



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO – MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Merenje debljine poluslabljenja referentnih kvaliteta X-zračenja uz procenu merne nesigurnosti

- master rad -

Mentori:

prof. dr Nataša Todorović

dr Nikola Kržanović

Kandidat:

Nina Šćepanović

Novi Sad, 2023. godina

Zahvalnica i posveta

Dragim mentorima, prof. dr Nataši Todorović i dr Nikoli Kržanoviću, želim da izrazim duboku zahvalnost na neizmernoj podršci, pomoći i savetima tokom celog ovog istraživačkog puta. Takođe, veliku zahvalnost dugujem i prof. dr Jovani Nikolov, prof. dr Ivani Stojković i dr Milošu Živanoviću.

Posebno želim da zahvalim Institutu za nuklearne nauke "Vinča" na prilici da realizujem eksperimentalni deo svog master rada u saradnji sa njima.

Mojoj porodici - divnoj majci Danki, ocu Vladimiru, sestri Ani i vereniku Nenadu hvala na bezuslovnoj podršci i razumevanju. Vaša ljubav me je hrabrila i davala snagu da ne odustanem.

Sadržaj

UVOD	8
1. X-ZRAČENJE.....	9
1.1 Produkcija X-zraka	9
1.2 Spektar X-zraka	11
1.2.1 Karakteristično zračenje	11
1.2.2 Zakočno zračenje (Bremsstrahlung).....	12
1.2.3 Augerov efekat	13
1.3 Uticaj napona i struje rendgenske cevi na spektar	13
2. INTERAKCIJA FOTONA SA MATERIJOM	15
2.1 Fotoelektrični efekat	15
2.2 Rejljevo rasejanje	16
2.3 Komptonov efekat	16
2.4 Stvaranje parova	18
2.5 Atenuacija rendgenskog zračenja	18
3. DOZIMETRIJSKE VELIČINE	22
3.1 Zaštitne dozimetrijske veličine	24
3.1.1 Srednja apsorbovana doza u tkivu ili organu	24
3.1.2 Ekvivalentna doza	24
3.1.3 Efektivna doza.....	25
3.2 Operativne dozimetrijske veličine	26
3.2.1 Lični ekvivalent doze	26
3.2.2 Ambijentalni ekvivalent doze.....	26
3.2.3 Usmereni ekvivalent doze	26
4. GASNI DETEKTORI	28
4.1 Jonizacione komore	28
4.1.1 Princip rada jonizacionih komora.....	28
4.1.2 Sferne jonizacione komore.....	30
4.1.3 Planparalelne jonizacione komore	31
5. METROLOGIJA	33
5.1 Metarska konvencija.....	33
5.1.1 Generalna konferencija za tegove i mere	34
5.1.2 Međunarodni biro za mere i tegove.....	34
5.1.3 Međunarodni komitet za tegove i mere.....	34

5.1.4	Regionalne metrološke organizacije	35
5.1.5	Nacionalni metrološki instituti	35
5.1.6	Sporazum o međunarodnom priznavanju	36
5.2	Metrološka sledljivost.....	36
5.2.1	IAEA/WHO SSDL mreža	37
6.	STANDARDIZACIJA	40
6.1	Standard ISO 4037-1	40
6.1.1	Kontinuirano referentno X-zračenje.....	41
7.	EKSPERIMENTALNI DEO.....	43
7.1	Opis eksperimentalnog postupka.....	43
7.2	Obrada rezultata merenja.....	46
7.2.1	Obrada rezultata merenja za set starih apsorbera od bakra	46
7.2.2	Obrada rezultata merenja za set novih apsorbera od bakra	49
8.	BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI.....	52
8.1	Merna nesigurnost tipa A i tipa B.....	52
8.2	Kombinovana merna nesigurnost	53
8.3	Identifikacija izvora mernih nesigurnosti za set starih apsorbera.....	54
8.3.1	Debljina filtera.....	54
8.3.2	Sferna jonizaciona komora (sekundarni etalon).....	54
8.3.3	Monitorska jonizaciona komora	56
8.3.4	Merenja temperature	56
8.3.5	Merenja pritiska.....	56
8.3.6	Propagacija merne nesigurnosti	57
ZAKLJUČAK		61
LITERATURA.....		62

Spisak slika

Slika 1.1 Različiti tipovi elektromagnetnih talasa i njihove talasne dužine.....	9
Slika 1.2 Rendgenska cev i njene komponente	10
Slika 1.3 Princip nastajanja karakterističnog i zakočnog X-zračenja (levo) i njihov spektar (desno).....	11
Slika 1.4 Augerov efekat.....	13
Slika 1.5 Uticaj napona i struje rendgenske cevi na spektar X-zračenja.....	14
Slika 2.1 Fotoelektrični efekat	15
Slika 2.2 Komptonovo rasejanje	16
Slika 2.3 Ugaona zavisnost intenziteta rasejanog Komptonovog zračenja.....	17
Slika 2.4 Mehanizam stvaranje para elektron-pozitron.....	18
Slika 2.5 Prolazak monoenergetskog snopa kroz apsorber debljine dx	19
Slika 2.6 Maseni atenuacioni koeficijent za pojedinačne tipove interakcija i ukupni maseni atenuacioni koeficijent	20
Slika 3.1 Veza između fizičkih, zaštitnih i operativnih dozimetrijskih veličina.....	27
Slika 4.1 Šematski prikaz rada jonizacione komore u strujnom režimu (levo) i grafik zavisnosti struje od napona (desno)	29
Slika 4.2 Šematski prikaz sferne jonizacione komore.....	31
Slika 4.3 Sferna jonizaciona komora proizvođača PTW tip 32002	31
Slika 4.4 Šematski prikaz planparalelne jonizacione komore.....	32
Slika 4.5 Planparalelna jonizaciona komora proizvođača PTW tip 7862	32
Slika 5.1 Šematski prikaz strukture globalnog metrološkog sistema.....	36
Slika 5.2 Šematski prikaz lanca sledljivosti (levo) i piramide sledljivosti (desno) do Međunarodnog standarda	37
Slika 5.3 Šematski prikaz lanca kalibracije preko koga se ostvaruje sledljivost u metrologiji jonizujućeg zračenja.....	39
Slika 5.4 Mapa država članica IAEA/WHO SSDL mreže.....	39
Slika 7.1 Eksperimentalna postavka za proceduru merenja veličine HVL	44
Slika 7.2 3d model eksperimentalne postavke sa sledećim komponentama: 1. rendgenska cev, 2. točak sa filtrima, 3. kolimator 1, 4. monitorska jonizaciona komora, 5. kolimator 2 i 6. sferna jonizaciona komora.....	44
Slika 7.3 Set starih (levo) i novih apsorbera od bakra (desno)	45

Slika 7.4 Grafički prikaz trigonometrijskog izračunavanja prečnika snopa na poziciji detektora	46
--	----

Spisak tabela

Tabela 1 Minimalne vrednosti HVL za dijagnostičku rendgensku opremu iznad 70 kVp	21
Tabela 2 Vrednosti radijacionog faktora za različite vrste jonizujućeg zračenja.....	24
Tabela 3 Težinski faktori različitih tkiva ili organa	25
Tabela 4 Karakteristike N – 120 referentnog kvaliteta rendgenskog zračenja.....	43
Tabela 5 Rezultati merenja za eksperimentalnu postavku sa setom starih apsorbera od bakra	47
Tabela 6 Izmerena vrednost debljine poluslabljenja, referentna vrednost debljine poluslabljenja i relativna greška merenja za set starih apsorbera	49
Tabela 7 Maksimalna apsolutna devijacija izmerene debljine poluslabljenja u odnosu na referentnu vrednost prema standardu i maksimalna apsolutna devijacija dobijena eksperimentom za set starih apsorbera od bakra	49
Tabela 8 Rezultati merenja za eksperimentalnu postavku sa setom novih apsorbera od bakra	49
Tabela 9 Izmerena vrednost debljine poluslabljenja, referentna vrednost debljine poluslabljenja i relativna greška merenja za set novih apsorbera	50
Tabela 10 Maksimalna apsolutna devijacija izmerene debljine poluslabljenja u odnosu na referentnu vrednost prema standardu i maksimalna apsolutna devijacija dobijena eksperimentom za set novih apsorbera od bakra.....	51
Tabela 11 Doprinosi ponovljivosti merenja debljine starih filtara.....	54
Tabela 12 Doprinosi ponovljivosti merenja jačine kerme sekundarnim etalonom	55
Tabela 13 Doprinosi ponovljivosti merenja naelektrisanja monitorskom komorom.....	56
Tabela 14 Tabela ulaznih podataka na osnovu kojih se formiraju kombinacije za tabelu 14..	57
Tabela 15 Tabela podataka na osnovu kojih su dobijeni doprinosi u _{met} i u(HVL)	59
Tabela 16 Budžet merne nesigurnosti za set starih apsorbera od bakra.....	59

Spisak grafika

Grafik 1 Grafički prikaz slabljenja snopa nakon prolaska kroz različite debljine starih apsorbera od bakra	48
Grafik 2 Grafički prikaz linearne transformacije eksponencijalne krive slabljenja snopa za set starih apsorbera od bakra.....	48

Grafik 3 Grafički prikaz slabljenja snopa nakon prolaska kroz različite debljine novih apsorbera od bakra	50
Grafik 4 Grafički prikaz linearne transformacije eksponencijalne krive slabljenja snopa za set novih apsorbera od bakra	50

UVOD

Odmah nakon otkrića X-zračenja i radioaktivnosti, otvorile su se nove mogućnosti za naučna istraživanja i primenu ovih fenomena. Međutim, veoma brzo je postalo jasno da jonizujuće zračenje može izazvati negativne efekte po biološka tkiva, a kako bi se oni bolje razumeli, nastala je dozimetrija kao nova naučna disciplina. Dozimetrija ima za cilj da obezbedi pouzdane informacije o nivoima i distribuciji doza zračenja i osigura da izloženost zračenju bude kontrolisana i ograničena na bezbedne i prihvatljive nivoe. Kako bi se precizno procenio nivo izloženosti jonizujućem zračenju, neophodno je da dozimetar koji se koristi bude pravilno kalibrisan.

