sastojati iz lakih i teških nanelektrisanih čestica koje imaju vrlo različite mehanizme interakcije sa sredinom kroz koju prolaze iako pripadaju istom tipu zračenja).

zračenje interagovalo sa samim jezgrom atoma, ono mora posedovati znatno veću količinu energije kako bi se "probilo" do jezgra (pozitivno nanelektrisane čestice moraju savladati još i odbojni potencijal protona unutar jezgra).

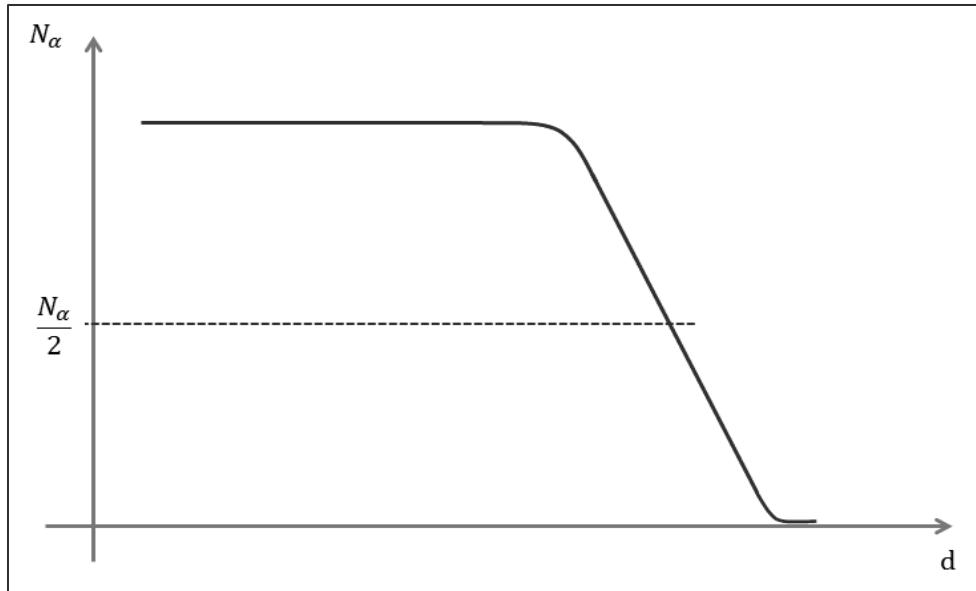
Već je pomenuto da se pod pojmom "zračenje" podrazumeva snop čestica ili snop kvanata elektromagnetskog polja tj. fotona. Fotoni i nanelektrisane čestice interaguju sa sredinom kroz koju prolaze na sasvim različite načine. Naime, nanelektrisane čestice interaguju uglavnom putem električnog polja gde može doći do pomenute ionizacije atoma sredine ali i do tzv. Kulonovog rasejanja. Ukoliko nanelektrisana čestica prilikom prolaska kroz neku sredinu doživi intenzivnu promenu brzine, prema teoriji elektrodinamike ona emituje elektromagnetno zračenje određene energije. Ovo elektromagnetno zračenje može da izazove dodatne, sekundarne, ionizacije. Još jedan od načina predavanja energije nanelektrisane čestice, gde pritom ne dolazi do ionizacije same sredine, je poznato pod nazivom Čerenkovljev efekat. Sa druge strane, fotoni prilikom tranzicije kroz datu sredinu mogu doživeti: fotoefekat, Komptonovo, Rejlijevo ili Tomsonovo rasejanje i efekat proizvodnje parova. I jedan i drugi tip zračenja mogu izazvati nuklearne reakcije pod uslovom da poseduju dovoljno visoku energiju.

### 3.1.1 Nanelektrisane čestice

Nanelektrisane čestice se u pogledu svoje mase mogu podeliti dvojako, na teške i luke nanelektrisane čestice. Pod teškim nanelektrisanim česticama se smatraju  $\alpha$  čestice, protoni, jezgra lakših elemenata, deuterijum, tricijum kao i ogoljena jezgra nekih težih elemenata. Budući da su  $\alpha$  čestice lako dostupne u laboratoriji one su najbolje i izučene, pa će se doneseni zaključci vezani za njih preneti i na ostale teško nanelektrisane čestice (uz male korekcije). Jezgro helijuma, ili  $\alpha$  čestice, se sastoji od dva neutrona i dva protona. Samim tim, njegova masa je oko 7300 puta veća od mase elektrona. Zbog ovako drastične razlike u masama, postoji ograničenje u smislu predavanja energije  $\alpha$  čestice elektronu. Maksimalna energija koju elektron može dobiti u direktnom sudaru sa  $\alpha$  česticom je:

$$E_e = 4 \cdot E_\alpha \frac{m_e}{m_\alpha}, \quad (3.1)$$

gde je  $E_\alpha$  energija  $\alpha$  čestice,  $m_e$  je masa elektrona a  $m_\alpha$  je masa alfa čestice. U zasebnoj interakciji,  $\alpha$  čestica može da preda samo mali iznos od svoje ukupne energije, što znači da će do svog konačnog zaustavljanja ona višestruko interagovati sa elektronima što se može vrlo lepo i ilustrovati (Slika 3.1). Sa slike se može jasno videti da je broj  $\alpha$  čestica



**Slika 3.1** Zavisnost broja  $\alpha$  čestica od dometa

tokom većeg dela putanje konstantan, a da do znatnog redukovana broja  $\alpha$  čestica dolazi na samom kraju putanje kada se deponuje absolutni iznos njene energije u sredinu kroz koju se prostire.

Domet predstavlja jednu od osnovnih veličina kada je u pitanju karakterizacija zračenja. Po definiciji, domet predstavlja najmanju debljinu materijala koja u potpunosti može da zaustavi dato zračenje. Domet  $\alpha$  čestica u vazduhu je relativno lako izmeriti: vrši se postepeno udaljavanje izvora zračenja i detektora zračenja. U jednom trenutku detektor neće moći da zabeleži ništa osim fonskog zračenja, i taj trenutak predstavlja zapravo maksimalni domet  $\alpha$  čestice. Logično je da ukoliko  $\alpha$  čestica ima veću energiju ima i veći domet. Pomenuta zavisnost se može predstaviti u vidu empirijske relacije:

$$R_\alpha [\text{cm}] = 0,318 \cdot E^{\frac{3}{2}} [\text{MeV}] \quad (3.2)$$

Takođe, domet  $\alpha$  čestice se u zavisnosti od energije u nekim drugim materijalima može odrediti putem relativnog kriterijuma. Data relacija je takođe empirijskog tipa, i naziva se Breg-Klemanova relacija:

$$\frac{R_1}{R_0} \approx \frac{\rho_o \sqrt{A_1}}{\rho_1 \sqrt{A_o}}, \quad (3.3)$$

gde su  $\rho_1$  i  $\rho_o$  gustine posmatranog materijala a  $A_1$  i  $A_o$  njihovi maseni brojevi. Za  $\rho_o$ ,  $A_o$  i  $R_o$  kažemo da su relativne, odnosno poznate veličine preko kojih određujemo nepoznati domet  $R_1$ .

Konačno, na osnovu dometa  $\alpha$  čestica u vazduhu, moguće je proceniti i domet drugih teških nanelektrisanih čestica. Empirijska relacija koja povezuje veličine vezane za  $\alpha$  česticu i proton je izvedena od strane Bete-a i Livingstona i ona glasi:

$$R_p = 1,0072 \cdot R_\alpha \cdot (3,971 \cdot E_p) - 0,20 \text{ [cm]}, \quad (3.4)$$

gde su  $R_p$  i  $R_\alpha$  dometi protona i  $\alpha$  čestice, dok  $E_p$  predstavlja energiju protona. Ukoliko se  $E_p$  izrazi u jedinici MeV, domet se dobija u centimetrima.

Sa druge strane, pod lakin nanelektrisanim česticama svrstavamo elektrone i pozitrone. Obe čestice potpuno identično interaguju sa materijom, a jedina razlika se može ogledati na kraju njihovog puta, gde elektron kada potroši svoju energiju biva zahvaćen od strane drugog atoma i postaje običan orbitalni elektron, dok pozitron na kraju svog putovanja doživljava anhilaciju sa elektronom. Glavni način na koji lakin nanelektrisane čestice gube energiju jeste takođe ionizacija, baš kao i kod  $\alpha$  čestica, ali uz značajnu razliku u masi. Naime, orbitalni elektroni sa kojima snop lakin nanelektrisanih čestica interaguje se zapravo i ne razlikuju od elektrona u samom snopu. Kao posledica toga, putanja elektrona u snopu se vrlo lako skreće, ondosno više liči na izlomljenu liniju (u poređenju sa putanjom  $\alpha$  čestice). Samim tim, već pri prvom sudaru, elektron iz snopa je u stanju da izgubi znatan, ako ne i ceo iznos energije.

Kao što je to bio slučaj i kod teških nanelektrisanih čestica, i za lakin nanelektrisane čestice postoji niz empirijskih relacija<sup>8</sup> preko kojih se može izraziti domet ovog tipa zračenja. Naravno, zavisno od energije snopa razlikuje se nekoliko relacija. Pa tako, za monoenergetski snop elektrona sa energijom manjom od 10 MeV, dobru procenu dometa daje relacija:

$$R_{max} = 0,526 \cdot E_e - 0,24, \quad (3.5)$$

gde se domet dobija u  $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$  ukoliko se energija izrazi u jedinicama MeV.

---

<sup>8</sup> Rezultati koji se dobijaju primenom različitih relacija mogu se međusobno razlikovati u zavisnosti od geometrije eksperimenta.

Kac i Penfold su dobili donekle složeniju vezu između dometa elektrona i njihove energije u aluminijumu:

$$R_d = 412 \cdot E^n, \quad \text{za } n = 1,265 - 0,0954 \cdot \ln E \quad (3.6)$$

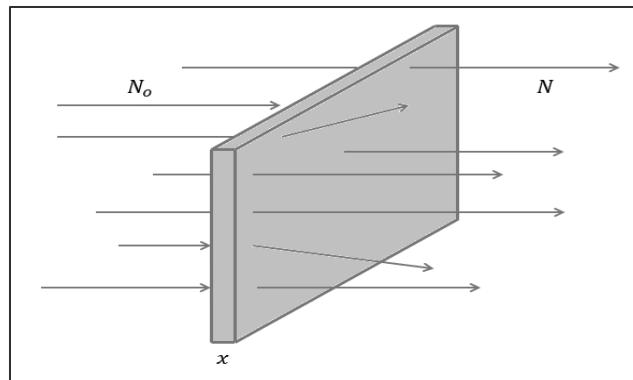
Ukoliko se energija izrazi u jedinicama MeV, domet se dobija u  $\frac{\text{mg}}{\text{cm}^{-2}}$ . Ova formula daje vrlo dobre rezultate u energetskom opsegu od 0,01 do 2,5 MeV. Za relativističke energije elektrona od 2,5 pa sve do 20 MeV, dobro se pokazala sledeća relacija:

$$R_d = 530 \cdot E - 106 \quad (3.7)$$

Opet, ako se energija izrazi u jedinicama MeV, domet se dobija u  $\frac{\text{mg}}{\text{cm}^{-2}}$ . Vrlo je bitno napomenuti da sve gore navedene relacije važe isključivo za monoenergetske elektrone, dok se eksperimentalno može pokazati da beta zračenje ima kontinualni spektar.

### 3.1.2 Gama zračenje

Gama zračenje predstavlja elektromagnetsko zračenje malih talasnih dužina koje potiče iz nukleusa (za razliku od npr. X-zračenja). Snop ovog tipa zračenja možemo posmatrati kao snop kvanata elektromagnetskog polja, tj. fotona koji se kreću brzinom svetlosti. Načini na koji gama zračenje interaguje sa materijom se opisuju kvantnom elektrodinamikom i znatno su složeniji od interakcija nanelektrisanih čestica sa materijalnom sredinom. Naime, fotoni ne poseduju nanelektrisanje pa ne postoji mogućnost da sa elektronima interaguju putem električnog polja. Do interakcije sa elektronima dolazi u jako uskoj oblasti koja se još naziva i Komptonova talasna dužina



Slika 3.2 Atenuacioni zakon

elektrona (koja je reda veličine  $10^{12}$  m), dok do interakcije sa jezgrom dolazi u oblasti koja je još dva reda veličine manja. Takođe, kako je već rečeno, foton se uvek kreću brzinom svetlosti i kao takvi ne mogu biti usporeni u interakcijama. Oni ne doživljavaju kontinuirani gubitak energije kao što to čine nanelektrisane čestice i samim tim im je nemoguće odrediti eksperimentalne parametre poput dometa i gubitka energije po jedinici puta.

Činjenica da fotoni pri interakciji potpuno nestaju ili bivaju skretani sa svoje originalne putanje se može iskoristiti za jednostavan način opisivanja njihovog prostiranja kroz neku sredinu. Posmatramo interakciju uzanog snopa fotona koji se kreće sa leva na desno (Slika 3.2) sa materijalom debljine  $dx$ . Prilikom prolaska kroz sloj materijala određeni broj fotona  $dN$  će nestati pri interakciji, što se može zapisati kao:

$$dN = N \cdot \sigma \cdot n \cdot dx, \quad (3.8)$$

gde je  $N$  broj upadnih fotona,  $\sigma$  efikasni presek kao mera verovatnoće da foton bude uklonjen iz snopa dok  $n$  predstavlja broj atoma po jedinici zapremine materijala. Proizvod efikasnog preseka i broja atoma po jedinici zapremine se još naziva i linearни atenuacioni koeficijent  $\mu$ , dok integracija gornje relacije daje tzv. atenuacioni zakon:

$$N = N_o e^{-\mu x} \quad (3.9)$$

Praksa je pokazala da je korisnije upotrebljavati maseni atenuacioni koeficijent  $\mu_m$  koji se dobija deobom linearног atenuacionog koeficijenta sa odgovarajućom gustinom:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma \cdot n}{\rho} = \frac{\sigma \cdot N_{av}}{M}, \quad (3.10)$$

gde je  $N_{av}$  Avogadrovo broj a  $M$  molekulska masa materijala. Maseni atenuacioni koeficijent ne zavisi od gustine a samim tim ni od agregatnog stanja materijala. Atenuacioni zakon preko  $\mu_m$  se može definisati kao:

$$N = N_o e^{-\mu_m \rho x}. \quad (3.11)$$

Broj fotona nekog snopa će pri prolasku kroz određeni atenuator opadati po eksponencijalnom zakonu u zavisnosti od debljine atenuatora. Često se umesto debljine  $x$  koristi prozvod  $\rho x$  koji se izražava u jedinicama  $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$ . Linearni i maseni atenuacioni koeficijenti u potpunosti određuju prolazak gama zračenja kroz materiju. Vrednosti atenuacionih koeficijenata se razlikuju od materijala do materijala, ali čak i za isti materijal mogu imati potpuno različite vrednosti (kod nemonoenergetskih snopova fotona). Osnovni načini interakcije, odnosno načini putem kojih foton može biti uklonjen iz snopa su:

- 1.** Fotoelektrični efekat.
- 2.** Tomsonovo, Rejljevo i Komptonovo rasejanje.
- 3.** Efekat stvaranja parova.

Prilikom fotoelektričnog efekta i efekta proizvodnje parova fotoni u potpunosti nestaju, dok kod bilo kog tipa rasejanja oni samo menjaju svoj pravac kretanja.

### 3.1.2.1 Fotoelektrični efekat

Fotoelektrični efekat predstavlja pojavu izbijanja elektrona sa površine metala usled padanja elektromagnetskog zračenja iz gama ili ultraljubičaste oblasti. Klasična elektrodinamika vođena Maksvelovim jednačinama pridaje isključivo talasna svojstva elektromagnetskom zračenju, i kao takva nije bila u mogućnosti da opiše ovu pojavu. Nadovezujući se na Plankovu hipotezu i čuveni problem Ultraljubičaste katastrofe, Albert Ajnštajn postulira da je elektromagnetno zračenje kvantovano (kvant elektromagnetskog zračenja je foton), i da se u vidu ovih sitnih "paketica" energije može apsorbovati na površini metala. U zavisnosti od energije snopa, fotoefekat će se odigravati na elektronima sa površine ili dubine<sup>9</sup> materijala. Dakle, fotoelektrični efekat je proces u kojem foton u potpunosti predaje svoju energiju orbitalnom elektronu i u tom procesu nestaje, dok elektron postaje slobodan:

$$h\nu = E_v + T, \quad (3.12)$$

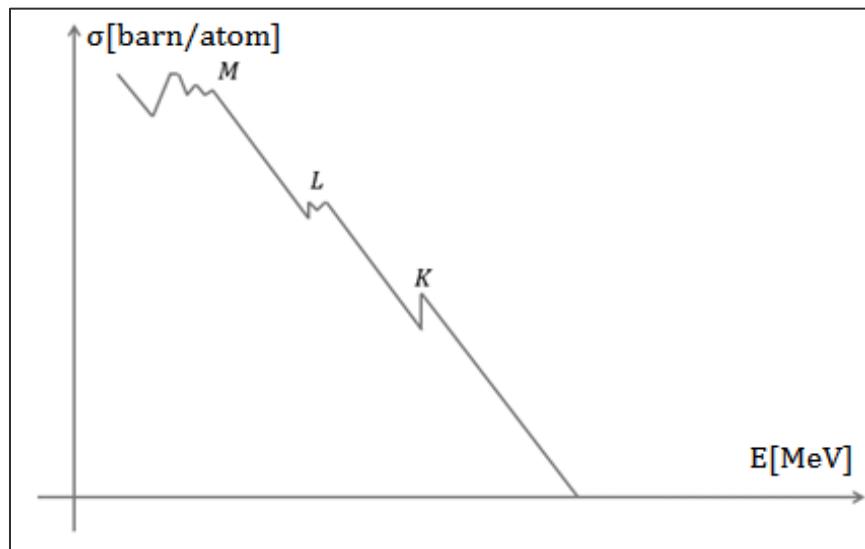
gde je  $h$  Plankova konstanta,  $\nu$  frekvencija,  $E_v$  energija veze elektrona i  $T$  kinetička energija elektrona. Ukoliko foton poseduje energiju veću nego što je to energija veze elektrona, višak će otići na kinetičku energiju elektrona nakon što bude oslobođen.

---

<sup>9</sup> Pod pojmom dubina, misli se unutrašnje orbitale, bliže jezgru.

Često izostavljan član u gornjoj jednačini jeste parametar vezan za jezgro, tzv. uzmak jezgra. Budući da se fotoefekat može odigrati samo na vezanom elektronu, zakon održanja impulsa nalaže da u ovom procesu mora postojati još jedno, treće telo, koje će preuzeti deo impulsa na sebe. To treće telo je atomsko jezgro, i zaista tokom procesa fotoefekta se javlja uzmak jezgra, ali zbog ogromne razlike u masama između elektrona i atomskog jezgra, ovaj član se najčešće izostavlja.

Efikasni presek kao mera verovatnoće uklanjanja fotona iz snopa putem fotoefekta, u zavisnosti od energije fotona je prikazan na slici 3.3. Evidentno, verovatnoća za fotoefekat se smanjuje kako raste energija fotona, uz nekoliko oštih pregiba koji odgovaraju energijama veza elektrona odgovarajućih ljudskih. Kako se fotoefekat odigrava samo na vezanim elektronima, to bi značilo da se ovaj proces može odigrati na bilo kojem vezanom elektronu u orbitali. Međutim, postoji direktna veza između energije veze elektrona i energije fotona. Verovatnoća da će se fotoefekat odigrati baš na elektronu sa energijom veze bliskoj energiji fotona je veća nego što je to slučaj kada energija fotona nadmašuje energiju veze elektrona. Ukoliko foton poseduje dovoljno velik iznos energije najveća je verovatnoća da će se fotoefekat odigrati baš na  $K$ -ljusci. Verovatnoća za odigravanje fotoefekta na  $K$ -ljusci je oko 5 puta veća od verovatnoće odigravanja na  $L$ -ljusci, odnosno oko 20 puta veća od procesa fotoefekta na  $M$ -ljusci. Opravdano, smatra se da se 80% od svih fotoefekata odigrava na  $K$ -elektronima, pod uslovom da fotonsko zračenje sadrži odgovarajući iznos energije.



Slika 3.3 Efikasni presek u funkciji energije

Efikasni presek za fotoefekat je prilično kompleksna funkcija energije kao što se to može i primetiti sa slike, te ne postoji jednostavan izraz kojim bi se ova zavisnost

mogla opisati valjano u širokom energetskom opsegu. Svakako, eksperimentalno se moglo doći do uspostavljanja određenih zaključaka i zavisnosti i oni će ovde biti navedeni. Primećeno je da je verovatnoća za fotoefekat pri  $E_\gamma > E_v^K$  proporcionalna sa  $E^{-\frac{7}{2}}$ . Kako se energija fotona dalje povećava,  $E_\gamma \gg E_v^K$ , ova zavisnost prelazi u  $E^{-1}$ . Takođe, primećeno je da je verovatnoća za fotoefekat u oba slučaja direktno proporcionalna sa  $Z^5$ . Ovako brz porast verovatnoće sa rednim brojem se objašnjava činjenicom da su i energije veze kod materijala sa većim rednim brojem, veće. Dakle, zavisnost efikasnog preseka od energije i rednog broja se može predstaviti kao:

$$\sigma \sim \frac{Z^5}{E^{\frac{7}{2}}}, \quad E_\gamma > E_v^K \quad (3.13)$$

$$\sigma \sim \frac{Z^5}{E}, \quad E_\gamma \gg E_v^K \quad (3.14)$$

Nakon procesa fotoefekta, jedan elektron se oslobađa i unutar orbitale gde se proces odigrao sada ostaje jedno prazno mesto na kojem je elektron bio. Ovo mesto popunjava neki od elektrona sa viših orbitala uz emisiju elektromagnetskog zračenja. Ukoliko se fotoefekat odigrao na  $K$ -ljusci, propratno elektromagnetsko zračenje će biti u oblasti frekvencija koje odgovara  $X$ -zracima, pa se kaže da je fotoelektrični efekat najčešće praćen i emisijom karakterističnog rendgenskog zračenja.

### 3.1.2.2 Komptonovo rasejanje

Za razliku od fotoefekta gde nakon odigranog procesa foton nestaje, kod rasejanja on samo biva skrenut sa svoje originalne putanje. Ovo rasejanje može biti koherentno i nekoherentno. Koherentno rasejanje fotona je ono rasejanje pri kojem ne dolazi do razmene energije između fotona i elektrona, već se foton samo rasejava i nastavlja svoje kretanje sa identičnom energijom, ali u drugom pravcu. Sa druge strane, nekoherentno rasejanje je rasejanje kod kojeg dolazi do razmene energije a samim tim i pravca upadnog fotona. Komptonovo rasejanje fotona predstavlja primer nekoherentnog rasejanja.

Kada je energija fotona znatno veća od energije veze elektrona tada dolazi do pojave nekoherentnog rasejanja. Ovom prilikom foton predaje izvesni deo energije elektronu i nastavlja da se kreće sa manjom energijom (ali većom talasnom dužinom) u drugom pravcu. Energija koju će foton zadržati nakon kolizije će zavisiti isključivo od ugla pod kojim se foton rasejao na elektronu. Ovo je pokazao Kompton 1923. godine:

$$E_f = \frac{E_{fo}}{1 + \frac{E_{fo}}{mc^2}(1 - \cos\theta)}, \quad (3.15)$$

gde  $E_{fo}$  predstavlja energiju sa kojom foton stupa u interakciju,  $\theta$  je ugao rasejanja a  $m$  je masa mirovanja elektrona. Jasno se iz jednačine vidi da za male uglove skretanja ( $\cos\theta \approx 1$ ) ceo imenilac postaje jedinica, odnosno dobijamo  $E_f \approx E_{fo}$ . Sa druge strane, najmanju energiju će imati foton koji se rasejava pod uglom od  $180^\circ$  (unazad). Za energije fotona  $E_{fo} \gg mc^2$ , energija rasejanog fotona se može predstaviti kao:

$$E_f \approx \frac{E_{fo}}{1 - \cos\theta} \quad (3.16)$$

Takođe, Kompton je uspeo pokazati da se razlika talasnih dužina upadnog i rasejanog fotona na određenom uglu uopšte ne zavisi ni od energije ni od rednog broja materijala na kojem se rasejanje vrši. Razlika talasnih dužina fotona pre i nakon interakcije se može predstaviti kao:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_o = \Lambda \cdot (1 - \cos\theta) = 2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (3.17)$$

gde je  $\lambda$  talasna dužina rasejanog fotona,  $\lambda_o$  je talasna dužina upadnog fotona dok se  $\Lambda$  izračunava kao:

$$\Lambda = \frac{h}{m_e c} = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ m} \quad (3.18)$$

i naziva se Komptonova talasna dužina elektrona. Dakle, nakon rasejanja foton će imati talasnu dužinu za iznos od  $\Delta\lambda$  veću nego što je to imao pre ulaska u interakciju.

Ukoliko foton doživi Komptonovo rasejanje u aktivnoj zapremini detektora prilikom detekcije gama zračanja, mi smo u stanju detektovati koliki iznos energije primi elektron, dok foton napušta detektor i u njegovoj aktivnoj zapremini ostavi samo deo svoje energije. Stoga, vrlo je korisno formulisati jednačinu putem koje se definiše koliko baš energije dobije elektron:

$$E_e = E_{fo} \frac{\frac{E_{fo}}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)}{1 + \frac{E_{fo}}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (3.19)$$

Elektron će dobiti maksimalni iznos energije za slučaj rasejanja fotona pod uglom od  $180^\circ$ . Za slučaj ogromne energije upadnog fotona ( $E_{fo} \gg mc^2$ ) energija koju dobije elektron je jednaka:

$$E_e \approx E_{fo} - \frac{1}{2} \cdot m_e c^2 = E_{fo} - 0,255 \text{ MeV} \quad (3.20)$$

Bitno je spomenuti da se i ukupni efikasni presek kao mera verovatnoće skretanja fotona pod određenim uglom za Komptonovo rasejanje može odrediti putem Klajn-Nišinine relacije. Sam izraz je vrlo komplikovan ali se može znatno uprostiti posmatranjem određenih energetskih oblasti. No, zajedničko za sve energetske oblasti jeste način ponašanja zavisnosti efikasnog preseka. Naime, ustanovljeno je da zavisnost oblika:

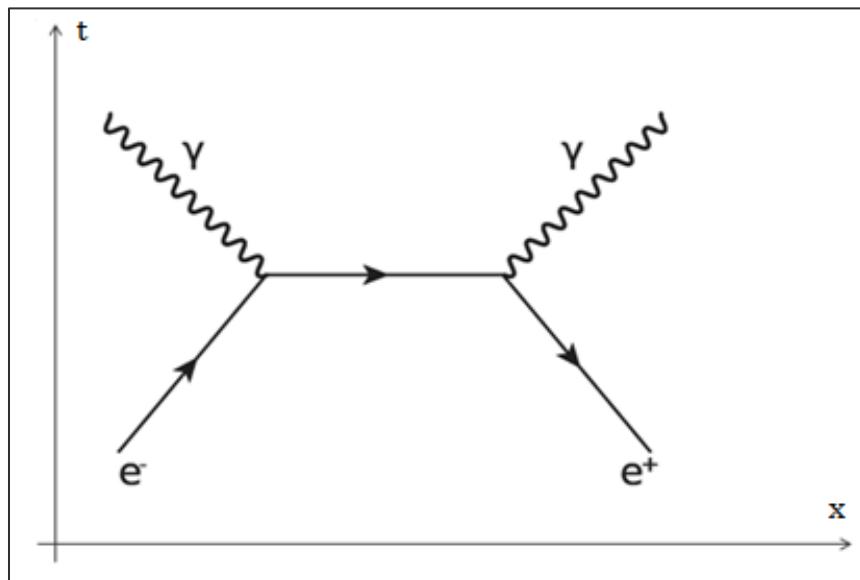
$$\sigma_C \sim \frac{Z}{E_f} \quad (3.21)$$

Dakle, kao i kod fotoefekta, verovatnoća za Komptonovo rasejanje opada sa porastom energije upadnog fotona, ali u mnogo manjoj meri jer su i redni broj i energija na prvi stepen, za razliku od fotoefekta.

### 3.1.2.3 Efekat stvaranja parova

Ukoliko je energija upadnog fotona dovoljno velika, moguće je da dođe do interakcije koja će rezultovati kreiranjem para čestica elektron i pozitron usled čega foton u potpunosti nestane. Pozitron, kao antičestica elektrona je predviđena od strane Diraka pre nego što je i bila uspešno eksperimentalno detektovana od strane Andersena 1932. godine. Pozitron poseduje identične atribute kao i elektron: masa, spin, magnetni moment i apsolutna vrednost nanelektrisanja. Ono po čemu se samo razlikuju jeste znak tog nanelektrisanja. Dok je elektron negativno nanelektrisan, pozitron je pozitivno nanelektrisan. Ovo je svakako bio prvi primer para čestice i antičestice. Sa razvojem fizike elementarnih čestica se ustanovilo da svaka čestica ima svoju antičesticu od koje se razlikuje samo po znaku nanelektrisanja.

Da bi došlo do kreacije para elektron-pozitron, upadni foton ne sme imati energiju manju od dvostrukе mase mirovanja elektrona, odnosno  $E_{fo} > 2 \cdot m_e c^2$ . Takođe, proces se ne može odigrati u praznom prostoru jer bi zakon održanja impulsa bio narušen, te zbog toga se mora odigrati u okolini nekog tela koje bi na sebe preuzeo deo impulsa nakon interakcije. To telo je atomsko jezgro, i najčešće se proizvodnja parova dešava u Kulonovom polju jezgra. Dakle, interakcija ne zauzima mesto u samom jezgru, već izvan njega, na rastojanju koje je definisano u prošlom poglavljju kao Komptonova talasna dužina elektrona  $\Lambda$ . Ukoliko foton poseduje energiju znatno veću od neophodnog praga interakcije ( $2 \cdot m_e c^2$ ), taj višak odlazi na kinetičku energiju elektrona i pozitrona. Nakon interakcije, elektron i pozitron počinju da se prostiru u pravcu kretanja upadnog fotona kao što je to prikazano putem Fajnmanovog dijagrama [12] na slici 3.4.



Slika 3.4 Efekat stvaranja parova

Proces stvaranja parova elektron i pozitron se može odigrati i u okolini elektrona, gde on sada na sebe preuzima određeni deo impulsa. Uslov za ovakav događaj je još veća energija inicijalnog fotona od čak  $4 \cdot m_e c^2$  ili više. Kako je elektron znatno laganiji od atomskog jezgra, impuls koji on dobija je istog reda veličine kao i impuls novonastalih čestica.

Pojednostavljeni izraz za efikasni presek za energetski opseg od praga reakcije pa do  $1000 \cdot m_e c^2$  izgleda kao:

$$\sigma_{par} \sim Z^2 \ln \left( \frac{E}{m_e c^2} \right) \quad (3.22)$$

Na višim energijama od spomenute gornje granice, izraz dobija novi oblik:

$$\sigma_{par} \sim 0,08 \cdot Z^2 \cdot r_e^2, \quad (3.23)$$

gde je  $r_e$  klasični radijus elektrona. Za razliku od fotoelektričnog efekta i Komptonovog rasejanja, efikasni presek kao verovatnoća prozivodnje parova raste sa povećanjem energije do neke granice, da bi nakon daljeg povećanja imao konstantnu vrednost. U slučaju da elektron i pozitron nakon interakcije imaju dovoljnu energiju oni su u mogućnosti da izazovu sekundarne jonizacije. Kada izgubi svoju kinetičku energiju, pozitron se sa prvim elektronom na koji najde anhilira, prilikom čega oboje nestaju uz emisiju dva fotona od po 512 keV pod uglom od  $180^\circ$ , čime zakoni održanja energije i impulsa ostaju ne povređeni.

### 3.1.2.4 Atenuacioni koeficijent u funkciji energije

Ranije je spomenuto da se atenuacioni koeficijent može predstaviti kao proizvod broja atoma u jedinici zapremine  $n$  i ukupnog efikasnog preseka za uklanjanje fotona iz snopa  $\sigma$ :

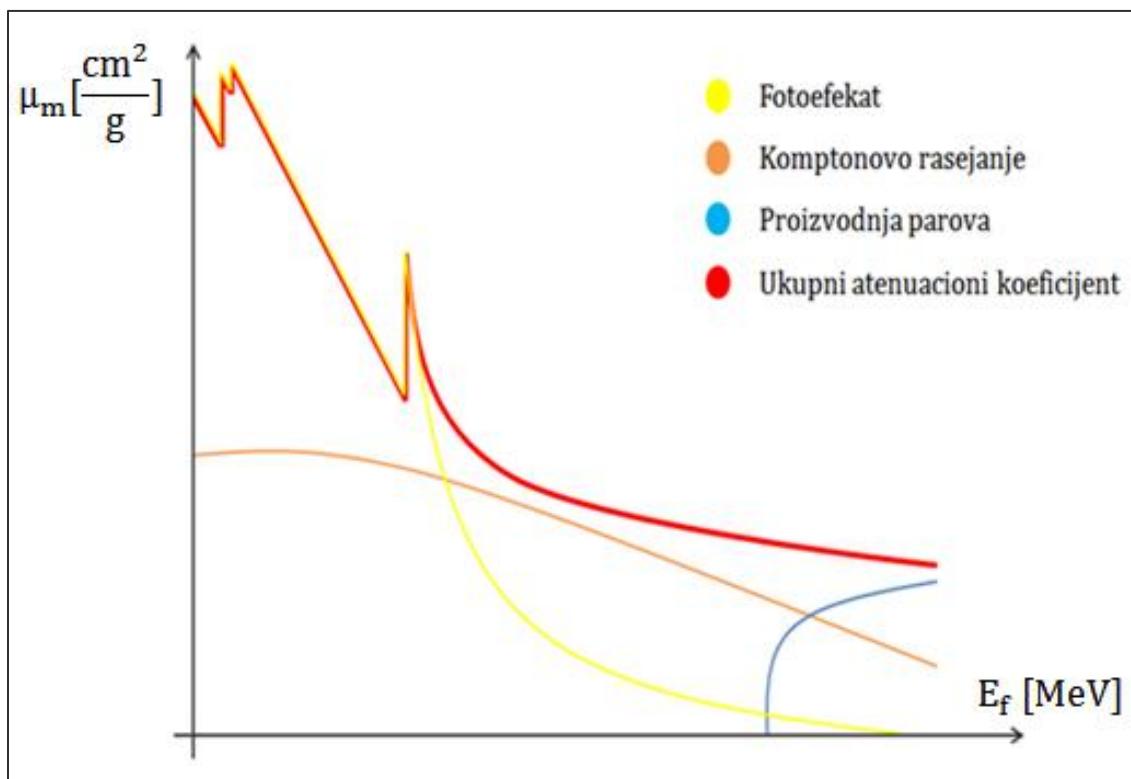
$$\mu = n \cdot \sigma \quad (3.24)$$

Takođe, predstavljeni su načini na koji fotoni mogu biti otklonjeni iz snopa. To znači da se ukupni efikasni presek u gornjem izrazu može dobiti kao suma pojedinačnih efikasnih preseka za svaki proces:

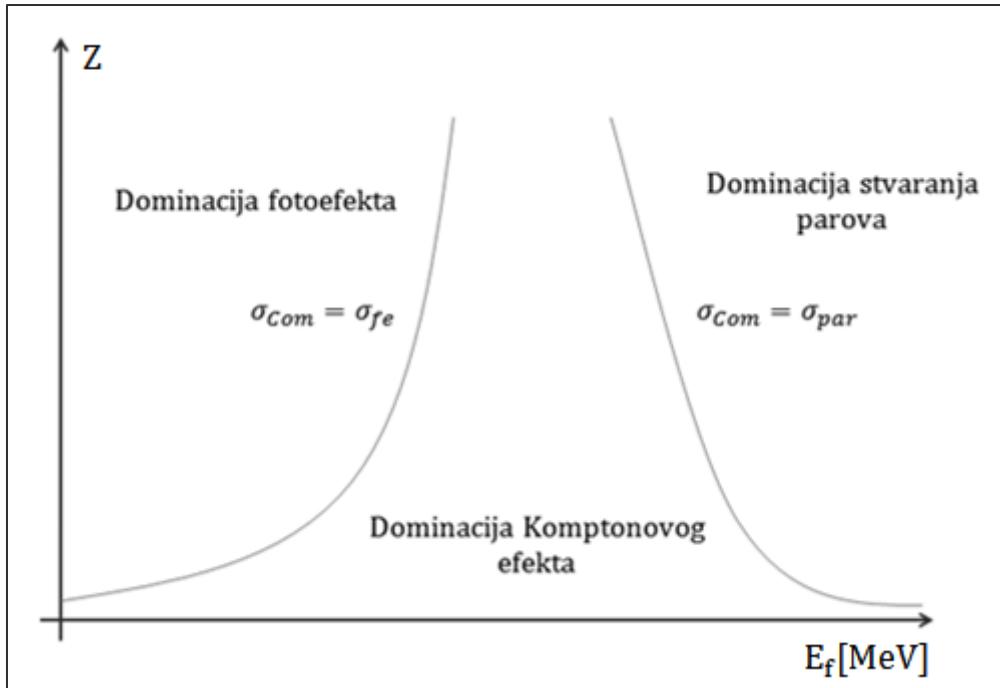
$$\sigma_u = \sigma_{fe} + \sigma_{Com} + \sigma_{par} \quad (3.25)$$

Vrednosti efikasnih preseka za fotoefekat i proizodnju parova se posmatraju za ceo atom, dok se efikasni presek za Komptonovo rasejanje posmatra za pojedinačni elektron. Takođe, u prethodnim poglavljima je opisano na koji način i kada efikasni preseci za različite procese zavise od rednog broja i energije upadnog fotona. Shodno tome, na niskim energijama imamo dominaciju fotoefekta dok na srednjim vrednostima

energija preovladava Komptonovo rasejanje. Kako efikasni presek za oba efekta opada sa porastom energije upadnog fotona, ukupni efikasni presek za ova procesa opada. Počev od 1,022 MeV, što predstavlja dvostruku masu mirovanja elektrona a samim tim i prag za proizvodnju parova, ukupni efikasni presek ponovo počinje da raste. Korisno je spomenuti da linearni atenuacioni koeficijent poseduje minimum na energijama od nekoliko MeV, i da baš u ovoj tački prodorna moć zračenja je maksimalna. Konačno, na slici 3.5 je predstavljena zavisnost ukupnog masenog atenuacionog koeficijenta (kao i svakog pojedinačnog) od energije upadnog fotoma, dok je na slici 3.6 predstavljena zavisnost rednog broja apsorbera u funkciji energije inicijalnog fotona.



Slika 3.5 Zavisnost ukupnog masenog atenuacionog koeficijenta od energije fotona



Slika 3.6 Zavisnost rednog broja apsorbera od energije fotona

## 3.2 Dozimetrija

Kvantifikacija efekata koje zračenje proizvodi se javlja kao potreba ubrzano nakon Rendgenovog otkrića  $X$ -zraka, odnosno otkrića radioaktivnosti od strane Bekerela, budući da su ova dva trenutka u istoriji razvoja fizike probudila nezapamćen interes za nuklearnu fiziku a samim tim i privukla velik broj ljudi koji je došao u kontakt sa jonizujućim zračenjem. Jedini način da se opišu efekti zračenja početkom 20. veka bili su iritacija i crvenilo kože, koji su se ubrzano razvili kod istraživača poput Bekerela i Pjer Kirija. Postalo je jasno da je neophodno okarakterisati ovo zračenje i saznati na koji način ono interaguje sa tkivom čoveka. Stoga, nova naučna disciplina pod nazivom dozimetrija je oformljena, čiji je zadatak da kvantitativno i kvalitativno opiše mehanizme pod kojima dolazi do predaje energije zračenja organskim strukturama kao i načinima izračunavanja i merenja doza [13].

### 3.2.1 Ekspoziciona doza

Ekspoziciona doza ili ekspozicija je veličina koja je uvedena i internacionalno prisvojena 1928. godine, a njome se opisuju kvantitativni efekti zračenja. Po definiciji, ekspozicija se može definisati kao odnos ukupnog naelektrisanja  $\Delta Q$  koje generiše

elektromagnetno zračenje u dатoj zapremini i mase  $\Delta m$  vazduha koja se obuhvata ovom zapreminom:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m} [\text{R}], \quad (3.26)$$

gde  $\Delta Q$  predstavlja ukupnu absolutnu vrednost nanelektrisanja jedne vrste (pozitivno ili negativno) koje se stvori u vazduhu kada svi sekundarni elektroni izgube dovoljno energije da prestanu da vrše sekundarne jonizacije, dok je  $\Delta m$  masa vazduha koja se nalazi u određenoj zapremini vazduha.

Jedinica za ekspozicionu dozu je rendgen i definiše se kao ona ekspozicija gama ili  $X$ -zračenja koja u jednom kubnom centimetru vazduha, pri normalnim uslovima, stvori jednu elektrostatičku jedinicu. U SI sistemu, jedinica za ekspoziciju je  $\frac{\text{C}}{\text{kg}}$ , a veza dveju jedinica je:

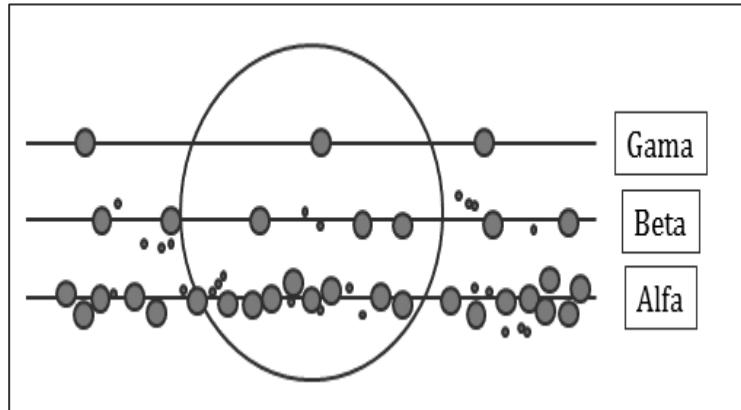
$$1 \frac{\text{C}}{\text{kg}} = 3876 \text{ R} \Rightarrow 1 \text{ R} = 2,68 \cdot 10^{-4} \frac{\text{C}}{\text{kg}} \quad (3.27)$$

Pri energijama fotona većim od 3 MeV, javljaju se sekundarne jonizacije koje mogu imati mnogo veći domet nego što su to dimenzije zapremine koju smo definisali u relaciji za ekspozicionu dozu. Samim tim, novonastale jonizacije van zapremine ne možemo pratiti i tačno reći koliko je ukupno nastalo nanelektrisanje kako to formula nalaže. Zbog ovoga, korisno je ceo izraz za ekspoziciju podeliti sa vremenom ozračivanja  $\Delta t$ , čime se ograničavamo na određeni vremenski interval i samo za njega "brojimo" nastala nanelektrisanja. Ovakva veličina se naziva brzina ekspozicije i definiše se kao:

$$\dot{X} = \frac{X}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta m \cdot \Delta t} \left[ \frac{\text{R}}{\text{s}} = \frac{\text{C}}{\text{kg} \cdot \text{h}} \right] \quad (3.28)$$

### 3.2.2 Apsorbovana doza

Osnovni nedostatak prethodno uvedene ekspozicije jeste povezivanje stvorenog nanelektrisanja sa biološkim i hemijskim promenama na tkivu izloženom zračenju. Ispostavilo se da je mnogo jednostavnije ove procese povezati sa energijom



Slika 3.7 Gustina jonizacionih događaja

koju zračenje ostavlja tkivu, pa je shodno tome od strane Internacionalne komisije za radijacione jedinice i mere ICRU<sup>10</sup> uvedena nova jedinica, apsorbovana doza  $D$  koja se definiše kao odnos energije koju zračenje preda određenoj zapremini sredine kroz koju se prostire i mase  $\Delta m$  sadržane u toj zapremini:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (3.29)$$

Apsorbovana energija  $\Delta E$  se meri u džulima i predstavlja razliku ukupne energije svih direktnih i indirektnih ionizujućih čestica koje uđu u posmatranu zapreminu i ukupne energije svih čestica koje napuste zapreminu. Ovako definisano,  $\Delta E$  predstavlja samo onaj iznos energije koji zaista ostane u zadatoj zapremini ozračenog materijala. Jedinica za apsorbovanu dozu je  $\frac{J}{kg}$  i naziva se grej ( $Gy = \frac{J}{kg}$ ). U praksi se koristi i sto puta manja jedinica rad. Dakle, veza je data kao  $1 Gy = 100 rad$ . Ukoliko se posmatra ozračivanje za samo jedan vremenski period, moguće je definisati i brzinu apsorbovane doze kao:

$$\dot{D} = \frac{D}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot \Delta m} \quad \left[ \frac{Gy}{s} \text{ ili } \frac{Gy}{h} \right] \quad (3.30)$$

Veza između ekspozicije i apsorbovane doze se može lako naći putem računanja tzv. energetskog ekvivalenta jedinične ekspozicije. Naime, srednji jonizacioni potencijal vazduha iznosi oko 33,85 eV. Za stvaranje jednog jonskog para u vazduhu treba utrošiti ovu energiju, a da bi se formirao  $1C$  nanelektrisanja jednog predznaka, potrebno je

<sup>10</sup> International Commission on Radiation Units and Measurements

stvoriti  $\frac{1}{e} = 6,25 \cdot 10^{18}$  jonskih parova. Množenjem ovog broja sa minimalnim iznosom energije sa formiranje jednog jonskog para dobija se veza:

$$1 \frac{\text{C}}{\text{kg}} = 33,85 \text{ Gy} \quad (3.31)$$

### 3.2.3 Ekvivalentna doza

Biološki efekti zračenja su različiti: hemijske promene organskih molekula, kreacija slobodnih radikala i jakih oksidanasa unutar ćelije, mutacija DNK i RNK lanaca itd. Naravno, neće svako ozračivanje izazvati identične efekte, niti će organizam uvek podjednako reagovati na različite tipove zračenja. Stoga, neophodno je bilo uvesti veličinu kojom bi se opisao kvalitet zračenja kako bi se precizno mogla definisati štetna dejstva koje ono uzrokuje. Pod kvalitetom zračenja se podrazumeva ionizaciona moć po jedinici puta zračenja. Drugim rečima, biološka oštećenja su direktno proporcionalna specifičnoj ionizaciji, odnosno broju jonskih parova koje se proizvede po jedinici puta. Takođe, korisno je definisati LET, odnosno linearni energetski transfer kao srednju energiju koju čestica zračenja ostavi po jedinici puta. Ilustrativno, na slici 3.7 je predstavljena gustina ionizacionih događaja u vodi za različite vrste zračenja.

Kako bi se različita biološka dejstva i numerički mogla proračunati, uvodi se ekvivalentna doza kao proizvod apsorbovane doze i kvaliteta zračenja:

$$H = D \cdot Q \quad (3.32)$$

Faktor kvaliteta  $Q$  je bezdimenziona veličina čija vrednost zavisi od LET-a. Vrednosti faktora kvaliteta zračenja se kreću od 1 – 20, i njegova zavisnost od specifične ionizacije je predstavljena u tabeli 3.1. Linearni energetski transfer se može izračunati iz veličine gubitka energije na ionizaciju po jedinici puta  $\left[ \frac{dE}{dx} \right]_j$ .

**Tabela 3.1** Zavisnost faktora kvaliteta  $Q$  od specifične jonizacije

Specifična jonizacija [Jonski par] $\mu\text{m}$	LET [ $\frac{\text{keV}}{\mu\text{m}}$ ]	$Q$
Manje od 100	Manje od 3,5	1
100 – 200	3,5-7,0	1-2
200 – 650	7,0-23	2-5
650 – 1500	23-53	5-10
1500 – 5000	53-175	10-20

**Tabela 3.2** Zavisnost faktora kvaliteta  $Q$  za različite tipove zračenja

Vrsta zračenja	$Q$
Rendgensko, gama, beta	1
Termalni neutroni	5
Neutroni i protoni	20
Alfa čestice	20
Teška jezgra	20

Sa druge strane, u tabeli 3.2 su prikazane vrednosti faktora kvaliteta za različite tipove zračenja shodno parametrima iz prethodne tabele.

Jedinica za ekvivalentnu dozu je takođe  $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$  kao i kod apsorbovane doze budući da je faktor kvaliteta u jednačini bezdimenziona veličina, pa je zbog svrhe razlikovanja uvedena jedinica sivert [Sv]. Kako bi se stekao osećaj za red veličine doza koje se mogu sresti pod raznim okolnostima ovde će biti navedeno nekoliko primera. Procenjeno je da osobe koje se profesionalno ne susreću sa izvorima zračenja, niti se nalaze pod terapijom ili dijagnostičkim medicinskim poduhvatima koji obuhvataju upotrebu zračenja, godišnje primaju od 1 mSv pa sve do 4 mSv. Zakonska regulativa u više zemalja je propisala da je maksimalna dozvoljena doza kojoj se profesionalci mogu izlagati jednaka 20 mSv godišnje. Prosečna doza jednog rendgenskog pregleda dostavlja ekvivalentnu dozu od nekoliko mSv, pa tako sa sigurnošću možemo reći da doze bez prefiksa ispred, tj. doze izražene u Sv sa kompletним ozračivanjem tela mogu imati terminalni učunak na odrasli organizam sisara. Procenjuje se da je srednja vrednost letalne doze za ljudski organizam oko 3 Sv.

### 3.3 Principi detekcije gama zračenja

Svaki uređaj koji je u mogućству da registruje ionizujuće ili neutronsko zračenje ili pak otkrije neku osobinu zračenja se naziva detektorom zračenja. Najprostiji među njima mogu da pruže samo informaciju da li je određeni deo zapreme izložen zračenju ili ne, dok se kompleksnijim detekcionim sistemima mogu meriti karakteristike zračenja (tip, energija, spin, magnetni moment itd). Karakteristike ovog zračenja nose sa sobom otisak atomskog jezgra koje ga je emitovalo, pa je i za izučavanje samog jezgra i njegove strukture bitno detaljno izučiti svojstva ovog zračenja. Detektor zračenja samim tim predstavlja objekat u kojem dolazi do interakcije zračenja i materije, i kao rezultat ove interakcije dolazi do generisanja impulsa tj. signala. Daljim procesuiranjem signala se dobijaju detalji o karakteru zračenja ili jezgra koje ga je emitovalo. Jedna od mnogih podela, svrstava detektore u dve velike grupe:

- Integralni detektori – detektori koji mere ukupan efekat prolaska zračenja kroz materijalnu sredinu. Koriste se kao instrumenti koji pružaju informaciju o energiji koju zračenje predaje materijalu.
- Diferencijalni detektori – detektori koji imaju sposobnost da registruju pojedinačne čestice zračenja. Jednostavniji oblici ovog detektora samo prebrojavaju tipove čestica, dok nešto kompleksniji mogu dati znatno više informacija o samoj čestici zračenja.

Na osnovu tipa informacije koju pružaju, detektore možemo podeliti na:

- Električne detektore – kod ovog tipa detektora se kao proizvod interakcije zračenja i aktivne zapreme detektora generiše kratkotrajni naponski impuls. Električni signal može nastati prikupljanjem ukupnog nanelektrisanja nastalog pri interakciji, ali može nastati i pri konverziji svetlosne energije usled scintilacija. Ovi detektori mogu pružiti informaciju o tipu, energiji, brzini, nanelektrisanju i masi nanelektrisanih čestica.
- Optičke detektore – ovaj tip detektora je u stanju da vizuelno prikaže putanju čestice zračenja, kao i putanje produkata interakcije čestice zračenja sa aktivnom zapreminom detektora. Ovi detektori pružaju informaciju o pravcu kretanja neke čestice, nanelektrisanju čestice kao i o geometrijskim uslovima pri koji se određeni raspodjeli sudar dogodio.

Karakteristike detektora, na osnovu kojih se deklariše njihov kvalitet i vrednost, su osobine detektora kojima se opisuju razne mogućnosti i načini detekcije ionizujućeg zračenja. Neke od najbitnijih karakteristika su:

- Efikasnost – predstavlja sposobnost detektora da registruje što veći broj čestica koji je na njega pao. Najčešće se izražava u procentima.
- Energetska rezolucija – predstavlja sposobnost detektora da razluči da događaja bliskih energija.
- Vremenska rezolucija – predstavlja ono vreme koje je detektoru potrebno da se “oporavi” od detekcije jedne čestice zračenja i bude spreman za detekciju drugih čestica zračenja. S tim u vezi je i mrtvo vreme detektora tj. ono vreme za koje detektor nije u sposobnosti da vrši detekciju čestica zračenja.
- Osetljivost – predstavlja sposobnost detektora da registruje vrlo niske intenzitete zračenja.

Od značaja za eksperimentalni deo ovog rada su poluprovodnički detektori sa kristalom germanijuma (HPGe) kao i scintilacioni detektori, pa će posebna pažnja biti posvećena njima.