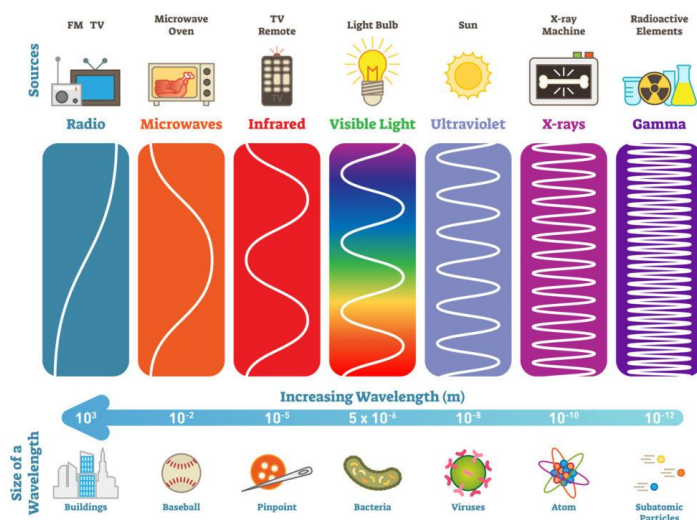
Prvi deo međunarodnog standarda ISO 4037 se upravo bavi proizvodnjom referentnih polja X i γ zračenja za kalibraciju dozimetara. Cilj ovog rada je validacija referentnog kvaliteta X-zračenja N-120, koji je realizovan u skladu sa preporukama pomenutog standarda na Institutu za nuklearne nauke „Vinča“. Validacija je sprovedena merenjem debljine poluslabljenja snopa, veličine poznate kao HVL (eng. *Half Value Layer*), što predstavlja jedan od tri moguća pristupa. HVL je izračunat za set starih i novih bakarnih filtara, pri čemu se bolji rezultat merenja očekuje za novije filtre. Kako bi se eksperiment smatrao uspešnim neophodno je da maksimalna apsolutna devijacija izmerene debljine poluslabljenja u odnosu na referentnu bude manja od 200 μm .

Da bi se stekao uvid u pouzdanost i tačnost rezultata merenja, odrađen je i budžet merne nesigurnosti. Budžet koji je se nalazi na samom kraju rada, odnosi se na eksperimentalnu postavku sa setom starih apsorbera od bakra.

1. X-ZRAČENJE

Krajem 19. veka dogodila su se tri izuzetno značajna otkrića koja su postavila temelje za naučni razvoj ne samo dijagnostičke i terapijske radiologije, već i druge naučne discipline. Wilhelm Konrad Röntgen 1895. godine otkriva zračenje koje je posedovalo do tada nepoznata svojstva i naziva ga "X-zračenje". U martu 1896. godine Antoine Henri Becquerel otkriva radioaktivnost, a 1898. godine Maria i Pierre Curie pronalaze radijum.

Za svoje revolucionarno otkriće koje je otvorilo vrata novoj oblasti medicine, W. Röntgen je dobio prvu u istoriji Nobelovu nagradu za fiziku, koju je primio u Stokholmu 1901. godine [Mould, 1995]. U eksperimentima koji su usledili nakon njegovog otkrića, utvrđeno je da su X-zraci elektromagnetni talasi visokih energija i kratkih talasnih dužina, a u elektromagnetnom spektru nalaze se između ultraljubičastog i gama zračenja. Kao što se sa slike 1.1 može videti talasna dužina X-zraka je reda veličine nanometra.

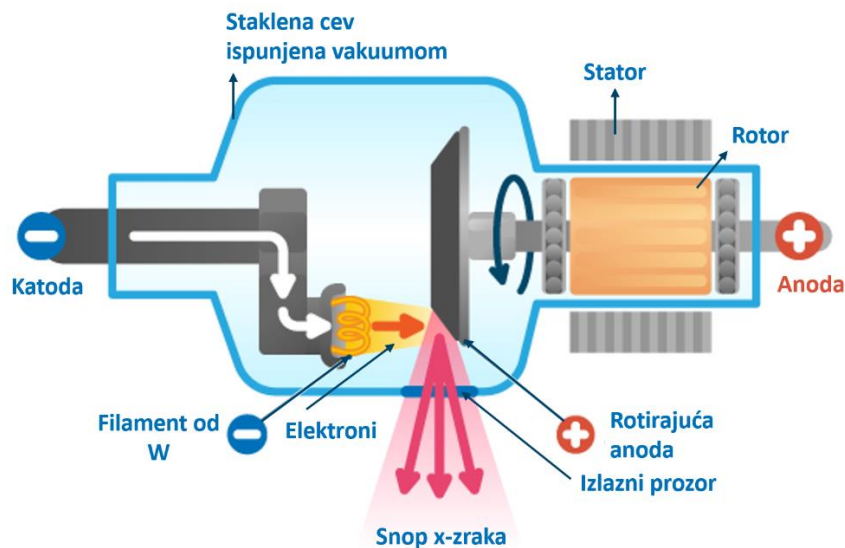


Slika 1.1 Različiti tipovi elektromagnetnih talasa i njihove talasne dužine

1.1 Produkcija X-zraka

Na slici 1.2 prikazane su glavne komponente jedne rendgenske cevi i proces nastajanja rendgenskog zračenja unutar nje. Ovaj proces se odvija ubrzavanjem elektrona u električnom polju, nakon čega dolazi do njihovog naglog usporavanja usled interakcija sa atomima materijala anode i emitovanja rendgenskih zraka.

Da bi se osiguralo električno polje u kojem će elektroni biti ubrzani, potrebno je postaviti dve elektrode, katodu i anodu, i priključiti ih na visoki napon. Katoda je konstruisana tako da se na njoj nalazi filament koji se najčešće pravi od volframa i kada se filament zagreje na oko 2200°C dolazi do oslobađanja elektrona sa površine materijala, a ovaj proces je poznat kao termoelektronska emisija. Oslobođeni elektroni se zatim ubrzavaju u prostoru između elektroda i usmeravaju prema anodi, kako bi interagovali sa atomima materijala od kojeg je ona napravljena. Elektroni gube svoju kinetičku energiju, usporavajući se usled mnogobrojnih sudara sa atomima anode, što dovodi do emisije elektromagnetnog zračenja, pri čemu se manje od 1 % kinetičke energije pretvara u rendgenske zrake. Preostala energija oslobađa se u vidu toplote, što dovodi do pregrevanja anode, pa je jedan od načina da se ovaj problem izbegne korišćenje rotirajuće anode. Rotacija anode omogućava da se toplota ravnomerno rasporedi po celoj njenoj površini, a ne samo na mesto koje je bombardovano elektronima. [Martin, 2006]



Slika 1.2 Rendgenska cev i njene komponente

Pre nego što napusti rendgensku cev, snop prolazi kroz izlazni prozor na koji se postavlja dodatna filtracija, koja je najčešće od aluminijuma, bakra, kalaja i olova. Osnovna uloga ove filtracije je povećanje kvaliteta snopa tj. srednje energije fotona, ali i vrednosti veličine HVL (eng. *Half Value Layer*), o kojoj će kasnije biti reči. Povećanjem kvaliteta snopa, smanjuje se broj niskoenergetskih fotona u snopu. U dijagnostičkoj radiologiji bi se ovakvi fotoni samo apsorbovali u telu pacijenta i na taj način bespotrebno povećali dozu.

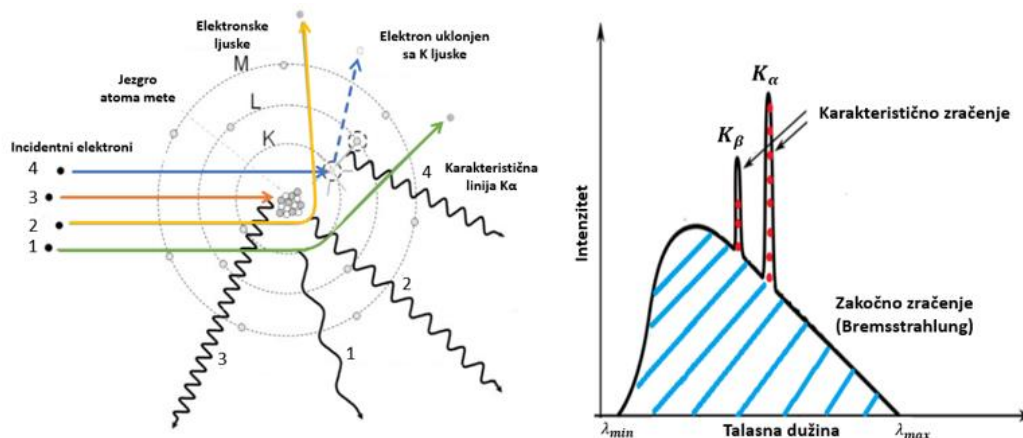
Pored dodatne, u rendgenskoj cevi postoji i inherentna filtracija, koja se odnosi na filtraciju snopa prilikom prolaska kroz različite materijale u samoj rendgenskoj cevi. Inherentna filtracija

se izražava u ekvivalentu milimetara aluminijuma (mm Al). Ako se, na primer, navodi da je inherentna filtracija 1 mm Al, to znači da je efekat filtracije uporediv sa efektom prolaska snopa kroz 1 mm aluminijuma. Dodatna filtracija se takođe može izraziti u mm Al, međutim, za dodatnu filtraciju se često koriste i drugi materijali, pa se ova vrsta filtracije izražava i u milimetrima ovih materijala.

Treba napomenuti i to da rendgenska cev mora biti ispunjena vakuumom, jer bi interakcije elektrona sa vazduhom ili nekim drugim gasom dovele do formiranja sekundarnih elektrona. Sekundarni elektroni bi usporavali primarne elektrone što bi rezultiralo velikim varijacijama u broju udara u metu, a samim tim i u energiji proizvedenih rendgenskih zraka.

1.2 Spektar X-zraka

Kao što je već spomenuto X-zruci nastaju usled interakcija elektrona, koji su prethodno oslobođeni termoelektronskom emisijom i ubrzani u električnom polju, sa atomima materijala od kojeg je anoda napravljena. U zavisnosti od vrste te interakcije nastaju i dva tipa X-zračenja, karakteristično i zakočno. Mehanizmi nastajanja ove dve vrste X-zraka, kao i njihovi spektri prikazani su na slici 1.3. Na slici 1.3 (levo) prikazana su četiri incidentna elektrona, od kojih prva tri učestvuju u formiranju zakočnog, a četvrti elektron u formiranju karakterističnog rendgenskog zračenja.



Slika 1.3 Princip nastajanja karakterističnog i zakočnog X-zračenja (levo) i njihov spektar (desno)

1.2.1 Karakteristično zračenje

Karakteristično zračenje nastaje usled Kulonove interakcije katodnih elektrona sa elektronima koji se nalaze na nekoj od unutrašnjih ljuski, K, L, M itd. Usled ove interakcije elektron sa

unutrašnje ljuske biva uklonjen iz atoma, a na njegovo mesto dolazi elektron sa viših energetskih nivoa i tom prilikom se emituje karakteristični X-zrak. Energija emitovanog fotona jednaka je razlici u energijama između elektrona na višem energetskom nivou i nivoa sa kojeg je elektron uklonjen. Elektroni koji su smešteni na ljusci koja se nalazi bliže jezgru, jače su u njoj vezani, pa je najveću energiju potrebno uložiti za uklanjanje elektrona sa K ljuske, zatim sa L i tako redom.

Sa slike se može videti da elektron označen brojem 4 interaguje sa elektronom koji se nalazi na K ljusci i izbacuje ga iz atoma, to upražnjeno mesto će najverovatnije biti popunjeno elektronom sa prve sledeće ljuske, L ljuske, i tada dolazi do emisije karakteristične linije koju obeležavamo sa K_{α} . Međutim, postoji i mogućnost da na upražnjeno mesto dođe elektron sa M nivoa i tada će se emitovati karakteristična linija K_{β} , koja je manjeg intenziteta od prethodne. Za spektar ovakvog zračenja kažemo da je diskretan, linije su tačno definisanih energija i talasnih dužina, a broj linija zavisi pre svega od vrste materijala od kojeg je meta napravljena, ali i od energije incidentnih elektrona. [Martin, 2006]

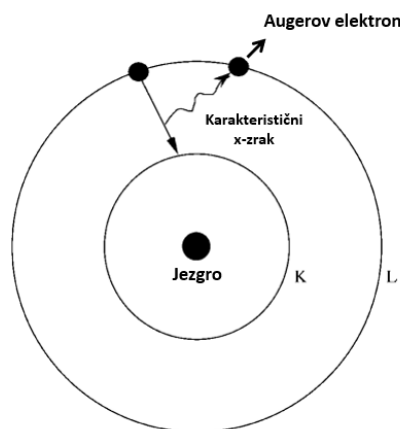
1.2.2 Zakočno zračenje (Bremsstrahlung)

Zakočno zračenje se emituje kao rezultat Kulonove interakcije katodnih elektrona sa jezgrima atoma materijala mete. Prilikom ovih interakcija, inicijalni elektroni mogu gubiti različite količine svojih kinetičkih energija, a pri svakom gubitku energije dolazi do usporavanja elektrona i skretanja sa prvobitnog pravca.

Na slici iznad prikazana su tri inicijalna elektrona i svaki od njih se nalazi na različitom rastojanju od jezgra. Elektron obeležen brojem 1 će izgubiti najmanji deo svoje početne energije (najmanje skreće sa prvobitnog pravca) jer se nalazi na najvećem rastojanju tj. Kulonova sila koja između njih vlada je malog intenziteta. Elektron broj 2 se nalazi u blizini jezgra i njegovi gubici su umereni, ali veći od gubitaka prvog elektrona, pa će samim tim i skretanje biti pod većim uglom. Treći elektron je pod dejstvom veoma jake privlačne sile jer se nalazi na veoma malom rastojanju od jezgra i on će izgubiti najveći deo svoje početne kinetičke energije. Da li elektron pretvara deo ili celu svoju energiju u emisiju elektromagnetnog zračenja zavisi od faktora kao što su: početna kinetička energija elektrona, materijal od kojeg je anoda napravljena, stepen skretanja sa prvobitnog pravca, putanja kojom se elektron kretao itd. [Martin, 2006] Iz prethodne priče se može zaključiti da je spektar zakočnog zračenja kontinuiran, tj. u njemu su prisutni fotoni svih mogućih energija i talasnih dužina, što se može videti na slici 1.3 (desno).

1.2.3 Augerov efekat

Augerov efekat je efekat koji se javlja kada karakteristični X-zrak ne napusti atom, već svoju energiju preda elektronu iz najbliže ljuske i tako omogućujući da taj elektron napusti atom. Ovakvo emitovani elektroni nazivaju se Augerovi elektroni. Na slici 1.4 prikazan je jedan takav slučaj. Sa slike se vidi da mesto na K ljusci ostaje upražnjeno, ubrzo biva popunjeno elektronom sa najbliže L ljuske i tada dolazi do formiranja karakterističnog X-zraka. Međutim, umesto njegove emisije, energija se prenosi na drugi elektron iz njemu najbliže ljuske, a to je opet L ljuska i elektron dobija dovoljnu energiju da napusti atom. L ljuska je u ovom konkretnom slučaju ostala sa dva elektrona manje i ta mesta će biti popunjena sa elektronima iz M ili daljih energetskih nivoa i ponekad može doći do lančane emisije Augerovih elektrona. Naučno je dokazano da se kod atoma sa niskim rednim brojem Augerov efekat češće dešava od emisije karakterističnog zračenja, dok je kod težih atoma obrnuta situacija. Ovo je još jedan od razloga zašto se mete u rendgenskim cevima prave od elemenata sa većim atomskim brojem Z. [Martin, 2006]



Slika 1.4 Augerov efekat

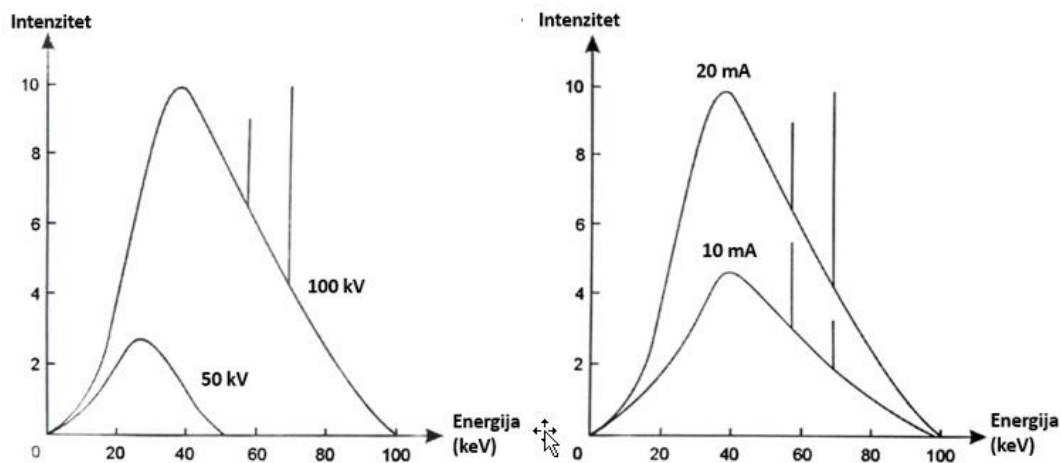
1.3 Uticaj napona i struje rendgenske cevi na spektar

Napon i struja rendgenske cevi su dva najvažnija faktora u kreiranju spektra rendgenskog zračenja. Kvalitet i intenzitet su osobine kojima se opisuje snop dobijen u rendgenskoj cevi. Kvalitet snopa odnosi se na prodornost snopa, a prodornost je određena energijom fotona X-zračenja. Što su u snopu više prisutni fotoni većih energija, to će taj snop biti prodorniji i kvalitetniji i obrnuto. Intenzitet predstavlja broj fotona koji u jedinici vremena napušta rendgensku cev. Ukoliko se menjaju napon i struja rendgenske cevi doći će i do promene ovih

osobina, što je ilustrovano na slici 1.5. Za svaku primenu rendgenskog zračenja potrebno je dobiti odgovarajući spektar, a to se upravo postiže podešavanjem napona i struje.