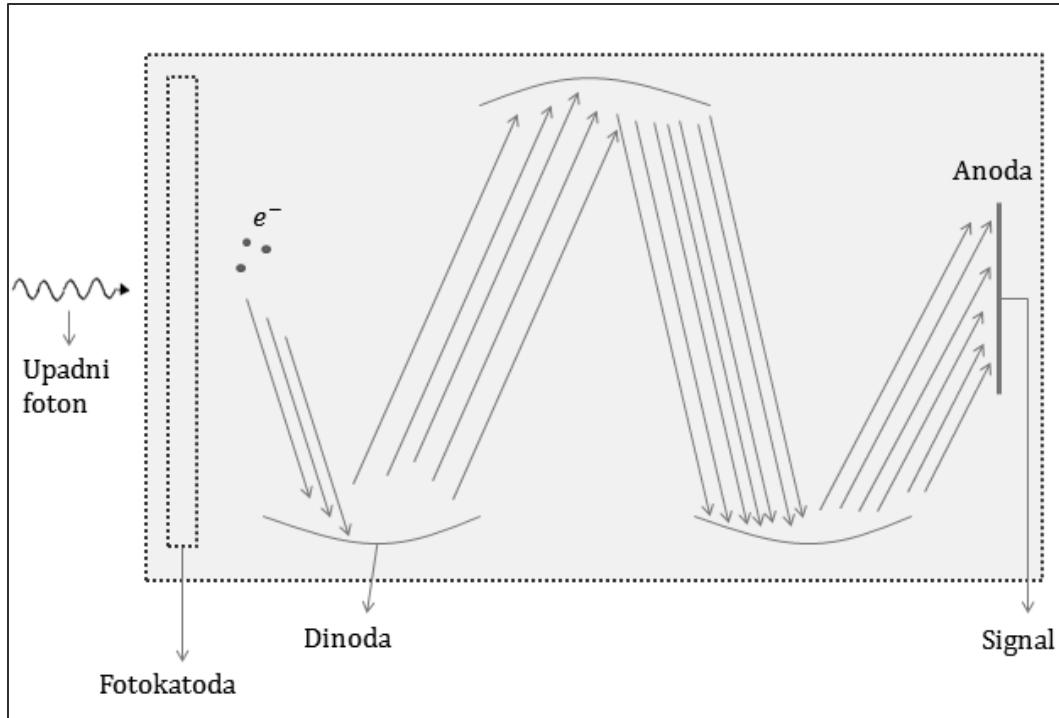
### 3.3.1 Scintilacioni detektori

Scintilacioni detektori su detektori koji ionizujuće zračenje detektuju putem scintilacija na materijalu koje se javljaju kao posledica interakcije. Osnovni detekcioni deo ovog sistema predstavlja sam scintilator koji može biti organskog i neorganskog porekla, jer su takvi scintilatori prozirni za sopstvenu svetlost<sup>11</sup>. Neki od primera organskih scintilatora su: naftalin, stilben, antracen i druge kristalne forme scintilatora. Takođe, ulogu scintilatora mogu igrati i tečne supstance, kao što su to ksilen i toluen. Sa druge strane, primeri neorganskih scintilatora su *NaI*, *CsF*, *CsI* itd. Neorganski scintilatori su u obliku monokristala i u čistoj formi oni nisu prozirni za sopstvenu svetlost. Tek nakon što se dopiraju u malim količinama (0,1%) određenim elementima koji se nazivaju aktivatori, oni postaju prozirni. Najpoznatiji primer dopiranog neorganskog scintilatora je *NaI(Tl)*.

---

<sup>11</sup> Talasna dužina svetlosti koju telo apsorbuje je jednaka talasnoj dužini koju telo emituje.

Intenzitet scintilacije koja se emituje nakon pobude je kratkotrajan i opada eksponencijalno sa vremenom. Kratko vreme trajanja impulsa predstavlja glavnu prednost ovih detektora, pa je tako moguće dostići brzine brojanja koje su čak nekoliko redova veličina veće nego što je to slučaj kod gasnih detektora. Deo energije detektovane čestice koji se pretvori u svetlost se naziva konveziona efikasnost. Kod neorganskih kristala ona uglavnom iznosi oko 5 do 10%, gde najbolju konverzionu efikasnost ima baš  $NaI(Tl)$ . Kako bi se od jednog scintilacionog materijala konstruisao detektor, neophodno je nastale svetlosne impulse pojačati i transformisati u oblik u kojem se oni lako mogu obrađivati (najlakši način bi bio da se ovi svetlosni signali prebace u električne). Ovo se lako može postići putem fotomultiplikatora koji je predstavljen na slici 3.8. Fotomultiplikator je cilindrična cev na čijem se jednom kraju nalazi prozor transparentan na svetlost koju emituje scintilator. Ispod prozora se nalazi fotokatoda od materijala koji ima vrlo mali izlazni rad, kako bi što lakše bilo izbjegati elektrone. Nakon što se javi scintilacija, svetlost pada na fotokatodu i iz nje izbjegi elektrone koji se zatim na putu do anode ubrzavaju preko sistema dinoda (gde se svaka  $n + 1$  dinoda nalazi na većem naponu, što se postiže razdelnikom napona). Elektroni koji padnu na prvu dinodu iz nje izbjegaju 3 – 10 novih elektrona, koji se zatim rastućim električnim poljem ubrzavaju i opet sudaraju sa dinodama. Proces se sukcesivno ponavlja sve do poslednje dinode, kada se broj elektrona može povećati za nekoliko



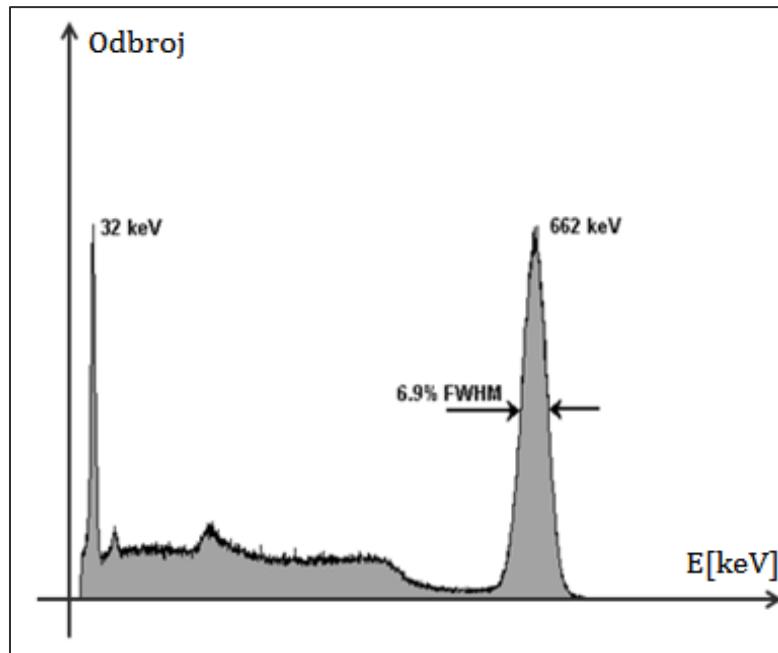
**Slika 3.8** Fotomultiplikator

redova veličine, čak do  $10^{18}$  puta. Iza poslednje dinode se nalazi anoda koja je najvišem potencijalu, i kao takva prikuplja sve novonastale elektrone. Dalje, na anodi se formira kratkotrajan naponski signal čiji intenzitet odgovara svetlosti koja je pala na fotokatodu. Kako je količina svetlosti koja padne na fotokatodu srazmerna sa energijom zračenja koje izaziva scintilacije, jasno je da postoji i direktna veza između visine naponskog signala i registrovane energije u scintilatoru. Ova osobina daje mogućnost ovim detektorima da registruju energije pojedinačnih čestica zračenja, ali samo pod uslovom da one ostave svoju kompletну energiju unutar aktivne zapremine detektora. Prilikom konstrukcije detektora, vrlo je pogodno ostvariti optički kontakt između prozora fotomultiplikatora i scintilacionog materijala. Na taj način, na fotomultiplikator će padati fotoni isključivo nastali iz kristala scintilatora, te time osigurati da nema interferencije nekih spoljašnjih fotona. Takođe je vrlo poželjno da sam kristal bude izведен u obliku monokristala kako bi se izbegle sve nepoželjne refleksije i gubici. Zbog mnogih prednosti koje poseduju, scintilacioni detektori su našli široku primenu. U prethodnim poglavljima su opisani načini interakcije gama zračenja sa materijom kao i odgovarajuće zavisnosti vezane za atenuaciju tog zračenja. Pa tako, verovatnoća interakcije zračenja raste sa porastom broja atoma po jedinici zapremine tj. gustine i rednog broja materijala kroz koje se zračenje prostire. Kako je aktivna zapremina scintilacionog detektora čvrsto telo, efikasnost će im biti nekoliko redova veličine veća nego što je to slučaj kod gasnih detektora. Ovo posebno važi za neorganske scintilatore, kako su oni sačinjeni od materijala prilično visokog rednog broja ( $I$  ili  $Cs$ ), čime im se dodatno povećava efikasnost. Detektori sa neorganskim scintilatorom su doživeli veoma široku primenu u gama spektroskopiji. Kako verovatnoća za fotoefekat raste sa  $Z^5$ , visok redni broj neorganskog scintilatora predstavlja odličnu sredinu za odvijanje fotoelektričnog efekta pod uslovom da se ne radi o velikim energijama upadne čestice zračenja koja izaziva scintilacije. Implicitno, fotoelektrični efekat je proces u kojem foton u potpunosti nestaje, što je vrlo pogodno budući da smo tada u mogućnosti odrediti inicijalnu energiju sa kojom je foton stupio u interakciju sa scintilatorom. Ova osobina čini neorganske scintilacione detektore veoma pogodnim za određivanje energije fotona u gama ili X-spektroskopiji. Karakteristična linija  $^{137}Cs$  merena  $NaI(Tl)$  detektorom, prikazana je na slici 3.9. Sa slike se jasno može videti da su pikovi registrovani tek nakon što je foton ostavio svoju kompletну energiju u detektoru. Ovaj pik ima oblik Gausove funkcije, a njenom širinom je određena energetska rezolucija detektora (FWHM<sup>12</sup> parametar). Takođe, sa iste slike se mogu primetiti i pozadinski pikovi, odnosno pikovi manjeg odbroja koji potiču od interakcija fotona sa kristalom, ali

---

<sup>12</sup> Full Width at Half Maximum.

sada putem Komptonovog rasejanja, gde se kristalu preda samo mali deo energije fotona.



Slika 3.9 Karakteristična linija cezijuma

Nasuprot neorganskim, organski scintilatori imaju veoma dobру vremensku rezoluciju. Trajanje emisije luminescentne svetlosti je kod njih veoma kratko što ih čini pogodnim za detekciju velikog broja događaja, pa se zato i koriste u sistemima gde se meri niz brzih sukcesivnih događaja. Kako plastični i tečni scintilatori nemaju tako visok redni broj kao što je to slučaj kod neorganskih scintilatora, oni se ne mogu koristiti za određivanje energije fotona u spektroskopiji budući da čestica zračenja sa njima prvenstveno interaguje putem Komptonovog rasejanja.

### 3.3.2 Poluprovodnički detektori

Poluprovodnički detektori su detektori koji sadrže materijale klasifikovane kao poluprovodnici za svoju aktivnu zapreminu. Pri konstrukciji detektora najbitnije je zadovoljiti dva najvažnija kriterijuma:

1. Zračenje mora lako da odvoji elektrone od atoma aktivne zapremine detektora
2. Električno polje detektora mora prikupiti samo one elektrone nastale udaljavanjem od atoma aktivne zapremine detektora.

Prvi uslov je relativno lako zadovoljen kod metala, kako su kod njih valentna i provodna zona praktično preklopljene, pa elektroni bez problema mogu da prelaze u provodnu zonu. Drugi uslov je zadovoljen kod izolatora, budući da kod njih postoji energetski procep između valentne i provodne zone, tako da elektroni mogu da "skoče" do provodne zone samo ukoliko im se dovede određeni iznos energije. Materijali koji istovremeno poseduju osobine metala i izolatora se nazivaju poluprovodnicima, te su zbog toga vrlo pogodni za konstrukciju detekcionih sistema. Ovakav tip detektora ima znatno višu efikasnost od gasnih detektora, dok njihova nenadmašiva prednost jeste svakako odlična energetska rezolucija (ova sposobnost detektora da razluči pikove vrlo bliskih energija je dovela do ogromne upotrebe ovih detekcionih sistema u gama spektroskopiji).

Poluprovodnici su materijali koji se po svojim prirodnim svojstvima nalaze između metala i izolatora. To su na primer, kristali *Ge* i *Si*, koji se u čistom stanju nalaze u obliku kristala, i pri sobnim temperaturama nemaju zavidnu električnu provodnost. Oba elementa su četvorovalentna, i sva četiri elektrona su uključena u kovalentnim vezama sa susednim atomima. Da bi jedan elektron napustio kovalentnu vezu, neophodno mu je dovesti energiju reda veličine 1 eV. Ono po čemu su poluprovodnici karakteristični jeste manipulacija električne provodljivosti dodavanjem primesa u zadatim koncentracijama. Ukoliko u četvorovalentni kristal Si dodamo primesu jednog petovalentnog elementa, kakav je fosfor ili astan, njegova električna provodnost se drastično menja. Konkretno, dodavanjem astana u kristal silicijuma se dobija tzv. poluprovodnik n-tipa. Kod ovog tipa poluprovodnika sve četiri kovalentne veze su i dalje "okupirane", ali zbog prisustva petovalentnog elementa, postoji jedan elektron po atomu astana koji nije uključen u kovalentnu vezu. Ovako nevezanom elektronu je potreban mnogo manji iznos energije kako bi se osloboudio, svega 0,05 eV. Ovakvom formacijom, obično se kaže da ovi slabo vezani elektroni formiraju tzv. donorski nivo. Donorski nivo predstavlja energetski nivo koji se nalazi u prostoru između valentne i provodne zone. Ovaj nivo se nalazi ispod provodne zone za već pomenutih 0,05 eV kod kristala silicijuma, odnosno 0,01 eV kod kristala germanijuma. Ovim su provodna svojstva poluprovodnika n-tipa znatno poboljšana, budući da se slabo vezani elektroni petovalentnog elementa mogu lako prebaciti u provodnu zonu, što čini elektrone glavnim nosiosima nanelektrisanja kod poluprovodnika ovog tipa.

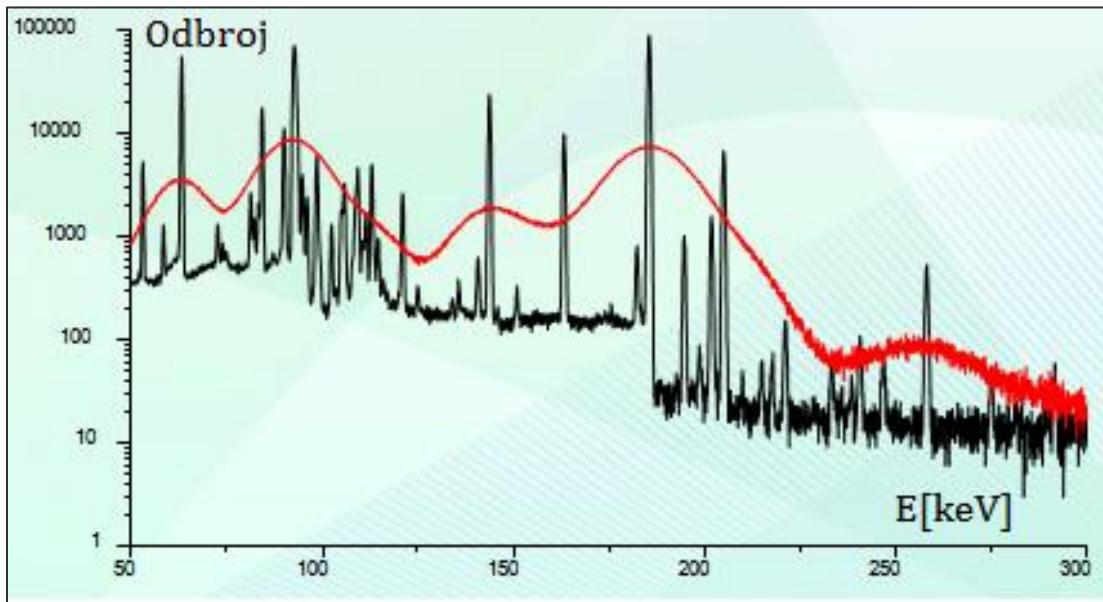
Sa druge strane, dodavanjem trovalentnih primesnih atoma dobijaju se poluprovodnici p-tipa. Jasno je da će zbog nedostaka jednog elektrona kod primesnih atoma dovesti do nepotpunjena jedne kovalentne veze. To znači da će svaki atom

primese u kristal četvorovalentnog poluprovodnika uneti po jednu šupljinu<sup>13</sup>. Okolni elektroni ne moraju uložiti puno energije kako bi popunili ovu šupljinu, svega 0,05 eV kod kristala silicijuma, odnosno 0,01 eV kod kristala germanijuma. Samim tim, postoji prostorno kretanje nanelektrisanja i provođenje struje bez prebacivanja elektrona u provodnu zonu. Teorija zona kaže da se u ovom slučaju generiše akceptorski nivo koji se nalazi iznad valentne zone za pomenute vrednosti od 0,05 eV, odnosno 0,01 eV.

Ukoliko se ostvari kontakt između dva poluprovodnika različitog tipa, tj. p i n tipa, dolazi do formacije tzv. p-n spoja. Tada, elektroni iz poluprovodnika n-tipa difunduju ka poluprovodniku p-tipa kako bi popunili prisutne šupljine. Kao rezultat difuzionih procesa, dolazi do stvaranja viška negativnog nanelektrisanja zbog velikog broja prispeleih elektrona u poluprovodniku p-tipa, dok se zbog napuštenih elektrona u poluprovodniku n-tipa javlja višak šupljina. Proces difuzije nanelektrisanja će se odvijati sve dok se na spoju ne generiše električno polje dovoljnog intenziteta da onemogući dalju preraspodelu nanelektrisanja. Na ovaj način se stvara kontaktni potencijal između poluprovodnika. Deo poluprovodnika oko spoja u kome se odigravaju difuzionu procesi se naziva oblast prostornog nanelektrisanja. U ovoj oblasti postoji električno polje slično kao kod kondenzatora, ali uz tu razliku da je prostor u kojem vlada ovo električno polje ispunjen poluprovodnikom a ne vazduhom. Gustina poluprovodničkih materijala je nekoliko redova veća od gustine gasova koji se koriste kod gasnih brojača čineći ih znatno efikasnijim. Za niskoenergetske čestice, efikasnost poluprovodničkog detektora može ići i do 100%. Dodatna prednost poluprovodničkog detektora jeste prag nastanka jonskog para unutar kristala poluprovodnika. Drugim rečima, dve identične čestice sa identičnom energijom će proizvesti različit broj jonskih parova unutar gasnog i poluprovodničkog detektora, pod uslovom da se u potpunosti zaustavi (gde je količina formiranog nanelektrisanja direktno proporcionalna energiji upadne čestice zračenja). Neodređenost merenja energije čestice može poticati od mogućih fluktuacija u prikupljenoj količini nanelektrisanja. Fluktuacije su po prirodi statističke, što znači da će od količine nanelektrisanja prikupljene u detektoru zavisiti sa kolikom će se tačnošću odrediti energija posmatrane čestice. Kako se u poluprovodničkim detektorima formira znatno više jonskih parova prilikom interakcije, jasno je da će i tačnost određivanja energije biti mnogo veća kod ovih detektora. To konačno znači da poluprovodnički detektori poseduju znatno bolju energetsku rezoluciju nego bilo koji drugi detektor (Slika 3.10).