Povećanjem napona cevi, povećava se razlika u potencijalu između katode i anode što znači da će se elektroni više ubrzati i sa većom početnom kinetičkom energijom udariti u anodu. To dalje znači da će veći broj X-zraka napustiti rendgensku cev tj. intenzitet snopa je veći. Pored intenziteta, povećava se i kvalitet snopa jer je povećana i mogućnost formiranja X-zraka većih energija.

Povećanjem struje rendgenske cevi povećava se broj elektrona koji polaze sa katode, a samim tim i X-zraka koji napuštaju cev, što znači da se povećava intenzitet snopa. Igranjem sa vrednostima struje cevi neće se dobiti kvalitetniji snop jer koliko god fotona da nastane, njihova maksimalna energija je ograničena naponom koji se u ovom slučaju ne menja.



Slika 1.5 Uticaj napona i struje rendgenske cevi na spektar X-zračenja

2. INTERAKCIJA FOTONA SA MATERIJOM

Fotoni su nenaelektrisane čestice koje se kreću brzinom svetlosti i predstavljaju indirektno jonizujuće zračenje. Sa materijom interaguju kroz četiri osnovna tipa interakcije, a od energije upadnog fotonskog snopa zavisi koji tip interakcije će biti dominantan. Fotoni indirektnim putem jonizuju sredinu tako što u ovim interakcijama oslobađaju elektrone, koji dalje direktno jonizuju materiju kroz koju prolaze.

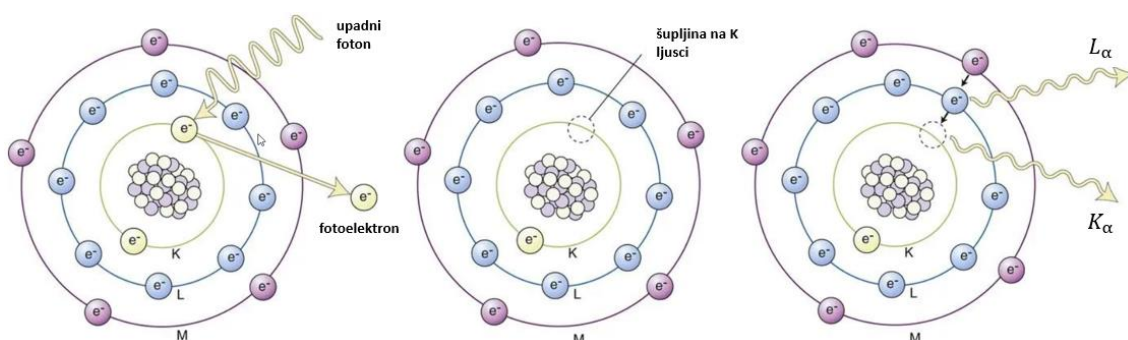
2.1 Fotoelektrični efekat

Fotoelektrični efekat prikazan je na slici 2.1 i predstavlja interakciju fotona sa vezanim elektronom iz unutrašnje ljuske. U ovoj interakciji foton se potpuno apsorbuje, predajući apsolutno svu svoju energiju elektronu, a elektron napušta atom sa kinetičkom energijom:

$$E_e = E_f - E_v \quad (1)$$

gde je E_f energija upadnog fotona, a E_v energija veze elektrona.

Mesto sa kojeg je otišao elektron ostaje upražnjeno i ubrzo biva popunjeno sa nekim od elektrona sa viših energetskih nivoa, pri čemu dolazi do emisije linije X-zračenja, karakteristične za taj konkretan prelaz. Kako bi do interakcije došlo neophodno je da upadni foton ima energiju sličnu ili veću od energije kojom je elektron sa kojim interaguje vezan. Najveća je verovatnoća da će se ova interakcija odigrati sa elektronom sa K ljuske. Procenjeno je da se oko 80% od svih fotoefekata odigra na K elektronima. [Krmr, 2013]



Slika 2.1 Fotoelektrični efekat

Efikasni presek za ovu interakciju opisan je sledećim izrazom:

$$\sigma_{fe}(E, Z) = k \frac{Z^n}{E^m} \quad (2)$$

gde je k konstanta, Z atomski broj materijala kroz koji zračenje prolazi, E energija fotona, a n i m su eksponenti sa vrednostima u opsegu od $3.6 - 5.3$ i $2.5 - 3.5$, respektivno, pri čemu veće vrednosti odgovaraju niskim atomskim brojevima. [IAEA, 2014]

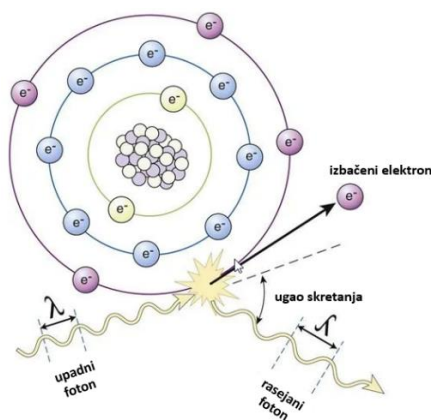
Iz gornjeg izraza za efikasni presek vidi se veoma jaka zavisnost od atomskog broja i inverzna zavisnost od energije fotona.

2.2 Rejljevo rasejanje

Rejljevo rasejanje se javlja pri niskim energijama upadnog fotona i u dijagnostičkom opsegu energija njegov uticaj je manji od 5% [IAEA, 2014]. Kod ovog tipa interakcije upadni foton interaguje sa elektronom atoma, predaje mu energiju i izaziva vibriranje elektrona frekvencijom zračenja. Elektron zatim emituje zračenje koje ima istu frekvenciju kao zračenje koje je vibraciju izazvalo, ali u različitom pravcu. To znači da u ovom procesu nema nikakvog prenosa energije, zakon održanja energije je u potpunosti očuvan, već samo dolazi do rasejanja inicijalnog fotona.

2.3 Komptonov efekat

Komptonov efekat je interakcija između fotona i slobodnog elektrona iz spoljašnje ljuske i dešava se kada foton poseduje energiju veću od energije kojom je elektron vezan. Foton predaje deo svoje energije, rasejava se i nastavlja da se kreće sa energijom umanjenom za energiju veze elektrona sa kojim je interagovao. Ovaj tip interakcije prikazan je na slici ispod.



Slika 2.2 Komptonovo rasejanje

Odnos energija rasejanog fotona E' i upadnog fotona E , izražava se sledećom relacijom:

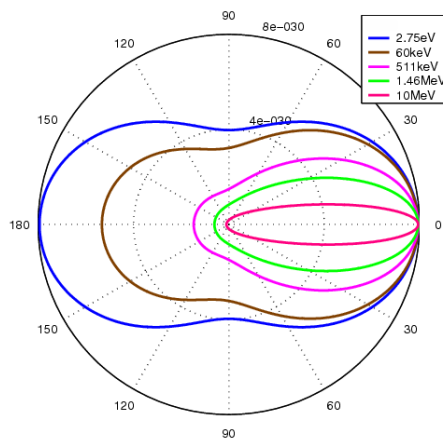
$$\frac{E'}{E} = \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (3)$$

Gde α predstavlja bezdimenzioni odnos E/mc^2 , a θ ugao između pravca upadnog i rasejanog fotona.

Rasejani elektron napušta atom sa kinetičkom energijom:

$$T_e = E' - E = \frac{\alpha(1 - \cos \theta)E}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

Na slici 2.3 prikazana je ugaona zavisnost intenziteta rasejanog zračenja i jasno se vidi da je pri niskim energijama verovatnoća emisije fotona simetrična, što znači da se sa istom verovatnoćom foton može emitovati i u smeru upadnog fotona i u suprotnom smeru. Kako energija upadnog fotona raste, raste i verovatnoća da će se nakon interakcije foton emitovati u istom pravcu i smeru sa kojeg je i došao.



Slika 2.3 Ugaona zavisnost intenziteta rasejanog Komptonovog zračenja

Efikasni presek za ovu interakciju se može predstaviti sledećom pojednostavljenom relacijom:

$$\sigma_{com} = \frac{Z}{E} \quad (5)$$

Iz gornjeg izraza se vidi da verovatnoća za Komptonov efekat opada sa porastom energije fotona, ali je ova zavisnost dosta manja nego kod fotoelektričnog efekta. Ovaj efekat zavisi od

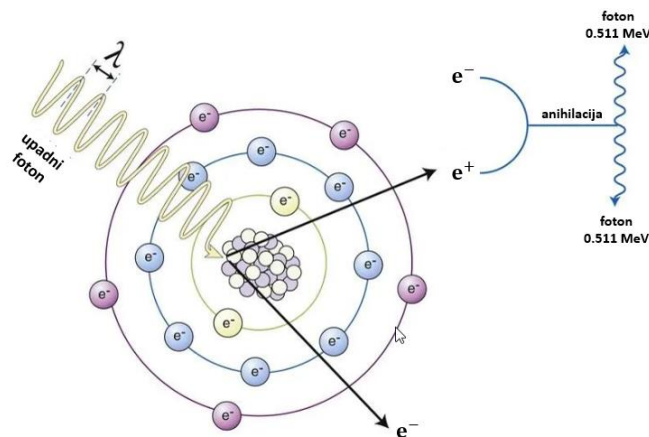
broja elektrona po gramu materijala, a ispostavlja se da za većinu materijala taj broj slabo opada sa porastom rednog broja materijala. Tako da se nameće zaključak da Komptonov efekat slabo zavisi od rednog broja Z. [Petrović, 2018]

2.4 Stvaranje parova

Poslednji mehanizam, prikazan na slici 2.4, se dešava kada foton ima energiju veću od 1.022 MeV i odvija se u Kulonovom polju jezgra, pri čemu se jezgru predaje zanemarljivo mala energija fotona dok se sva preostala energija troši na formiranje para elektron-pozitron. Stvoreni par se emituje u pravcu upadnog fotona. Ukoliko foton ima energiju veću od prethodno pomenutog praga, sva energija se deli na novonastale čestice koje će dalje moći da jonizuju sredinu. Kada pozitron izgubi svoju energiju doživljava anihilaciju sa elektronom pri čemu dolazi do emisije dva fotona energije 0.511 MeV koji se emituju pod uglom od 180° . [Krmr, 2013] Energijski balans je prikazan sledećim izrazom:

$$E_f = T_- + T_+ + 2m_0c^2 \quad (6)$$

Energija fotona konvertuje se u dvostruku energiju mirovanja elektrona $2m_0c^2$, što je i prag za odvijanje ove interakcije, i u kinetičke energije elektrona T_- i pozitrona T_+ .



Slika 2.4 Mehanizam stvaranje para elektron-pozitron

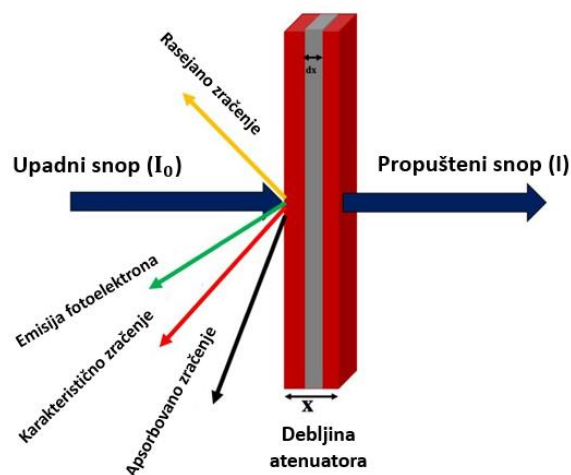
2.5 Atenuacija rendgenskog zračenja

Prilikom prolaska fotonskog snopa kroz neki medijum fotoni doživljavaju niz malopre spomenutih interakcija sa atomima i molekulima materijala. Rezultat ovih interakcija je oslabljen tj. atenuiran snop. Kao što se na slici ispod može videti, fotoni mogu u potpunosti da nestanu tako što svu svoju energiju predaju elektronu sa unutrašnje ljuske ili utroše na stvaranje

para elektron-pozitron. Druga mogućnost je da u interakcijama predaju deo svoje energije i nastave da se kreću sa umanjenom energijom u pravcu različitom od upadnog ili da pak ne dožive nikakvu interakciju sa materijalom.

Na slici 2.5 je prikazan najjednostavniji slučaj, a to je prolazak monoenergetskog snopa kroz apsorber debljine dx . Sa druge strane apsorbera postavlja se detektor koji meri sve fotone koji su do njega dospeli bez interakcije. Intenzitet snopa opada prema sledećoj relaciji:

$$dI = -\mu I dx \quad (7)$$



Slika 2.5 Prolazak monoenergetskog snopa kroz apsorber debljine dx

Nakon integracije se dobija atenuacioni zakon koji opisuje kako se intenzitet zračenja menja prilikom prolaska kroz apsorber određene debljine, ali pod uslovom da su svi fotoni iz snopa istih energija:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (8)$$

Gde je I_0 početni intenzitet fotonskog snopa, I intenzitet snopa nakon prolaska kroz apsorber debljine x , a μ linearni atenuacioni koeficijent.

Linearni atenuacioni koeficijent je veličina koja daje informacije o atenuaciji fotonskog snopa uzimajući u obzir debljinu materijala, izražava se u m^{-1} ili cm^{-1} i direktno je povezana sa efikasnim presekom preko izraza: [IAEA, 2014]

$$\mu = n\sigma = \frac{1000N_A\rho}{A_r}\sigma \quad (9)$$

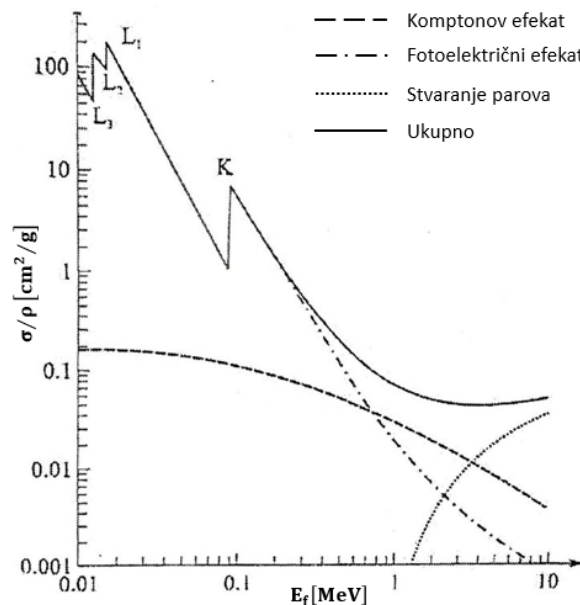
U jednačini iznad n je broj atoma po jedinici zapremine materijala, σ ukupan efikasni presek interakcije po atomu, N_A Avogadrov broj, A_r relativna atomska masa, a ρ gustina materijala.

Kako linearni atenuacioni koeficijent zavisi od gustine apsorbera, njegova vrednost će se razlikovati od materijala do materijala i da bi se izbegla ova zavisnost uveden je maseni atenuacioni koeficijent μ_m . On se izražava u m^2/kg ili cm^2/g , a računa na osnovu sledećeg izraza:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (10)$$

Dakle, linearni atenuacioni koeficijent opisuje atenuaciju zračenja u materijalu po jedinici dužine, dok maseni atenuacioni koeficijent opisuje atenuaciju po jedinici mase. Oba koeficijenta se koriste za opisivanje atenuacije fotonskog snopa prilikom prolaska kroz neki materijal. Ukupan maseni atenuacioni koeficijent prikazan je na slici 2.6 i dobija se sabiranjem doprinosa pojedinačnih koeficijenata svake od malopre spomenutih tipova interakcija:

$$\mu = n\sigma_{FE} + n\sigma_{COM} + n\sigma_{PAR} \quad (11)$$



Slika 2.6 Maseni atenuacioni koeficijent za pojedinačne tipove interakcija i ukupni maseni atenuacioni koeficijent

Pored linearnog i masenog atenuacionog koeficijenta, za opisivanje slabljenja snopa koristi se i debljina poluslabljenja snopa, poznata kao prvi HVL(HVL^{1st}). Prvi HVL je veličina koja se definiše kao ona debljina apsorbera koja smanjuje intenzitet upadnog snopa na polovinu njegove prvobitne vrednosti i najčešće se izražava u milimetrima aluminijuma (mm Al) ili milimetrima bakra (mm Cu). Pored ove veličine, za opisivanje kvaliteta snopa koristi se i drugi HVL (HVL^{2nd}) koji predstavlja dodatnu debljinu apsorbera koja je potrebna da se intenzitet zračenja, koji je već smanjen prvim HVL-om, ponovno smanji za pola. Pored napona i struje rendgenske cevi, i HVL ima uticaj na oblik dobijenog spektra X-zračenja. Što je vrednost ove veličine veća, dobija se prodorniji i kvalitetniji snop tj. srednja energija fotona u snopu je veća. Stoga, za svaku vrednost napona cevi postoji minimalna vrednost debljine poluslabljenja koja se propisuje standardom, a ove standarde postavljaju primarne dozimetrijske laboratorije. Postojanje zahteva za minimalnu vrednost HVL-a je jako važna stavka, jer se time obezbeđuje eliminisanje mekih rendgenskih zraka, čija je jedina uloga povećanje doze za pacijente. U tabeli ispod, kao primer su navedene minimalne vrednosti ove veličine za dijagnostičku rendgensku opremu iznad 70 kVp. [Martin, 2006]