---

<sup>13</sup> Šupljine zapravo predstavljaju prazna, nepunjena mesta na kojima bi se mogli nalaziti elektroni. Tehnički, šupljina se može definisati kao kvazinaelektrisanje koje se uvek kreće u smeru suprotnom od kretanja elektrona.



**Slika 3.10** Energetska rezolucija poluprovodničkih detektora

Od posebne važnosti su tzv. HPGe (*High purity germanium detectors*), odnosno poluprovodnički detektori koji za aktivnu zapreminu koriste kristale germanijuma izuzetno visoke čistoće. Kako bi se osigurala što veća preciznost pri merenju, ovi detektori se moraju hladiti tečnim azotom kako bi se sprečila termalna otcepljivanja elektrona. Zasebna vrsta ovih detektora koja se koristi za merenja niskih energija se naziva LEGe (*Low Energy Germanium detectors*).

### 3.4 In-situ gama sprekrometrija

In situ gama sprekrometrija predstavlja nedestruktivnu metodu koja se koristi na terenu za brzu identifikaciju radioaktivnog materijala i određivanje njegovog izotopskog sastava. Prilikom detekcije, razmatraju se vrste materijala koje su se empirijske najviše sretale: NORM<sup>14</sup>, medicinski izotopi, industrijski izotopi, specijalni nuklearni materijal kao i mešavina ovih materijala.

Za brzu i jednostavnu metodu utvrđivanja prisustva specifičnih izotopa se koriste ručni gama spektrometri bazirani na kristalima  $NaI$ ,  $LaBr_3$ ,  $CdTe$ ,  $CdZnTe$  itd. Spektrometri nemaju visoku rezoluciju, i ne zahtevaju nikako specijalno upravljanje budući da se identifikacija izotopa vrši automatski, pri predefinisanom algoritmu. Ove osobine ga čine odličnim i lakim za rukovanje od strane lica koja prva stiže na mesto zločina (policajci ili vatrogasci) i koja vrše inicijalnu identifikaciju radioaktivnih

<sup>14</sup> Naturally Occurring Radioactive Material

materijala. Sa druge strane, za mnogo detaljniju analizu zadužen je MEST (*Mobile Expert Support Team*) koji sa detektorima visoke rezolucije i odgovarajućim softverom za analizu gama spektara vrši finu kategorizaciju i karakterizaciju nuklearnog materijala. Najčešće se koristi *HPGe* detektor zbog svoje odlične energetske rezolucije, koji se može na terenu javiti u dve varijante: laboratorijska verzija detektora koja je prilično glomazna i zahteva hlađenje tečnim azotom i kompaktna verzija ovog detektora sa osmišljenim električnim hlađenjem i ugrađenim algoritmima za analizu spektara. Kompaktnost detektora sa elektronskim hlađenjem je nenadmašiva jer je vrlo pogodan za terenska merenja i uspeva da relativno brzo i precizno pruži neophodnu informaciju. Međutim, iako vrlo težak za terensko održavanje (mora postojati izvor napajanja, izvor za hlađenje tečnim azotom i sl.), laboratorijski vid *HPGe* detektora je mnogo precizniji i nezaobilazan je za neka "ozbiljnija" merenja.

Zaštita na radu osoba koje prve stižu na teren se mora sprovesti u skladu sa nacionalnim regulacijama. Radijacione doze MEST-a i drugih timova koji se šalju na mesto zločina se moraju održavati poštujući ALARA<sup>15</sup> princip. Svako merenje je neophodno zavesti sa informacijama o lokaciji (poželjno je imati informaciju o GPS koordinatama), datumu, vremenu, opremi u upotrebi i izmerenoj dozi. U cilju što efikasnijeg pribavljanja informacija, napravljen je upitnik koji se pruža članovima MEST-a, kako bi što pre došli do vitalne informacije.

Što se tiče samih uzoraka koji se javljaju na mestu zločina, ne postoji predefinisano pravilo po kojem su oni zastupljeni. Oni se javljaju u proizvoljnoj fizičkoj i hemijskoj kompoziciji. Uglavnom se analiziraju kao celina, bez deljenja u manje uzorce. Tipično, terenska merenja traju oko 20 minuta kako bi se pribavilo dovoljno informacija da bi se materijal kategorizovao. Naravno, ne može se očekivati prevelika preciznost zbog veoma kratkog vremena izlaganja uzorka detektoru. Kako bi se u ovom vremenskom prozoru poboljšala statistika odbroja, neophodno je ukloniti bilo kakvu zaštitu koja se nalazi između uzorka i detektora. Debljina zaštite i rastojanje detektora od uzorka se mora podesiti u optimalan položaj kako bi se ostvario kompromis između stope odbroja i mrvog vremena detektora, što rezultira najboljom odbrojnom statistikom za ovako mali vremenski interval. Naravno, ukoliko je to moguće, neophodno je udaljiti uzorak od drugih izvora radijacije kako bi smo osigurali da je samo izvor od interesa u polju detektora.

---

<sup>15</sup> As Low As Reasonably Achievable.

## 4. Nuklearni materijali

Kao celina, jezgro može biti stabilno ili nestabilno. Ne postoji jasno definisana granica između ove dve grupe, ali postoje okvirni limiti. Ukoliko se broj jezgara nije značajno smanjio za vremenski interval od  $10^{10}$  godina, na koliko se procenjuje starost vidljivog dela Univerzuma, njih smatramo stabilnim jezgrima. Za sva ostala jezgra, koja se raspadaju brže od zadatog intervala, kažemo da su radioaktivna ili nestabilna. Najteži stabilni prirodni element u prirodi je olovo  $_{82}Pb$ , dok je  $^{238}U$  najteži prirodni radioaktivni element. Naravno, u laboratorijama se uspeo proizvesti niz drugih elemenata, čak preko 2000, ali zbog svog kratkotrajnog životnog veka se svrstavaju u nestabilne radionuklide. U nuklearnoj forenzici se najčešće sreću slučajevi koji uključuju radioizotope uranijuma i plutonijuma, pa će više reči biti o njima.

### 4.1 Uranijum

Nemački hemičar M.H.Klaproth je 1789. godine otkrio element koji u svom nukleusu sadrži čak 92 protona, što ga je kvalifikovalo za titulu najtežeg prirodnog hemijskog elementa. U čast planete Uran, element je nazvan uranijum. Prirodna izotopska kompozicija uranijuma izgleda kao: 99,2742% za  $^{238}U$ , 0,7202% kod  $^{235}U$  i 0,0056% za  $^{234}U$ . Koncentracija  $^{235}U$  ispod 0,7202% u ukupnom izotopskom sastavu se naziva i osiromašeni uranijum, dok se koncentracija  $^{235}U$  iznad 0,7202% u totalnoj izotopskoj kompoziciji naziva nisko obogaćenim uranijumom. Kada je izotop  $^{235}U$  prisutan preko 90% u ukupnom sastavu, tada se radi o slučaju visoko obogaćenog uranijuma koji se koristi u vojne svrhe.

Svi izotopi uranijuma su radioaktivni. Zapravo,  $^{238}U$  i  $^{235}U$  su začetnici dva od tri prirodna radioaktivna niza koja se završavaju izotopima olova  $^{206}Pb$  i  $^{207}Pb$ , respektivno, dok  $^{234}U$  nastaje raspadom  $^{238}U$ . Većina uranijumskih izotopa podleže alfa raspadu, budući da alfa čestica kod jezgara sa velikim rednim brojem ima veću verovatnoću za tunel efekat i napuštanje jezgra, dok su neki podležni i reakciji nuklearne fisije ( $^{234}U$ ,  $^{235}U$ ,  $^{236}U$ ,  $^{238}U$ ), uz dosta manju verovatnoću za odigravanje. U praksi, najprimenjiviji izotopi uranijuma su  $^{238}U$  i  $^{235}U$ , jer se vrlo lako mogu uvesti u reakciju fisije bombardovanjem termalnim ili brzim neutronima. Što se tiče samih fizičkih osobina, uranijum je težak, mekan, srebrno beli metal koji je čak 65% teži od olova.

Popularnost primene osiromašenog uranijuma se ogleda u njegovoј visokoj gustini i pritom niskoj ceni. Široko se koristi u zaštiti od radijacije, konstrukciji svemirskih brodova, kod iskopina u naftnim bušotinama, za izradu metkova itd. Nisko i

visoko obogaćeni uranijum se koriste kao gorivo u nuklearnim elektranama. Danas se često javlja tendencija transformacije uranijuma za vojne svrhe u nisko obogaćeni uranijum (koncentracija  $^{235}U$  manja od 20%), kako bi se baš on mogao iskoristi za gorivo u elektranama. Ovo je moguće ukoliko se visoko obogaćeni uranijum "razblaži" prirodnim ili osiromašenim uranijumom. U kojem god obliku i sastavu, uranijum predstavlja zdravstveni hazard. Sa tkivom reaguje hemijskim putem, ali i putem radioaktivnosti.

Putem jednačine, pominjana koncentracija  $^{235}U$  se može zapisati u vidu koeficijenta obogaćenja kao:

$$E_a = \frac{N(^{235}U)}{N(U)} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

gde  $N(^{235}U)$  predstavlja broj atoma  $^{235}U$ , a  $N(U)$  broj atoma svih izotopa. Takođe se ovaj odnos može predstaviti i preko masene koncentracije:

$$E_a = \frac{m(^{235}U)}{m(U)} \cdot 100\%, \quad (33.2)$$

gde su mase izražene u gramima. U tabeli 4.1 su predstavljeni svi poznati izotopi uranijuma sa propratnim informacijama.

**Tabela 4.1** Izotopi uranijuma [14]

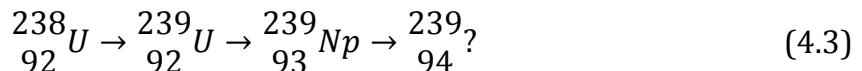
Nuklid	$T_{1/2}$	Mod raspada i radijacija	Metod proizvodnje
$^{227}U$	1,1 min	$\alpha: 100\%$ $\gamma: ^{232}Th$	$^{235}Th(\alpha, 9n)$
$^{228}U$	9,1 min	$\alpha > 95\%$ $e.z. < 5\%$	$^{233}U(\alpha, 8n)$ $\alpha$ raspad $^{232}Pu$
$^{229}U$	58 min	$\alpha: 20\%$ $e.z.: 80\%$	$^{232}Th(\alpha, 7n)$ $\alpha$ raspad $^{233}Pu$

$^{230}U$	20,8 dana	$\alpha: 100\%$ $\gamma: {}^{226}Th$	${}^{232}Th(\alpha, 6n)$ $\beta^-$ raspad ${}^{230}Pa$ $\alpha$ raspad ${}^{234}Pu$
$^{231}U$	4,2 dana	$\alpha: 4 \cdot 10^{-3}\%$ $e.z.: 100\%$ $\gamma: {}^{223}Th$	${}^{235}Th(\alpha, 5n)$ ${}^{231}Pa(d, 2n)$ $\alpha$ raspad ${}^{235}Pu$
$^{232}U$	68,9 god	$\alpha: 100\%$ $\gamma: {}^{228}Th$	${}^{232}Th(\alpha, 4n)$ $\beta^-$ raspad
$^{233}U$	$1,59 \cdot 10^5$ god	$\alpha: 100\%$ $\gamma: {}^{229}Th$	$\beta^-$ raspad ${}^{233}Pa$
NORM			
$^{234}U$	$2,45 \cdot 10^5$ god	$\alpha: 100\%$ $\gamma: {}^{230}Th$	$\beta^-$ raspad ${}^{234}Pa$ $\alpha$ raspad ${}^{238}Pu$ ${}^{233}U(n, \gamma)$
$^{235m}U$	26,5 min	<i>i.t.:</i> 100%	$\alpha$ raspad ${}^{238}Pu$
NORM			
$^{235}U$	$7,04 \cdot 10^8$ god	$\alpha: 100\%$ $\gamma: {}^{231}Th$	$\beta^+$ raspad ${}^{235}Np$ $\beta^-$ raspad ${}^{235}Pa$
$^{236}U$	$2,34 \cdot 10^7$ god	$\alpha: 100\%$ $\gamma: {}^{232}Th$	$\beta^+$ raspad ${}^{236}Np$ $\alpha$ raspad ${}^{240}Pu$ ${}^{235}U(n, \gamma)$
$\beta^-$ raspad ${}^{233}Pa$			
$^{237}U$	6,75 dana	$\beta^-: 100\%$ $\gamma: {}^{237}Np$	$\alpha$ raspad ${}^{241}Pu$ ${}^{238}U(n, 2n)$ ${}^{235}U(n, \gamma)$
$^{238}U$	$4,46 \cdot 10^9$ god	$\alpha: 100\%$ $\gamma: {}^{234}Th$	NORM
$^{239}U$	23,45 min	$\beta^-: 100\%$ $\gamma: {}^{239}Np$	${}^{238}U(n, \gamma)$ ${}^{235}U(d, p)$
$^{240}U$	14,1 sati	$\beta^-: 100\%$ $\gamma: {}^{240}Np$	$\alpha$ raspad ${}^{244}Pu$ ${}^{238}U(2n, \gamma)$

e.z. – zahvat elektrona, i.t. – izomerska tranzicija

## 4.2 Plutonijum

Prvi put, plutonijum je proizveden od strane E.Macmillan-a i P.Abelson-a pri izvođenju eksperimenata na ciklotronu u Lorencovoj laboratoriji na univerzitetu u Kaliforniji. Oni su posmatrali formaciju neptunijuma u uranijumskim metama koje su bombardovali neutronima:



Bombardovanjem  $^{238}_{92}U$  neutronima se zapazilo formiranje  $^{239}_{92}U$ , koji se odmah potom  $\beta$  raspada do  $^{239}_{93}Np$ , koji se takođe raspada do elementa od interesa, a to je plutonijum  $^{239}_{94}Pu$ . Zbog svog velikog poluživota i niske specifične aktivnosti, u to vreme ovaj novi element nije mogao biti identifikovan.

Danas, postoji preko 25 sintetizovanih izotopa plutonijuma, od kojih se 16 još detaljno istražuje dok je kod četiri njih pronađena praktična primena. Svi ovi izotopi nastaju veštačkim putem, i njihovo prisustvo u okolini predstavlja posledicu namernog ozračivanja uranijuma. U tabeli 4.2 su predstavljeni svi izotopi plutonijuma sa propratnim informacijama.

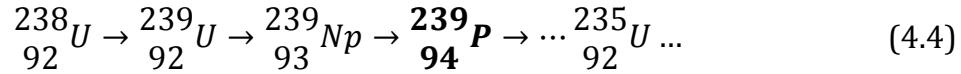
**Tabela 4.2** Izotopi plutonijuma [15]

Nuklid	$T_{1/2}$	Mod raspada i radijacija	Metod proizvodnje
$^{232}Pu$	33,8 min	e.z.: 90% $\alpha$ : 10% $\gamma$ : $^{232}Np$	$^{235}U(\alpha, 7n)$
$^{233}Pu$	20,9 min	e.z.: 99,8% $\alpha$ : 0,1%	$^{233}U(\alpha, 4n)$
$^{234}Pu$	8,8 sati	e.z.: 94% $\alpha$ : 6%	$^{235}U(\alpha, 5n)$ $\alpha$ raspad $^{238}Cm$
$^{235}Pu$	25,3 min	e.z.: 100% $\alpha$ : $2,8 \cdot 10^{-3}\%$ $\gamma$ : $^{235}Np$	$^{235}U(\alpha, 4n)$
$^{236}Pu$	2,85 god	$\alpha$ : 100% $\gamma$ : $^{232}U$	$^{235}U(d, n)$

$^{237m}Pu$	0,18 s	i.t.	$\alpha$ raspad $^{241}Cm$
$^{237}Pu$	45,64 dana	e.z.: 100% 4,2 · 10 <sup>-3</sup> % $\gamma$ : $^{237}Pu$ $\gamma$ : $^{233}U$	$^{238}U(\alpha, 5n)$ $^{235}U(\alpha, 2n)$
$^{238}Pu$	87,7 god	$\alpha$ : 100% $\gamma$ : $^{234}U$	$^{238}U(d, 2n)$ $\alpha$ raspad $^{242}Cm$
$^{239m}Pu$	$1,93 \cdot 10^{-7}$ s	i.t. $\gamma$	$\alpha$ raspad $^{243}Cm$ $\beta^-$ raspad $^{239}Np$
$^{239}Pu$	24110 god	$\alpha$ : 100% $\gamma$ : $^{235}U$	$\beta^-$ raspad $^{239}Np$
$^{240}Pu$	6561 god	$\alpha$ : 100% $\gamma$ : $^{236}U$	$^{239}Pu(n, \gamma)$
$^{241}Pu$	14,32 god	$\beta^-$ : 100% $\alpha$ : $2,5 \cdot 10^{-3}$ % $\gamma$ : $^{237}U$	$^{240}Pu(n, \gamma)$
$^{242}Pu$	$3,75 \cdot 10^5$ god	$\alpha$ : 100% $\gamma$ : $^{238}U$	$^{241}Pu(n, \gamma)$
$^{243}Pu$	4,95 sati	$\beta^-$ : 100% $\gamma$ : $^{243}Am$	$^{242}Pu(n, \gamma)$
$^{244}Pu$	$8,00 \cdot 10^7$ god	$\alpha$ : 99,88% $\gamma$ : $^{240}U$	$^{243}Pu(n, \gamma)$
$^{245}Pu$	10,5 sati	$\beta^-$ : 100% $\gamma$ : $^{245}Am$	$^{244}Pu(n, \gamma)$
$^{246}Pu$	10,84 dana	$\beta^-$ : 100% $\gamma$ : $^{246}Am$	$^{245}Pu(n, \gamma)$

e.z. – zahvat elektrona, i.t. – izomerska tranzicija

Za nuklearnu forenziku je izotop  $^{239}Pu$  je od velikog značaja. Ovaj izotop lako stupa u reakciju fisije kada se bombarduje termalnim neutronima i jedini je izotop koji se koristi u nuklearnim reaktorima i za proizvodnju nuklearnog oružja. Najčešće se koristi sledeća reakcija za proizvodnju  $^{239}Pu$ :



Separacija na nivou  $U - Pu$  se odvija hemijskim putem koji je jednostavniji i bar dva puta jeftiniji od procesa obogaćenja uranijuma. U poređenju sa  ${}^{235}U$ ,  ${}^{239}Pu$  ima relativno malo vreme poluživota. Posledica ovoga je emisija ogromne količine energije ( $1,92 \frac{W}{kg}$ ) pri raspadu plutonijuma, što ga čini toplim na dodir budući da je emitovana toplota veća od toplote koju emituje ljudsko telo.