Tabela 1 Minimalne vrednosti veličine HVL za dijagnostičku rendgensku opremu iznad 70 kVp

Napon rendgenske cevi (kVp)	70	80	90	100	110	120	130	140	150
HVL _{min} (mm Al)	1.5	2.3	2.5	2.7	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1

3. DOZIMETRIJSKE VELIČINE

Ubrzo nakon otkrića rendgenskog zračenja krenula je i njegova primena u naučne, dijagnostičke i terapijske svrhe. Već 1896. godine X-zračenje je korišćeno za lečenje raka dojke, tretman je trajao 18 dana, a pacijentkinja je svakodnevno bila izložena otvorenom snopu nešto više od jednog sata.[Petrović, 2018] Kako nisu postojali nikakvi filtri koji bi redukovali niskoenergetske fotone, izlaganje zračenju izazivalo bi kožne reakcije na mestima koja su bila tretirana. Bilo je očigledno da zračenje ima negativne efekte i da je neophodno uspostaviti određene veličine koje će omogućiti da se zračenje opiše i kvantifikuje. Pored toga, bilo je potrebno razviti uređaje koji će moći da izmere efekte jonizujućeg zračenja i na kraju osmisliti odgovarajuće mere zaštite. Kao odgovor na sve ove izazove, razvijena je dozimetrija kao posebna naučna oblast. U ovom delu biće predstavljene dozimetrijske veličine koje su do danas uvedene.

Dozimetrijske veličine se mogu podeliti na zaštitne i operativne. Prema Međunarodnoj komisiji za zaštitu od zračenja **ICRP** (eng. *International Commission on Radiological Protection*) u zaštitne veličine spadaju: srednja apsorbovana doza za tkiva ili organe D_T , ekvivalentna doza u organu ili tkivu H_T i efektivna doza E . Ove veličine se zasnivaju na merenjima energije koja se deponuje u organima i tkivima ljudskog tela. Da bi se povezao odnos između doze zračenja i rizika od zračenja (štetnosti), potrebno je uzeti u obzir različite biološke efekte zračenja i varijabilnost osetljivosti organa i tkiva na jonizujuće zračenje različitog kvaliteta. [IAEA, 1999]

Ekvivalentna doza i efektivna doza ne mogu se direktno izmeriti u telesnim tkivima, pa Međunarodni komitet za radiološke jedinice i merenja **ICRU** (eng. *International Commission on Radiation Units and Measurements*) uvodi operativne veličine koje se mogu meriti i iz kojih se mogu proceniti ekvivalentna doza i efektivna doza. Operativne veličine za monitoring radnog okruženja su ambijentalni ekvivalent doze $H^*(d)$ i usmereni ekvivalent doze $H'(d, \Omega)$, a veličina za individualni monitoring je lični ekvivalent doze $H_p(d)$.

Zaštitne i operativne veličine su povezane preko konverzionih koeficijenata sa fizičkim veličinama kao što su fluens Φ , kerma u vazduhu K_a i apsorbovana doza D . Konverzioni faktori se dobijaju korišćenjem kompjuterskih programa i odgovarajućih matematičkih modela i omogućavaju konverziju fizičkih veličina u dozimetrijske veličine. Ovo se radi zbog činjenice da fizičke veličine ne mogu dati nikakve dalje informacije o štetnosti jonizujućeg zračenja, već se koriste za opisivanje polja zračenja.

Fluens, Φ

Fluens Φ predstavlja broj čestica dN koje ulaze u elementarni deo površi sfere dA koja je normalna na upadni snop. Jedinica za fluens je $[m^{-2}]$, a predstavljen je sledećim izrazom:

$$\Phi = \frac{dN}{dA} \quad (12)$$

Kerma, K_a

Kao što je već pomenuto ranije, rendgensko zračenje indirektnim putem jonizuje sredinu tako što, kroz već poznate tipove interakcije, oslobađa sekundarne naelektrisane čestice. Zatim, sekundarne čestice prenose dalje energiju u procesima jonizacije i ekscitacije. Kerma K_a (eng. *Kinetic Energy Released in Material*) je veličina koja je povezana sa dozom indirektno jonizujućeg zračenja i predstavlja početnu kinetičku energiju svih naelektrisanih čestica oslobođenih zračenjem po jedinici mase:

$$K_a = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (13)$$

SI jedinica za kermu je $[J/kg]$ i naziva se grej $[Gy]$.

Apsorbovana doza, D

Apsorbovana doza predstavlja osnovnu fizičku veličinu u dozimetriji. Koristi se za sve vrste jonizujućeg zračenja i svaku geometriju ozračavanja i služi za kvantifikaciju bioloških efekata jonizujućeg zračenja. Definiše se kao količnik dE i dm , gde je dE prosečna energija koju jonizujuće zračenje prenosi na materiju mase dm , tj.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (14)$$

SI jedinica je ista kao i za kermu, tj. $[J/kg]$ ili $[Gy]$.

3.1 Zaštitne dozimetrijske veličine

3.1.1 Srednja apsorbovana doza u tkivu ili organu

Apsorbovana doza D_T predstavlja srednju vrednost energije koja se apsorbuje u elementu mase pri prolasku zračenja kroz određeni organ ili tkivo i predstavljena je sledećom relacijom:

$$D_T = \frac{E_T}{m_T} \quad (15)$$

gde je m_T masa tkiva ili organa, a E_T ukupna energija koju zračenje predaje tom tkivu. Jedinica za apsorbovanu dozu je [J/kg] ili [Gy]. Apsorbovana doza nije dovoljna kako bi se stekao uvid u nastajanje štetnih efekata jonizujućeg zračenja, pa se koristi za izvođenje i izračunavanje efektivne i ekvivalentne doze. [IAEA, 2014]

3.1.2 Ekvivalentna doza

Ekvivalentna doza H_T uzima u obzir biološke efekte različitih tipova zračenja. Uvedena je zbog činjenice da će različite vrste zračenja izazvati različite biološke efekte na određenom tkivu ili organu, pri istoj srednjoj apsorbovanoj dozi. Za izračunavanje ove veličine koristi se sledeća jednačina:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (16)$$

U jednačini iznad w_R predstavlja radijacioni težinski faktor zračenja, a D_T apsorbovanu dozu u tkivu ili organu koje je izloženo tipu radijacije R. Kao što se iz jednačine može zaključiti, što je radijacioni težinski faktor zračenja veći, veći su i štetni efekti na organ ili tkivo. Tabela 2 prikazuje vrednosti ovih faktora za različite tipove radijacije. [ICRP, 2007]

Tabela 2 Vrednosti radijacionog faktora za različite vrste jonizujućeg zračenja

Tip zračenja	Radijacioni težinski faktor w_R
Fotoni (svih energija)	1
Elektroni (svih energija) i mioni	1
Protoni i naelektrisani pioni	2
Alfa čestice, fisioni fragmenti, teški joni	20
Neutroni	Neprekidna kriva koja zavisi od energije neutrona

Jedinica za ekvivalentnu dozu je džul po kilogramu [J/kg] tj. sivert [Sv].

3.1.3 Efektivna doza

Efektivna doza E je veličina koja je uvedena zbog činjenice da će različiti organi i tkiva drugačije odreagovati na istu ekvivalentnu dozu, tj. uzima u obzir radiosenzitivnost organa i tkiva. Izražava se u sivertima [Sv], a izračunava na osnovu izraza:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (17)$$

gde je w_T težinski faktor tkiva, a H_T ekvivalentna doza u organu ili tkivu. Težinski faktor tj. faktor rizika za određeni organ ili tkivo predstavlja udeo štetnosti stohastičkih efekata koji se javljaju u tkivu u odnosu na celi organizam. Kada je ozračeno celo telo, težinski faktori se sabiraju i daju vrednost 1:

$$\sum_T w_T = 1 \quad (18)$$

U tabeli 3. prikazani su tkivni težinski faktori preporučeni od strane ICRP-a:

Tabela 3 Težinski faktori različitih tkiva ili organa

Tkivo ili organ	w_T	$\sum w_T$
Koštana srž (crvena), debelo crevo, želudac, dojke, preostala tkiva i organi ¹	0.12	0.72
Gonade	0.08	0.08
Mokraćna bešika, jednjak, jetra, štitasta žlezda	0.04	0.16
Kosti, mozak, pljuvačne žlezde, koža	0.01	0.04
Ukupno		1.00

¹ Nadbubrežne žlezde, ekstratorakalna (ET) regija, žučna kesa, srce, bubrezi, limfni čvorovi, mišićno tkivo, usna duplja, pankreas, prostata, tanko crevo, slezina, timus (grudna žlezda), materica/grlič materice

3.2 Operativne dozimetrijske veličine

3.2.1 Lični ekvivalent doze

Prema Osnovnim Bezbednosnim Standardima **BSS** (eng. *Basic Safety Standards*) lični ekvivalent doze $H_p(d)$ je preporučena veličina za individualni dozimetrijski monitoring. [IAEA, 1999] To je veličina koja se koristi za merenje doze zračenja na tačno određenoj tački na telu, na dubini d od površine tela. Jedan od načina merenja je da se detektor postavlja na površinu tela i prekriva nekim materijalom koji bi trebalo da simulira tkivo. Tako se obezbeđuje zaštita detektora od spoljašnjih uticaja i detektor može nesmetano da izmeri dozu na određenoj dubini d .

Prema ICRP Publikaciji 103, preporučuje se merenje doze na referentim dubinama 0.07 mm, 10 mm i 3 mm. Lični dozni ekvivalent $H_p(0.07)$ se koristi za slabo prodorna zračenja i procenu ekvivalentne doze kože jer se smatra da se osetljive ćelije kože nalaze između 0.05 i 0.1 mm, ispod površine kože. Ekvivalent doze $H_p(10)$ se koristi za merenje doze zračenja koja mogu da prodru dublje u tkivo, a $H_p(3)$ se koristi za procenu doze koju primi očno sočivo. [ICRP, 2007; IAEA, 1999]

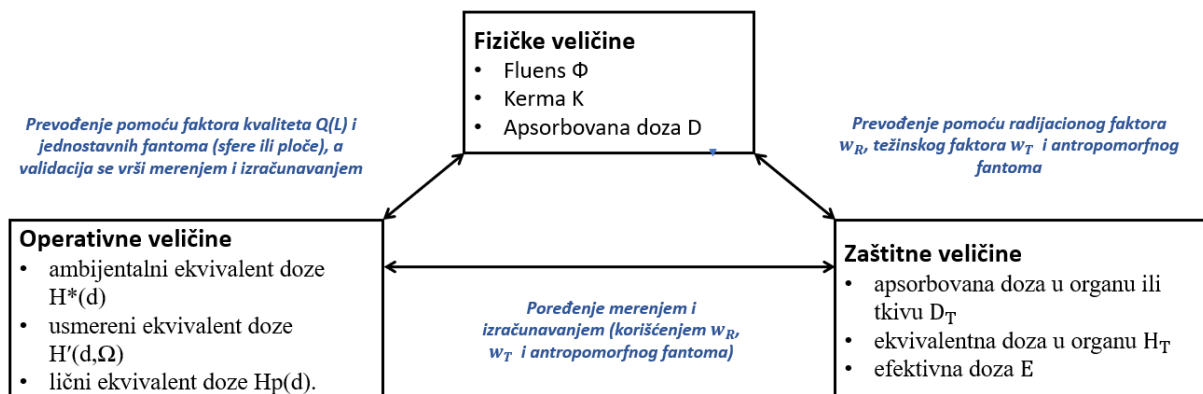
3.2.2 Ambijentalni ekvivalent doze

Ambijentalni ekvivalent doze $H^*(d)$ predstavlja dozu koja bi se izmerila na dubini d , u ICRU sferi, koja je postavljena suprotno od pravca upadnog zračenja. ICRU sfera je fantom sfernog oblika i napravljena je od materijala koji ima slična fizička svojstva kao ljudsko tkivo. Prečnik sfere je 30 cm, gustina je 1 g/cm^3 , a sastoji se od 76,2 % kiseonika, 11,1 % ugljenika, 10,1 % vodonika i 2,6% azota. Preporučena dubina na kojoj se meri ambijentalni ekvivalent doze je 10 mm, pa se u literaturi može češće sresti oznaka $H^*(10)$. Prilikom merenja ove veličine potrebno je da polje zračenja bude uniformno jer je bitno da instrument koji se koristi ima izotropan odziv.

3.2.3 Usmereni ekvivalent doze

Usmereni ekvivalent doze $H'(d, \Omega)$ se odnosi na ekvivalentnu dozu koja bi se izmerila u tački na dubini d unutar ICRU sfere, koja se nalazi na radijusu sfere koji je pod prostornim uglom Ω u odnosu na pravac upadnog snopa. Preporučene dubine za slabo prodorno i snažno prodorno zračenje su 0,07 mm i 10 mm, respektivno, a smer zračenja Ω treba da se navede zajedno sa specifikacijom referentne dubine d . [IAEA, 1999] Za merenje usmerenog doznog ekvivalenta potrebno je da polje zračenja bude uniformno u dimenzijama instrumenta.

Radi lakšeg razumevanja, veza između gore pomenutih dozimetrijskih veličina ilustrovana je na sledećoj slici.



Slika 3.1 Veza između fizičkih, zaštitnih i operativnih dozimetrijskih veličina

4. GASNI DETEKTORI

Jonizujuće zračenje prolaskom kroz materijal može izazvati različite efekte, kao što su jonizacija atoma i molekula, emisija svetlosti ili pak hemijske promene. Ova činjenica je iskorišćena za razvoj različitih vrsta detektora jonizujućeg zračenja, kao što su gasni detektori, scintilacioni detektori, poluprovodnički detektori itd.

Svaki detektorski sistem sastoji se od:

- **Dozimetrijskog detektora** – u čijoj se aktivnoj zapremini dešava interakcija zračenja sa materijom i u zavisnosti od tipa detektora tj. vrste aktivne zapremine, njegova uloga je da kvantifikuje efekat koji je zračenje izazvalo
- **Mernog uređaja tj. elektrometra** – čija je uloga da preuzme i prikaže podatke dobijene od detektora

U ovom poglavlju će detaljnije biti opisani gasni detektori, tačnije jonizacione komore, zbog činjenice da je ovaj tip detektora korišćen u eksperimentu.

U gasne detektore zračenja, pored malopre spomenutih jonizacionih komora, spadaju i proporcionalni brojači i Geiger-Müller (GM) brojači. Gasni detektori su jedni od starijih i najčešće korišćenih vrsta detektora, koriste se za detekciju gama, rendgenskog i čestičnog zračenja. Svi gasni detektori rade na istom principu, a to je sakupljanje naelektrisanja koje zračenje stvori unutar gasa tj. unutar aktivne zapremine detektora, pomoću električnog polja. Jonizujuće zračenje, direktnim ili indirektnim putem, jonizuje gas unutar detektora stvarajući jonske parove, koji će se iskoristiti za dobijanje elektronskog signala. Na koji način će se stvoreni jonski parovi iskoristiti za kreiranje elektronskog signala zavisi od vrste gasnog detektora i u tome leži i glavna razlika između njih. Vrsta gasa i pritisak u gasnom detektoru se biraju u zavisnosti od namene detektora i zračenja koje treba da se detektuje. Takođe, konstrukcija detektora se prilagođava nameni. To uključuje oblik detektora, položaj elektroda i materijal od kojeg je izgrađen sam detektor.

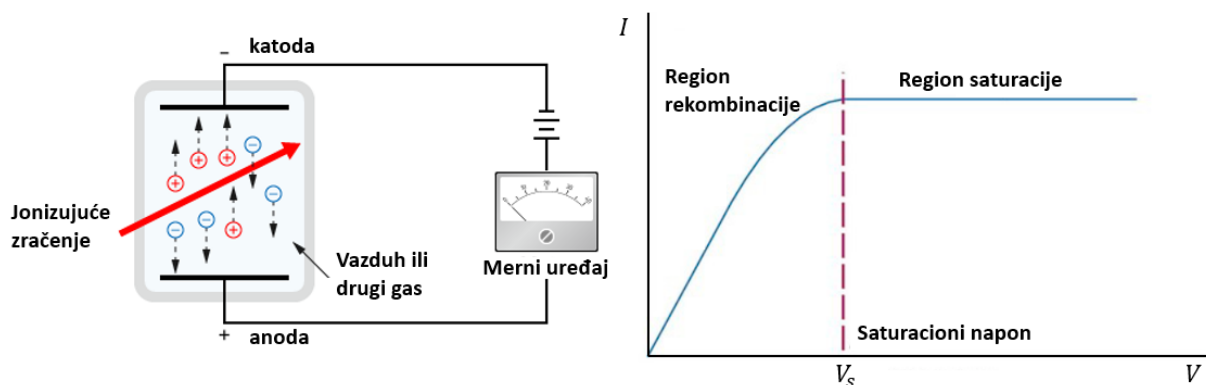
4.1 Jonizacione komore

4.1.1 Princip rada jonizacionih komora

Rendgensko zračenje jonizaciju gasa unutar jonizacione komore vrši indirektnim putem, što je detaljno objašnjeno u poglavlju 2. Elektroni, oslobođeni fotoefektom i Komptonovim efektom,

kao naelektrisane čestice na svom putu mogu da izazovu jonizaciju atoma ili molekula gasa ili pak njihovu ekscitaciju. Način na koji će elektron interagovati sa molekulima ili atomima gasa unutar jonizacione komore direktno je povezan sa njegovom energijom. Kada elektron poseduje dovoljnu energiju, u interakciji sa molekulom gasa izaziva izbacivanje elektrona iz njegove ljuske tj. dolazi do njegove jonizacije. Molekul koji je pre interakcije bio neutralan, sada postaje pozitivan jon i zajedno sa slobodnim elektronom čini jonski par. Da bi inicijalni elektron mogao da jonizuje okolinu kroz koju prolazi, potrebno je da poseduje najmanje 10 do 25 elektron-volti (eV) energije. [Knoll, 1999] Ova energija se zove energija jonizacije i različita je za različite gasove. Drugi mehanizam interakcije odvija se kada elektron ne poseduje dovoljnu energiju za jonizaciju molekula gasa, već ga dovodi u pobuđeno stanje. Inicijalni elektron u interakciji preda deo energije elektronu molekula, koji onda usled viška energije odlazi na viši energetski nivo. Nakon nekog vremena, elektron silazi na svoje osnovno stanje i tom prilikom dolazi do emisije karakterističnog X-zraka.