# 5. Eksperimentalni deo

Eksperimentalni deo rada je održan u laboratoriji za nuklearnu forenziku koja se nalazi u sklopu centra za energetska istraživanja u Budimpešti. Osnovan 2012. godine na bazi dve prethodno nezavisne institucije, institut za izotope i KFKI institut za istraživanja atomske energije, centar za energetska istraživanja vrši i unapređuje razvoj nuklearnih disciplina radi bezbedne upotrebe nuklearne tehnologije u Mađarskoj. Takođe, centar učestvuje u internacionalnim istraživanjima u cilju uspostavljanja nove generacije nuklearnih postrojenja, vrši ispitivanja interakcije čestica zračenja sa materijom (neutroni, elektroni,  $\gamma$  foton), sprovodi radijacionu zaštitu i nuklearnu bezbednost itd.

Tokom boravka u kampusu u trajanju od dve nedelje, plan je bio da učestvujem u realnom slučaju koji bi se sprovodio nakon što je laboratoriji za nuklearnu forenziku pristigao materijal sa radiološkog mesta zločina. Po dolasku, predstavljena su četiri uzorka čvrstog agregatnog stanja za koje je trebalo izvršiti neophodna ispitivanja. Nažalost, zbog same statističke prirode radioaktivnosti i tehnologije prisutne u detektorima, period od 14 dana je prilično kratak budući da neki od LEU uzoraka zahtevaju vreme snimanja od minimum sedam dana, te u sklopu ovog rada nisu mogli biti obuhvaćeni izveštaji za sva četiri uzorka. Za svaki od uzoraka, bilo je neophodno odrediti vreme od poslednje hemijske separacije (vrlo bitan parametar za nuklearnu forenziku), pronaći što tačniji izotopski sastav uranijuma i ukoliko je moguće, odrediti masu putem gama spektroskopije. Za merenja je upotrebљena metoda HRGS (*High Resolution Gamma Spectrometry*) zbog svojih velikih prednosti koje uključuju obrađivanje dokaza proizvoljnog oblika i minimalne pripreme uzorka.

## 5.1 Detektori

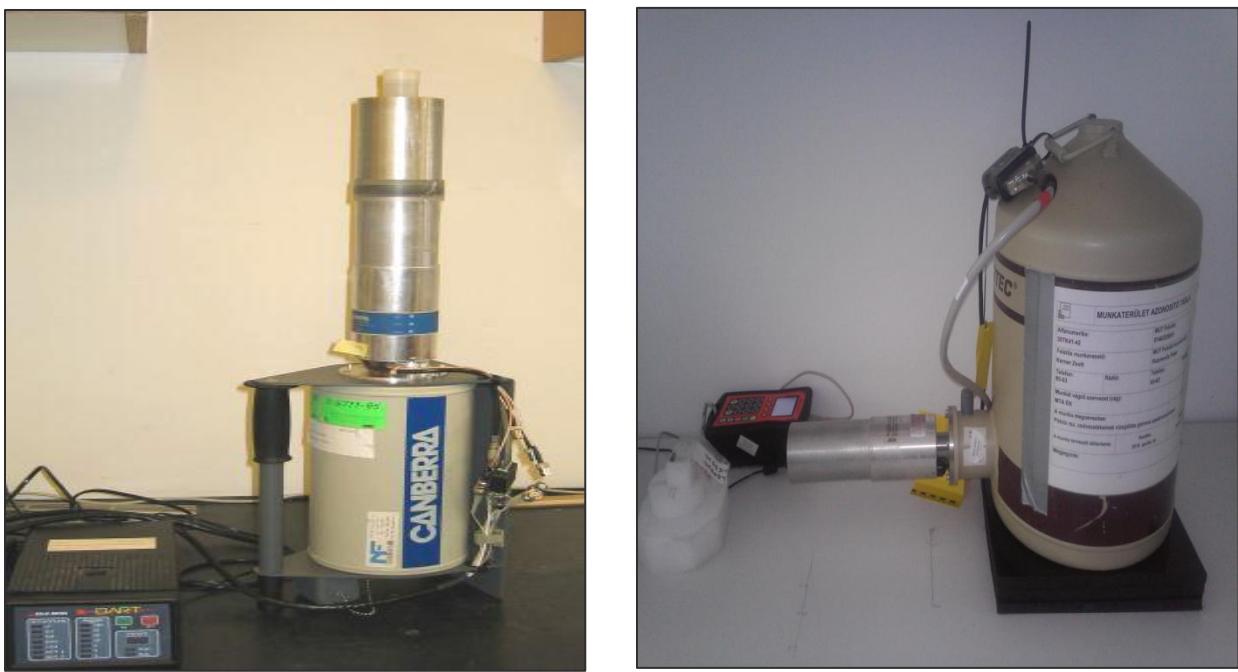
Za analizu priloženih uzoraka korištena su tri detektora: dva planarna i jedan „Well type“ HPGe detektor. Well type detektor je marke *Canberra* i njegove specifikacije su predstavljene u tabeli 5.1, dok je sam detektor prikazan na slici 5.1. Postavljen u olovnu zaštitu od 20 cm, detektor je upotrebљen za merenje visokoenergetskih pikova.

**Tabela 5.1** Specifikacije Well type detektora

Naziv	Relativna efikasnost	FWHM	Aktivna zapremina
Canberra GCW6023	60%	2.3 keV @ 1332.5 keV od $^{60}Co$	293 cm <sup>3</sup>



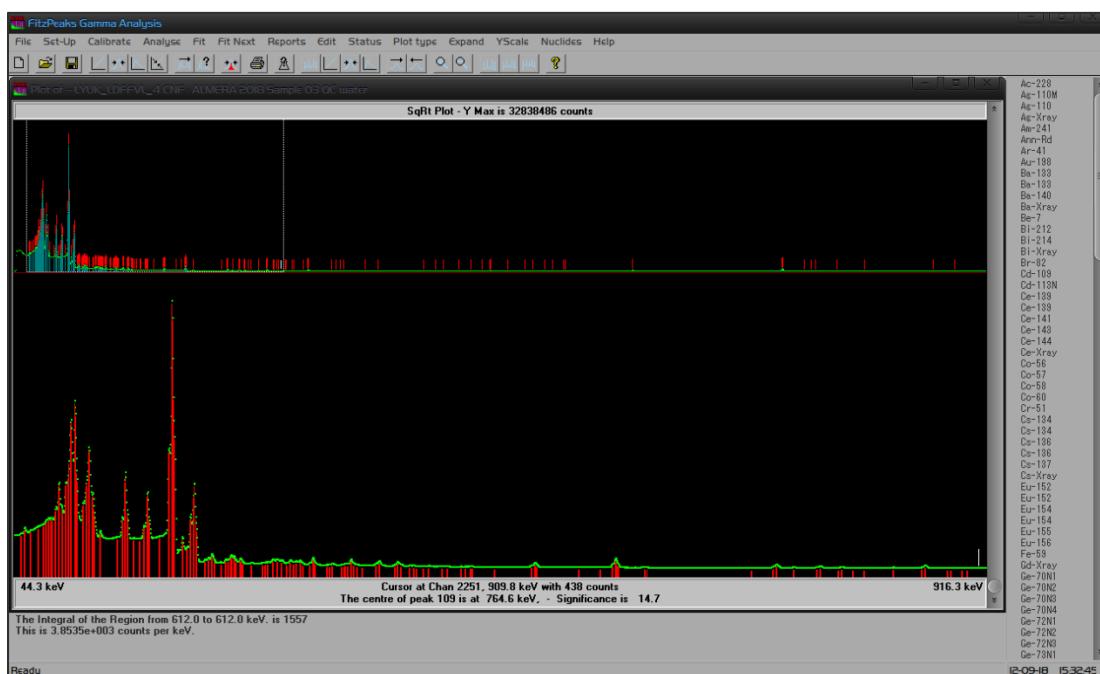
**Slika 5.1** Canberra GCW6023 sa olovnom zaštitom



**Slika 5.2** Canberra i Ortec planarni detektori

Kod planarnih detektora, proizvođači su *Ortec* i *Canberra* i oba detektora su prikazana na slici 5.2. Na slikama se takođe može videti i propratna nuklearna elektronika koja je zadužena za transformisanje, oblikovanje i pojačanje signala (predpojačavač, pojačavač, diskriminator itd). Svi detektori su poluprovodničkog tipa sa kristalom germanijuma izuzetno visoke čistoće (HPGe). Ovakva postavka je neophodna budući da su HPGe detektori odlikovani nenadmašivom energetskom rezolucijom koja je nužna za raspoznavanje pikova. Glavne mane ovog detektora su te što zahteva kontinualno hlađenje tečnim azotom pri režimu rada koji nije uvek pristupačan niti jeftin i nedostatak mobilnosti.

Za obradu spektralnih podataka proizvedenih detektorima koristili su se različiti paketi softvera, besplatnog i plaćenog: Gamma Vision, Fitz Peaks, Genie 2000, MGA++ i MGAU 4.2. Svi programi poseduju automatizovan mod rada, što znači da već poseduju učitan logaritam po kojem se vrši identifikacija pikova kao i njihovo fitovanje. Naravno, svaki od njih omogućava ručni režim kojim korisnik može korigovati i implementirati nove pikove koje je računar promašio. Takođe, programi poseduju opciju kalibracije energije, oblika pika i efikasnosti što im omogućava obavljanje potpune kvantitativne analize sirovih podataka dostavljenih detektorom. Primer obrade podataka putem programa Fitz Peaks je prikazan na slici 5.3. Na slici je prikazan spektar uzorka "LDFFVL" koji će se obrađivati u poglavljju 5.4.



Slika 5.3 Fitz Peaks

Pronalaženjem pikova različitih energija uz pomoć kataloga energija  $\gamma$  fotona koji se emituju pri raspadu radionuklida, moguće je identifikovati različite izotope i odatle implicitno pronaći informacije od interesa (period poluraspada, aktivnost, već pomenuto starost nuklearnog materijala itd).

## 5.2 Određivanje starosti nuklearnog materijala

Pod starošću materijala se podrazumeva proteklo vreme od poslednje hemijske separacije uzorka, što predstavlja vrlo bitan parametar za nuklearnu forenziku budući da može pružiti informaciju o poreklu uzorka. Datiranje uranijumskih uzoraka gama spektrometrijom je vrlo pogodno budući da je metoda nedestruktivna i relativno brza. Takođe, metoda ne zahteva upotrebu referentnih materijala poznatog godišta niti standarda za kalibraciju. Metod je vrlo pogodan za starije HEU uzorke, dok se njegovo ograničenje pronalazi baš za LEU materijale.

Određivanje starosti modela HRGS metodom se zasniva na tzv.  $^{234}U \rightarrow ^{230}Th \rightarrow ^{226}Ra$  hronometru. Dok  $^{234}U$  poseduje merljive  $\gamma$  pikove, njegov produkt raspada  $^{230}Th$  nema merljivih pikova. Međutim  $\alpha$  raspadom  $^{230}Th$  se dobija radioizotop  $^{236}Ra$  koji se preko tri kratkoživeća potomka raspada do  $^{214}Bi$  sa merljivim  $\gamma$  pikovima koji se mogu iskoristiti za određivanje aktivnosti  $^{226}Ra$ . Zbog velike razlike u periodima poluraspada  $^{226}Ra$  i  $^{214}Bi$ , posle otprilike tri nedelje se smatra da stupa na snagu sekularna radioaktivna ravnoteža, tako da merenjem aktivnosti  $^{214}Bi$  zapravo možemo odrediti aktivnost  $^{226}Ra$ . Pronalaženjem datih aktivnosti, sada možemo pronaći odnose aktivnosti:  $\frac{^{226}Ra}{^{234}U}$  i  $\frac{^{214}Bi}{^{234}U}$ , pa preko njih konačno doći do starosti nuklearnog materijala [16]:

$$\frac{^{214}Bi}{^{234}U} = \frac{^{226}Ra}{^{234}U} = \lambda_{^{230}Th} \cdot \lambda_{^{226}Ra} \cdot T^2, \quad (5.1)$$

gde su  $\lambda_{^{230}Th}$  i  $\lambda_{^{226}Ra}$  tabelarne konstante raspada za torijum i radon. Za merenje aktivnosti  $^{214}Bi$  koristi se pomenuti Well type detektor zaštićen olovnim štitom, dok se za određivanje aktivnosti  $^{234}U$  koristi planarni detektor u laboratorijskim uslovima.

Postoje dve metode koje koriste  $^{234}U \rightarrow ^{230}Th \rightarrow ^{226}Ra$  hronometar, metoda koja koristi absolutnu efikasnost detektora i metoda relativne relativne efikasne

kalibracije<sup>16</sup>. Prva metoda omogućava pronalaženje aktivnosti, a samim tim i traženih odnosa aktivnosti po formuli:

$$A = \frac{I}{B\epsilon t}, \quad (5.2)$$

gde je  $I$  intenzitet gama pika,  $B$  ( $p_\gamma$ ) verovatnoća emisije gama pika,  $t$  vreme merenja a  $\epsilon$  absolutna efikasnost detektora. Glavni problem ove metode jeste pomenuta absolutna efikasnost koja se vrlo teško računa, dok i sama metoda zahteva uzorke pravilnih geometrija. Sa druge strane, druga metoda omogućava određivanje starosti uzorka proizvoljnih oblika i hemijskih sastava prema formuli:

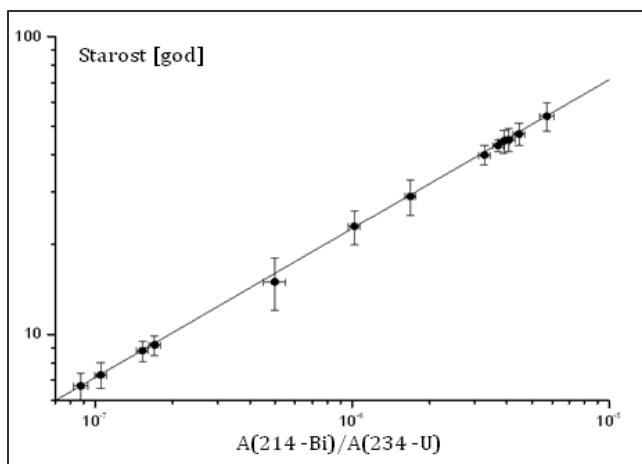
$$\frac{A_{214}Bi}{A_{234}U} = \frac{\frac{A_{214}Bi}{A_{238}U} \cdot \frac{A_{238}U}{A_{235}U}}{\frac{A_{234}U}{A_{235}U}} \quad (5.3)$$

Treba naglasiti da se odnos aktivnosti  $\frac{A_{238}U}{A_{235}U}$  pronalazi uz pomoć algoritma ugrađenog

u MGA++ softver za automatsku evaluaciju spektra, koji u zavisnosti od zasićenosti nuklearnog materijala zahteva odgovarajuće korigovanje a ponekad i potpuno drugačiji pristup određivanja traženih odnosa. Na slici 5.4 su prikazani rezultati merenja određivanja starosti 16 materijala u centru za energetska istraživanja.

Takođe se sa slike može primetiti linearna zavisnost odnosa  $\frac{A_{214}Bi}{A_{234}U}$  i starosti materijala.

Procedura za pronalaženje neophodnih odnosa aktivnosti je sledeća: za svaki gama pik  $^{232}U$ ,  $^{234}U$ ,  $^{235}U$ ,  $^{238}U$  i  $^{214}Bi$  se pronađe ukupna NET površina pika  $I$  sa sprektra, naravno nakon oduzimanja fonskog zračenja, i zatim se NET



Slika 5.4 Dosadašnji rezultati instituta

<sup>16</sup> Relative Efficiency Calibration

površina podeli sa verovatnoćom emitovanja  $p_\gamma$  kako bi se dobio odnos  $\frac{I}{p_\gamma}$ . Zatim se formira funkcija relativne efikasnosti  $f_1(E) = f_1(\frac{I}{p_\gamma})$  fitovanjem relativnih efikasnosti gama pikova  $^{235}U$  na 143,163,185 i 215 keV – a snimljenih planarnim detektorom. Opšti oblik ove funkcije je:

$$\ln f_1(E) = \ln \left( \frac{I}{B} \right) = C_1 + C_2 \cdot \ln E + C_3 (\ln E)^2 + C_4 (\ln E)^3, \quad (5.4)$$

gde je E energija izražena u keV-ima, dok su  $C_i$  konstante fitovanja. Zatim bi se konstruisale još dve krive relativne efikasnosti,  $f_2(E)$  i  $f_3(E)$ , fitovanjem relativnih efikasnosti gama linija izotopa  $^{235}U$  na energijama 143, 163, 185, 202, 205, 215 i 247 keV-a i gama linija izotopa  $^{232}U$  na energijama 583, 727, 785, 860, 893, 1078, 1512, 1620 i 2614 keV-a, snimljenih koaksijalnim HPGe detektorom, respektivno. Funkcije  $f_2(E)$  i  $f_3(E)$  su istog matematičkog formata kao i  $f_1(E)$ .

Odnosi aktivnosti se preko definisanih funkcija mogu odrediti kao:

$$\frac{A_{234}U}{A_{235}U} = \frac{\frac{I_{121}}{B_{121}}}{f_1(121)} \quad (5.5)$$

$$\frac{A_{232}U}{A_{235}U} = \frac{\frac{I_{238}}{B_{238}}}{f_2(238)} \quad (5.6)$$

$$\frac{A_{214}Bi}{A_{232}U} = \frac{\frac{I_{609}}{B_{609}}}{f_3(609)} \quad (5.7)$$

$$\frac{A_{238}U}{A_{232}U} = \left\langle \frac{\frac{I_{776}}{B_{776}}}{f_3(776)} \middle| \frac{\frac{I_{1001}}{B_{1001}}}{f_3(1001)} \right\rangle \quad (5.8)$$

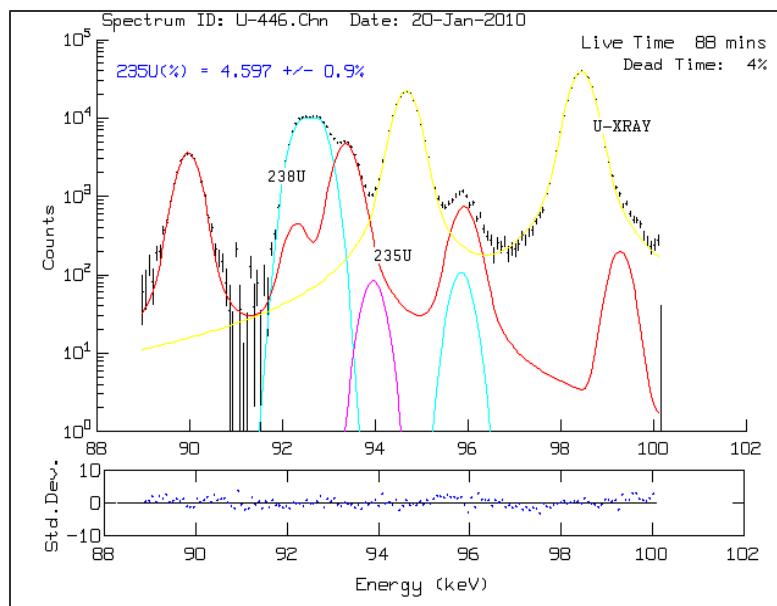
Za datiranje materijala, odnos aktivnosti  $\frac{A_{214}Bi}{A_{234}U}$  se sada može pronaći kao:

$$\frac{A_{214}Bi}{A_{234}U} = \frac{\frac{A_{214}Bi \cdot A_{232}U}{A_{232}U \cdot A_{235}U}}{\frac{A_{234}U}{A_{235}U}}, \quad (5.9)$$

i nakon uvrštavanja u jednačinu 5.1 može se odrediti godište materijala.

### 5.3 Izotopski sastav materijala

Jedna od prvih obaveza MEST-a prilikom dolaska na radiološko mesto zločina jeste kategorizacija i karakterizacija pronađenog materijala. Tu, između ostalog spada i preliminarno određivanje izotopskog sastava. Identifikacija izotopske kompozicije dobijenih uzoraka se u laboratoriji vršila putem softvera MGA++ i MGAU 4.2. Treba napomenuti da je MGAU 4.2 pogodan za određivanje izotopskog sastava metodom relativne efikasnosti kod materijala koji su obogaćeni  $^{235}U$  u procentima između 0,05% i 95%, ali koji sadrže gama pikove u samo malom energetskom rasponu od 0-300 keV-a. Ovakav metod je pogodan budući da se kriva relativne efikasnosti dobija iz spektra merenog uzorka, te je samim tim atenuacija u uzorku i u apsorberima uzeta u obzir. Samim tim, ova metoda ne zavisi od oblika, hemijske, fizičke forme i geometrije uzorka. Kako je celokupna informacija sadržana unutar spektra uzorka, nije neophodno koristiti referentne materijale za kalibraciju. Naravno, evaluacija spektra od strane algoritma je podložna nepredviđenim greškama, pa je ponekad i ručni pregled



Slika 5.5 MGAU++

spektralnog izveštaja neophodan. Primer korisničkog interfejsa koji nudi softver MGAU 4.2 je prikazan na slici 5.5, dok su u tabeli 5.2 predstavljene tabelarne vrednosti energija gama pikova sa njihovim verovatnoćama emitovanja koje se koriste za identifikaciju pikova u nuklearnoj forenzici.

**Tabela 5.2** Vrednosti energija gama pikova sa datim verovatnoćama

Energija (keV)	Verovatnoća emisije B (%)	Emiter
<b><math>^{234}U</math> grupa</b>		
120,9	$0,0342 \pm 0,005$	$^{234}U$
<b><math>^{235}U</math> grupa</b>		
143,76	$10,96 \pm 0,08$	$^{235}U$
163,33	$5,08 \pm 0,04$	$^{235}U$
185,71	$57,2 \pm 0,5$	$^{235}U$
202,11	$1,08 \pm 0,02$	$^{235}U$
205,31	$5,01 \pm 0,05$	$^{235}U$
215,30	$0,028 \pm 0,003$	$^{235}U$
246,84	$0,053 \pm 0,003$	$^{235}U$
<b><math>^{238}U</math> grupa</b>		
569,15	$0,0154 \pm 0,0013$	$^{234}Pa$
766,36	$0,3193 \pm 0,0033$	$^{234m}Pa$
1001,02	$0,8350 \pm 0,0000$	$^{234m}Pa$
1193,77	$0,01311 \pm 0,00042$	$^{234m}Pa$
1510,10	$0,01303 \pm 0,00025$	$^{234m}Pa$
1737,80	$0,02121 \pm 0,00017$	$^{234m}Pa$
1831,70	$0,0178 \pm 0,00017$	$^{234m}Pa$
<b><math>^{228}Th</math> grupa</b>		
238,63	$43,3 \pm 0,4$	$^{212}Pb$
583,19	$85,1 \pm 0,6$	$^{208}Tl$
727,33	$6,74 \pm 0,12$	$^{212}Bi$
785,37	$1,102 \pm 0,013$	$^{212}Bi$
860,57	$12,52 \pm 0,12$	$^{208}Tl$
893,41	$0,378 \pm 0,019$	$^{212}Bi$
1078,62	$0,564 \pm 0,019$	$^{212}Bi$
1512,7	$0,29 \pm 0,04$	$^{212}Bi$

Energija (keV)	Verovatnoća emisije B (%)	Emiter
1620,5	$1,49 \pm 0,03$	$^{212}Bi$
2614,55	$99,83 \pm 0,17$	$^{208}Tl$
<b><math>^{228}Ac</math> grupa</b>		
911,32	$29 \pm 0$	$^{228}Ac$
969,16	$17,458 \pm 1,740$	$^{228}Ac$
<b><math>^{226}Ra</math> grupa</b>		
609,32	$46,89 \pm 4,00$	$^{214}Bi$

Ukoliko je potrebno odrediti izotopski sastav materijala bez upotrebe kompjuterskog koda, moguće je upotrebiti odnose 5.5, 5.6, 5.7 i 5.8 za izračunavanje udela određenog izotopa:

$$q_j(\%) = \frac{\frac{A_j \cdot \lambda_{235} \cdot M_j}{A_{235} \cdot \lambda_j \cdot M_{235}}}{1 + \frac{A_{232} \cdot \lambda_{235} \cdot M_{232}}{A_{235} \cdot \lambda_{232} \cdot M_{235}} \cdot \frac{A_{234} \cdot \lambda_{235} \cdot M_{234}}{A_{235} \cdot \lambda_{234} \cdot M_{235}} + \frac{A_{238} \cdot \lambda_{235} \cdot M_{238}}{A_{235} \cdot \lambda_{238} \cdot M_{235}}} \cdot 100, \quad (5.10)$$

gde je M atomska masa, dok indeks j predstavlja različite izotope uranijuma ( $^{232}U$ ,  $^{234}U$ ,  $^{235}U$  i  $^{238}U$ ).

#### 5.4 Uzorak "LDFFVL"

Od četiri uzorka različitih obogaćenosti, uzorak pod imenom "LDFFVL" (Slika 5.6) će biti predstavljen u ovom radu. Nakon što je dostavljen, uzorak je trebalo snimiti detektorima različitih konfiguracija, što je i učinjeno. Prvo je izvršeno snimanje koaksijalnim detektorom (Well type) koji je smešten pod olovnom zaštitom debljine 20 cm (Slika 5.1). Vreme snimanja je trajalo skoro cela dva dana. Nakon preuzimanja gama spektra sa računara koji je direktno povezan sa detektorom, putem programa *Fitz Peaks* se pristupilo analizi spektra. Koristeći tabelu poznatih gama prelaza i njihovih verovatnoća<sup>17</sup> prelaza, izvršena je identifikacija pikova. Sa ovako pronađenih pikova su očitane vrednosti odbroja po sekundi kao i njihovih grešaka<sup>18</sup>, koje su zatim unete u tabelu. Vrlo je bitno napomenuti da su se očitavanja i bilo koji analitički deo posla odrađivali tek nakon što se fonski deo spektra uklonio, tj. oduzeo kako ne bi došlo do

<sup>17</sup> Konkretno, u eksperimentu se koristio priručnik koji se dobija uz kupljen softver MGA++, ali se za identifikaciju pikova mogu koristiti tabele sa IAEA vebajta.

<sup>18</sup> Pikovi sa izraženijim greškama nisu uzeti u obzir za analiziranje.

pogrešne identifikacije pikova. Nakon kompletiranog snimanja uzorka, Well Type detektor je ostavljen jedan dan da radi u režimu "praznog hoda" kako bi se snimilo fonsko zračenje.



**Slika 5.6** Uzorak LDFFVL

Za određivanje starosti materijala, neophodno je izvršiti relativnu kalibraciju detektora [17] za određene gama pikove. Odlučeno je da se, zbog velikog prisustva pikova, izvrši normiranje funkcije  $f_3$  na pikove  $^{232}U$ , dok se funkcija  $f_2$  normirala na pikove  $^{235}U$ . Posmatrajući jednačinu 5.4 pomoću koje se vršila relativna kalibracija detektora, vidimo da su nepoznati faktori samo konstante koje proizilaze iz fitovanja funkcije. Pa tako, skiciranjem  $\ln\left(\frac{I}{B}\right) = f(E)$ , a zatim nelinearnim fitovanjem krive<sup>19</sup>, u mogućnosti smo dobiti nepoznate faktore za funkciju  $f_3$ :

$$C_1 = 19,5; C_2 = -9,89; C_3 = 1,79; C_4 = -0,10 \quad (5.11)$$

Za konstrukciju krivih iskorišteni su gama pikovi  $^{232}U$  i  $^{235}U$  na energijama prikazanim u tabeli 5.3. Ponavljanjem postupka za funkciju  $f_2$ , izvršeno je fitovanje i dobijene su vrednosti konstanti:

$$C_1 = 657,25; C_2 = -387,24; C_3 = 76,47; C_4 = -5,01 \quad (5.12)$$

---

<sup>19</sup> Fitovanje krivih se održivalo putem programa *Origin pro 8.0*.

**Tabela 5.3** Energije gama pikova upotrebљene za konstrukciju  $f_3$  i  $f_2$

	$f_3$ ( $^{232}U$ )							
E[keV]	238,6	583	727,33	763,45	860,53	1078,63	1621	2614
	$f_2$ ( $^{235}U$ )							
E[keV]	84,2	90	143,78	163,4	185,74	205,3	221,4	247

Uz pronađene vrednosti konstanti, moguće je putem izraza 5.5, 5.6, 5.7 i 5.8 pronaći odgovarajuće odnose aktivnosti. Zatim, preko 5.9 se može pronaći odnos aktivnosti  $\frac{A_{214}Bi}{A_{234}U}$ , koji uvrštavanjem u 5.1 dozvoljava izračunavanje starosti materijala kao:

$$T = \sqrt{2 \cdot \frac{\frac{A_{214}Bi}{A_{234}U}}{\lambda_{230}Th \cdot \lambda_{226}Ra}} \quad (5.13)$$

Zbog jedinica u kojima se izražavavaju konstante raspada, dobija se rezultat izražen u sekundama. Korigovanjem, za starost materijala pod nazivom "LDFFVL", upotrebom Well Type detektora metodom fitovanja, se dobija vrednost:

$$T = 26,82 \text{ godine} \quad (5.14)$$

Za ispitivanje obogaćenosti materijala uranijumom, koristi se 5.10. Kako se odnosi 5.5, 5.6, 5.7 i 5.8 relativno lako pronalaze preko funkcija  $f_2$  i  $f_3$ , moguće je pronaći zastupljenost izotopa  $^{235}U$ . Za zastupljenost  $^{235}U$  u materijalu "LDFFVL", upotrebom Well Type detektora metodom fitovanja, dobija se vrednost:

$$C( ^{235}U) = 90,02 \% \quad (5.15)$$

Dakle, iz ovih podataka sledi da se radi o HEU materijalu.

Iz radoznalosti, spektralne podatke smo "propustili" kroz logaritam za automatsko određivanje zastupljenosti izotopa, MGAU 4.2. Program je procenio da je zastupljenost izotopa  $^{235}U$ :

$$C(^{235}U) = 87,86 \% \quad (5.16)$$

Uz malo drugačiju vrednost koncentracije  $^{235}U$ , logično je očekivati i da proračun za starost materijala bude drugačiji. To je i bio slučaj, pa starost materijala "LDFFVL", upotrebom Well type detektora metodom MGAU 4.2, iznosi:

$$T = 20,10 \text{ godina} \quad (5.17)$$

Uz malo odstupanje, možemo reći da su oba načina uspešno identifikovali HEU materijal. Ovim je završeno ispitivanje spektralnih podataka Well type detektora.

Dok se vršila obrada spektralnih podataka sa Well Type detektora, uzorak je premešten u laboratoriju i već je uveliko sniman planarnim detektorima prikazanim na slici 5.2. Koristeći spektar sa *Canberra* planarnog detektora, pristupljeno je analizi. Već pri identifikaciji gama pikova se moglo naslutiti da će postojati problemi pri daljim proračunima. Naime, za izotop  $^{232}U$ , na koji normiramo  $f_3$ , uspešno su detektovana samo četiri pika na energijama koje su prikazane u tabeli 5.4.

**Tabela 5.4** Detektovane energije gama pikova  $^{232}U$

	$f_3 (^{232}U)$			
E[keV]	860,53	727,33	583	238,6

Budući da funkcija  $f_3$  sadrži četiri nezavisna parametra, *Origin pro 8.0* nije uspeo da izvrši fitovanje sa ovako malim skupom podataka, pa dalji proračuni za ove spektralne podatke nisu mogli da se nastave budući da nismo imali dovoljno poznatih vrednosti da bi izračunali neophodne odnose aktivnosti. Razlog detekcije malog broja pikova vrlo verovatno leži u veoma kratkom vremenu snimanja (oko jedan dan).

Konačno, poslednje merenje i analiza za uzorak "LDFFVL" su izvršeni u sledećoj konfiguraciji: planarni detektor marke *Canberra* sa slike 5.2, je postavljen u olovnu zaštitu debljine 20 cm, i tek onda je sniman spektar uzorka. Ovo inicijalno nije bilo u planu treninga, ali je odrđeno jer su rezultati sa planarnog detektora u laboratorijskim uslovima bili neupotrebljivi. I zaista, nakon snimanja u trajanju od 36 sati, detektor je sada uspešno "uhvatio" zadovoljavajuć broj gama linija za oba izotopa od interesa. Pa tako, energije gama pikova koje su se iskoristile za konstrukciju krivih  $f_2$  i  $f_3$  su prikazane u tabeli 5.5. Fitovanjem  $f_3$  i  $f_2$  funkcija su pronađene vrednosti konstanti:

$$\mathbf{f}_3: C_1 = 94,56; C_2 = -47,88; C_3 = 8,15; C_4 = -0,46 \quad (5.18)$$

$$\mathbf{f}_2: C_1 = 135,34; C_2 = -87,33; C_3 = 18,11; C_4 = -1,36 \quad (5.19)$$

**Tabela 5.5** Energije gama pikova upotrebљene za konstrukciju  $f_3$  i  $f_2$

$f_3 ({}^{232}U)$							
E[keV]	238,6	583	727,33	763,45	860,53	1078,63	
$f_2 ({}^{235}U)$							
E[keV]	84,2	90	143,78	163,4	185,74	205,3	221,4
							247

Uz pronalaženje datih konstanti, moguće je izračunati odnose 5.5, 5.6, 5.7 i 5.8, pa preko njih izraziti koncentraciju  ${}^{235}U$  i godište materijala. Godište materijala, računato preko 5.13, za uzorak "LDFFVL" upotreboom planarnog detektora u olovnoj zaštiti metodom fitovanja, iznosi:

$$T = 15,68 \text{ godina} \quad (5.20)$$

Sa druge strane, za zastupljenost izotopa  ${}^{235}U$  u materijalu "LDFFVL" se dobija:

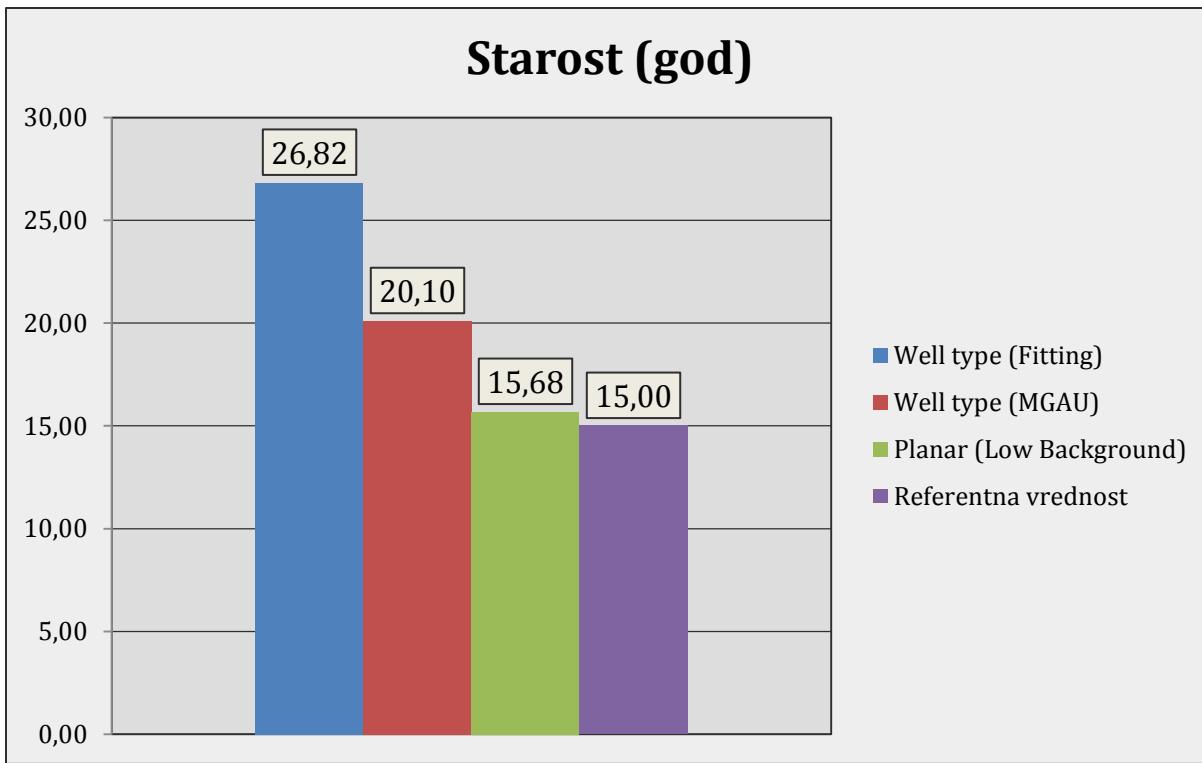
$$C({}^{235}U) = 90,74 \% \quad (5.21)$$

Kao što se može primetiti, obe metode upućuju na HEU materijal uz mala odstupanja u koncentraciji  ${}^{235}U$  i godištu materijala. Kako je eksperiment rađen u okviru treninga za nuklearnu forenziku, na kraju obuke nam je saopšteno da smo svo vreme radili sa uzorkom poznatog porekla a samim tim i poznatim godištem i koncentracijom  ${}^{235}U$ . Ove vrednosti ćemo nazvati referentne, i one iznose:

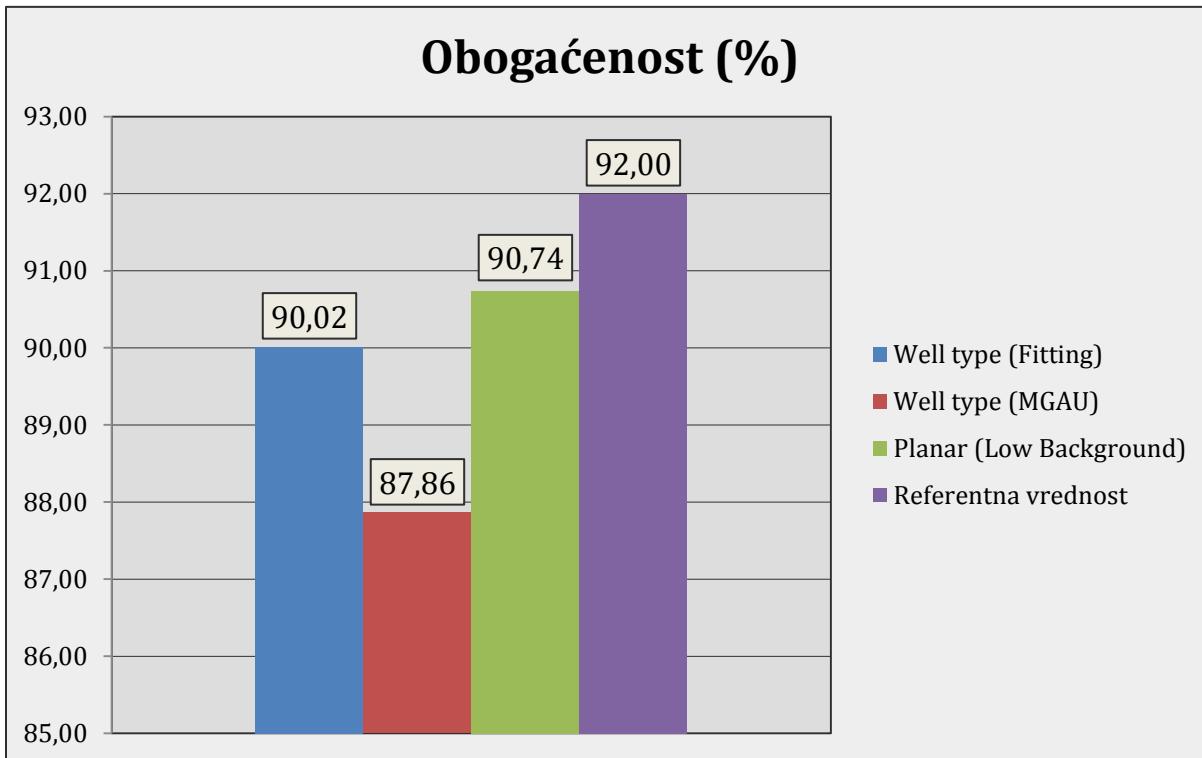
$$C_{ref}({}^{235}U) \sim 92 \% \quad (5.22)$$

$$T_{ref} = 15,00 \text{ godina} \quad (5.23)$$

Radi lakšeg poređenja rezultata, zasebno na slikama 5.7 i 5.8 su predstavljeni rezultati metoda, u odnosu na referentni materijal.



**Slika 5.7** Starost materijala računata u odnosu na referentnu vrednost



**Slika 5.8** Obogaćenost materijala računata u odnosu na referentnu vrednost

## 5.5 Diskusija

Razlike u starosti i obogaćenosti materijala se jasno mogu primetiti sa slika 5.7 i 5.8. U okviru prihvatljive greške, može se reći da su rezultati validni, ali naravno uz dato obrazloženje. Naime, razlog zbog kojeg spektralni podaci sa Well Type detektora daju vrednosti sa malo većom mernom nesigurnosti je zbog samog ambijenta u kojem je merenje izvršeno (naravno, ne treba zaboraviti ni ranije pomenut razlog o kratkom vremenu snimanja uzorka). Olovna zaštita od 20 cm je idealna za filtriranje niskoenergetskog zračenja, ali isto tako je idealna za zadržavanje gasova. Ovo se napominje zato što je jedan potomak svih prirodnih radioaktivnih nizova upravo u gasnom stanju. Naravno, reč je o radonu ( $^{222}Rn$ ,  $^{220}Rn$ ,  $^{219}Rn$ ) koji može kontaminirati same zidove komore i time dovesti do prisustva "nepostojeci" gama pikova u uzorku, a samim tim i do pogrešne identifikacije. Ovaj problem se inače rešava ispiranjem gasa iz komore pre svakog merenja putem filtera i ventila napravljenih isključivo za ovu svrhu, ali kako je ovo merenje predstavljalo vid treninga a ne neko "ozbiljnije" merenje, nisam siguran da je to odrađeno pre postavljanja uzorka. Dakle, za razlog malo većih mernih odstupanja od referentne vrednosti možemo okriviti ova dva faktora.

Sa druge strane, isti planarni detektor koji u laboratorijskim uslovima nije bio u mogućnosti da pruži spektralne podatke dovoljno informativne za obradu, nakon postavka u olovnu komoru rezultuje vrlo preciznim merenjem sa najmanje odstupanja od referentne vrednosti. Razlog naravno leži u tome što je u laboratorijskim uslovima fonsko zračenje izraženije od fonskog zračenja unutar olovne komore debljine 20 cm. Nakon postavke u olovnu zaštitu, planarni detektor je uspeo identifikovati i neke niskoenergetske gama pikove koji ovaj put nisu bili prekriveni pozadinskim zračenjem, i time omogućio fitovanje funkcija  $f_2$  i  $f_3$ .

## 6. Zaključak

Kao nedestruktivna i relativno brza metoda, gama spektrometrija predstavlja veoma koristan alat za primarno kategorisanje i karakterisanje nuklearnog materijala. Ova metoda se najčešće upotrebljava za "brze" izveštaje, u roku od 24 sata ili 7 dana i pruža rezultate prihvatljivih mernih nesigurnosti. Međutim, za kontrolni izveštaj u roku od dva meseca, bez sumnje će se odabrati metoda masene spektrometrije (ICP-MS). Ovaj način obrade dokaza je destruktivan, ali je široko prihvaćen zbog neverovatne preciznosti metode. Kako bi se stekao osećaj o redu veličine greške dveju metoda, može se reći da gama spektrometrija okvirno proračunava rezultate sa greškom od nekoliko godina (generalizovan slučaj), dok masena spektrometrija rezultate istog tog uzorka prikazuje sa greškom od svega nekoliko meseci (pod specijalnim uslovima se desi da rezultati imaju grešku manju od 0,1%!).

## 7. Literatura

1. Apostol A, *Applications of gamma spectrometry and particle accelerators in the field of nuclear forensics*, University of Bucharest, Bucharest 2017.
2. Krmar M, *Uvod u nuklearnu fiziku*, Departman za fiziku PMF, Novi Sad 2013.
3. Jozsef Z, *Non-destructive age-dating of low enriched uranium*, Institute for Transuranium elements, Karlsruhe, Germany.
4. Nguyen C.T, *Non-destructive age-dating of high enriched uranium*, Istitute of Isotopes, Budapest, Hungary.
5. Lakosi L, Zsigrai J, Nguyen T.C, Parsons-Moss T, Moody K, *Gamma spectrometry in the ITWG CMX-4 exercise*, Springer, 2015.
6. Bui V.L, Lakosi L, Nguyen T.C, *Relative efficiency calibration for determining isotopic composition and age of HEU items by passive non-destructive gamma spectrometry*, Hungarian Academy of Sciences, Centre for Energy Research, 2018.
7. <http://www.energia.mta.hu/en> (Pristupljeno 30.8.2018.)
8. Magill J, Galy J, *Radioactivity. Radionuclides. Radiation*, Springer, Germany, 2005.

## Reference

- [1] Moody K.J, Grant P.M, Hutcheon I.D, *Nuclear Forensic Analysis*, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, Print ISBN:978-0-8493-1513-8. eBook ISBN:978-0-203-50780-3 (2005).
- [2] Tsvetkov T, *Overview of the Nuclear Security Threat National Training Course on Introduction to Nuclear Forensics*, 26-29 September, 2016, Islamabad, Pakistan.
- [3] Smith D.K, *The ITWG: 20 years of science supporting law enforcement and nuclear security investigations. ITWG Update No. 1*, December 2016.
- [4] USA, STATE DEPARTMENT, *The Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism*. <https://www.state.gov/t/isn/c18406.html>, pristupljen 20.03.2017 GICNT (Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism) Working Groups.  
<http://www.gicnt.org/working-groups.html>, pristupljen 20.03.2017.
- [5] Official website of PSI, from <http://www.psi-online.info/Vertretung/psi/en/01-about-ps/0-about-us.html> , pristupljen 24.03.2017.
- [6] SIPRI (Stockholm International Peace Research Institute), The entry into force of the Amendment to Convention on the Physical Protection of Nuclear Material,

<https://www.sipri.org/commentary/2016/entry-force-amendment-convention-physical-150-protection-nuclear-material.html>, pristupljen 20.03.2017.

[7] ElBaradei M, International Conference on Nuclear Security: Global Directions for the Future, IAEA Vienna.

<https://www.iaea.org/newscenter/statements/nuclear-terrorism-identifying-and-combating-risks.html>, pristupljen 24.03.2017.

[8] Tsvetkov T, *The Incident and Trafficking Database (ITWD) Programme*, National Training Course on Introduction to Nuclear Forensics, 26-29 September, 2016, Islamabad, Pakistan.

[9] Nuclear forensics in support of investigations: implementing guide. IAEA Nuclear Security Series No. 2 - G (Rev.1), IAEA, Vienna (2015). STI/PUB/1687, ISBN 978-92-0-102115-1 (2015).

[10] Apostol A, *Characterization: Signatures and Interpretation*, National Training Course on Introduction to Nuclear Forensics, 26-29 September, 2016 Islamabad, Pakistan.

[11] Krmar M, *Uvod u nuklearnu fiziku*, Departman za fiziku PMF, Novi Sad 2013.

[12] Mrđa D, Bikit I, *Osnove fizike čestica i nuklearne fizike*, Departman za fiziku PMF, Novi Sad 2016.

[13] Eterović D, *Fizika slikovne dijagnostike za medicinare*, Zagreb 2002.

[14] Gindler J.E, *The Radiochemistry of Uranium*, US Atomic Energy Commission, National Academy of Sciences, National Research Council, Nuclear Science Series, NAS-NS-3050, 1978, <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?rc000068.pdf>, pristupljen 15.03.2017.

[15] Bekman I.N, *Plutonium tutorial (in Russian)*, 2009.

<http://profbeckman.narod.ru/Pluton.html>

[16] Bui V.L, Lakosi L, Nguyen T.C, *Relative efficiency calibration for determining isotopic composition and age of HEU items by passive non-destructive gamma spectrometry*, Hungarian Academy of Sciences, Centre for Energy Research, 2018.

[17] Nguyen C.T, *Non-destructive age-dating of high enriched uranium*, Institute of Isotopes, Budapest, Hungary.

## 8. Biografija



Rođen sam 30.07.1993. u Novom Sadu (Republika Srbija). Osnovnu školu "Veljko Vlahović" u Novom Sadu sam završio 2008. godine, a Gimnaziju "Isidora Sekulić" 2012. godine, takođe u Novom Sadu. Iste, 2012. godine upisujem Prirodno matematički fakultet u Novom Sadu, studijski program fizika, modul medicinska fizika. Svoj diplomski rad sam odbranio u septembru 2017. godine i time stekao titulu diplomiranog fizičara. Iste, 2017. godine upisujem master studije fizike, na modulu nuklearna fizika.

**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET**

**KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

*Redni broj:*

**RBR**

*Identifikacioni broj:*

**IBR**

*Tip dokumentacije:*

Monografska dokumentacija

**TD**

*Tip zapisa:*

Tekstualni štampani materijal

**TZ**

*Vrsta rada:*

Master rad

**VR**

*Autor:*

Mladen Babić 18m/17

**AU**

*Mentor:*

dr Jovana Nikolov

**MN**

*Naslov rada:*

Analiza nuklearnog materijala nedustrukтивном metodom nuklearne forenzike.

**NR**

*Jezik publikacije:*

srpski (latinica)

**JP**

*Jezik izvoda:*

srpski/engleski

**JL**

*Zemlja publikovanja:*

Srbija

**ZP**

*Uže geografsko područje:*

Vojvodina

**UGP**

*Godina:*

2018.

**GO**

*Izdavač:*

Autorski reprint

**IZ**

*Mesto i adresa:*

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

**MA**

*Fizički opis rada:*

Broj poglavlja/ Broj strana/ Broj tabela/ Broj slika/ Broj referenci:  
8/ 73/ 9/ 23/ 17

**FO**

*Naučna oblast:* Fizika

**NO**

*Naučna disciplina:* Nuklearna fizika

**ND**

*Predmetna odrednica/ ključne reči:* Forenzika, obogaćenost, datiranje, IAEA, ITWG

**PO****UDK**

*Čuva se:* Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

**ČU**

*Važna napomena:* nema

**VN**

*Izvod:* U ovom radu su opisane glavne primene nuklearne forenzike. Takođe,

**IZ** detaljno su opisani načini detekcije i identifikacije gama pikova. Ova razmatranja su dodatno ilustrovana realnim slučajevima i situacijama.

*Datum prihvatanja teme od NN veća:*

**DP**

*Datum odbrane:* 26.9.2018.

**DO**

*Članovi komisije:*

**KO**

*Predsednik:* dr Nataša Todorović, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad.

*član:* dr Jovana Nikolov, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad.

*član:* dr Maja Stojanović, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad.

**UNIVERSITY OF NOVI SAD**  
**FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS**

**KEY WORDS DOCUMENTATION**

*Accession number:*

**ANO**

*Identification number:*

**INO**

*Document type:* Monograph publication

**DT**

*Type of record:* Textual printed material

**TR**

*Content code:* Final paper

**CC**

*Author:* Mladen Babić

**AU**

*Mentor/comentor:* dr Jovana Nikolov

**MN**

*Title:* Analysis of nuclear material using nondestructive method of nuclear forensics.

**TI**

*Language of text:* Serbian (Latin)

**LT**

*Language of abstract:* English

**LA**

*Country of publication:* Serbia

**CP**

*Locality of publication:* Vojvodina

**LP**

*Publication year:* 2018

**PY**

*Publisher:* Author's reprint

**PU**

*Publication place:* Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

**PP**

<b>Physical description:</b>	8 / 73 / 9 / 23 / 17
<b>PD</b>	
<i>Scientific field:</i>	Physics
<b>SF</b>	
<i>Scientific discipline:</i>	Nuclear Physics
<b>SD</b>	
<i>Subject/ Key words:</i>	Forensics, enrichment, dating, IAEA, ITWG
<b>SKW</b>	
<b>UC</b>	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
<b>HD</b>	
<i>Note:</i>	none
<b>N</b>	
<i>Abstract:</i>	In this paper, general applications and directions of nuclear forensics are shown. In the most elaborate way, the principles of gamma ray detection and identification are discussed. Also, these views are further illustrated with real life cases and situations.
<b>AB</b>	
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	
<b>ASB</b>	
<i>Defended on:</i>	26.9.2018.
<b>DE</b>	
<i>Thesis defend board:</i>	
<b>DB</b>	
<i>President:</i>	PhD Nataša Todorović, Faculty of Sciences, Novi Sad.
<i>Member:</i>	PhD Jovana Nikolov, Faculty of Sciences, Novi Sad.
<i>Member:</i>	PhD Maja Stojanović, Faculty of Sciences, Novi Sad.