Jedina informacija koja je bitna za detektor jeste broj stvorenih jonskih parova duž putanje zračenja. U zavisnosti od energije zračenja, vrste gasa u komori i same vrste zračenja zavisi i koliko će se jonskih parova formirati unutar aktivne zapremine. Na slici 4.1 predstavljen je šematski prikaz jedne jonizacione komore koja radi u strujnom režimu rada (levo) i grafik zavisnosti struje od napona (desno).



Slika 4.1 Šematski prikaz rada jonizacione komore u strujnom režimu (levo) i grafik zavisnosti struje od napona (desno)

Kako bi se sakupili svi jonski parovi koji su stvoreni u jonizacijama, primenjuje se električno polje. Naime, ako se u prostor u kojem se nalaze joni i elektroni postave dve elektrode i između njih primeni napon, doći će do difuzije naelektrisanja prema suprotno naelektrisanjoj elektrodi. Usled velike razlike u masi između ostatka molekula i elektrona, postoji i značajna razlika u mobilnosti ovih naelektrisanja. Vreme koje je potrebno da elektron difunduje do anode je reda

veliĉine mikrosekundi, dok je pozitivnom jonu potrebno hiljadu puta više vremena, pa se ovo kretanje moēe zanemariti.[Steinmeyer, 2003] Struja koja teĉe u spoljašnjem kolu biĉe jednaka jonizacionoj struji koja je posledica prikupljanja elektrona na anodi, a ampermetar postavljen u spoljašnjem kolu ĉe tu struju meriti.

Grafik struja-napon, prikazan na slici 4.1 (desno), pruēa bitne informacije o performansama jonizacione komore. Kao Źto se moēe videti, kada nema primenjenog napona izmeēu elektroda, nema ni elektriĉnog polja u gasu, a samim tim ni jonske struje. Stvoreni jonski parovi ĉe nestati ili rekombinacijom ili ĉe difuzijom napustiti aktivnu zapreminu detektora. Kako napon raste, raste i broj jona i elektrona koji se ne rekombinuju veĉ uspeju da stignu do anode, a samim tim raste i struja. U jednom momentu, pri naponu V_s , dolazi do zasiĉenja struje i to je znak da se zanemarljivo mali broj jonskih parova gubi rekombinacijom tj. svi jonski parovi stvoreni procesom jonizacije doprinose struji. Daljim poveĉanjem napona, struja ostaje konstantna jer su sva naelektrisanja veĉ sakupljena i brzina njihovog formiranja je konstantna. [Knoll, 1999] Napon u kojem je struja u spoljašnjem kolu konstantna predstavlja radni napon jonizacione komore. On treba biti dovoljno visok da se obezbedi zasiĉenje jonske struje, a da se pritom ne uēe u oblast rada proporcionalnog brojaĉa.

Komore koje rade u strujnom reēimu se ĉesto koriste, a jedna od najĉeēĉih primena je u dozimetriji i monitoringu zraĉenja. Pored ovog postoji i impulsni reēim, koji je viēe karakteristiĉan za preostale dve vrste gasnih detektora, Geiger-Müller i proporcionalni brojaĉi. Ovaj reēim rada jonizacione komore se od prethodnog razlikuje po tome Źto svaka jonizacija stvara zaseban elektriĉni signal, pa stoga imaju i bolju osetljivost i mogu se koristiti za merenje energije zraĉenja. Danas su jonizacione komore koje rade u impulsnom reēimu uglavnom zamenjene poluprovodniĉkim diodnim detektorima.

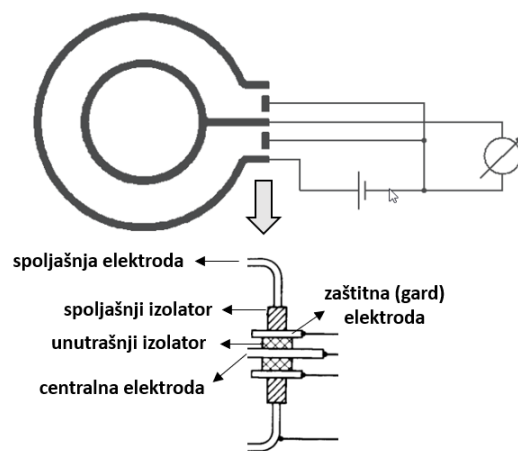
Za potrebe eksperimentalnog dela ovog rada koriēĉena su dva tipa jonizacionih komora:

- sferna i
- planpalalelna jonizaciona komora

4.1.2 Sferne jonizacione komore

Kao Źto se na slici 4.2 moēe videti komora se sastoji od dve kruēne elektrode, spoljaēnje, koja je ujedno i zid komore i centralne (kolektujuĉe) elektrode koja je povezana sa elektrometrom. Izmeēu njih se nalazi vazduh, ĉijom se jonizacijom stvaraju jonski parovi, koji se zatim prikupljaju na odgovarajuĉim elektrodama. Izmeēu elektroda se takoēe nalaze i dva izolatora

(unutrašnji i spoljašnji) kao i zaštitna ili gard (eng. 'guard' - čuvar, stražar) elektroda. Izolacioni materijal je tu kako bi se zid komore odvojio od kolektujuće elektrode radi sprečavanja strujanja struje kroz komoru i najčešće se izrađuje od sintetičke plastike visokog otpora ili keramike, dok je zaštitna elektroda tu kako bi se smanjio efekat curenja struje. Negativan napon se primenjuje na zid komore, a kolektujuća i zaštitna elektroda su uzemljene. Što se tiče dimenzija jonizacionih komora, one se izrađuju u različitim veličinama, od nekoliko milimetara do nekoliko decimetara u prečniku. [Knoll, 1999; Boström i Messler, 2019] Na slici 4.3 prikazana je sferna komora PTW tip 32002, radne zapremine od 1 litra (1000 cm^3), koja se koristi u dozimetrijskim merenjima u oblasti zaštite od zračenja. [PTW, 2022]



Slika 4.2 Šematski prikaz sferne jonizacione komore

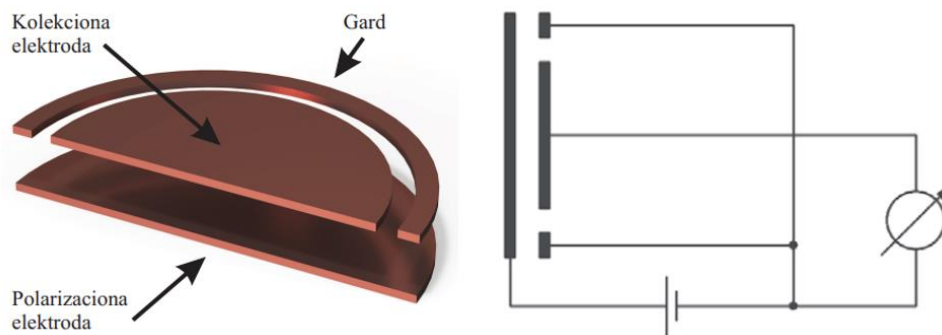


Slika 4.3 Sferna jonizaciona komora proizvođača PTW tip 32002

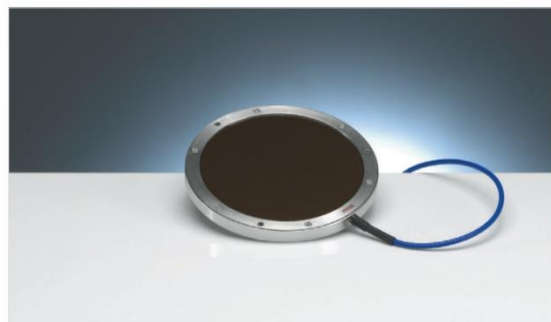
4.1.3 Planparalelne jonizacione komore

Planparalelna jonizaciona komora sastoji se od polarizacione elektrode, koja predstavlja prednji (ulazni) zid komore i kolektujuće elektrode tj. zadnjeg zida komore (slika 4.4). Na prednji zid se dovodi napon, kako bi se uspostavilo električno polje, a zadnji zid je povezan sa elektrometrom. Zaštitna ili gard elektroda ima oblik prstena, postavlja se oko kolektujuće

elektrode i njena uloga je ista kao i kod prethodno opisane sferne jonizacione komore. Potencijal joj je izjednačen sa potencijalom kolektujuće elektrode, ali sama elektroda ne pripada mernom kolu. [Vičić, 2014] Radna zapremina sa vazduhom nalazi se u prostoru između prednjeg i zadnjeg zida, a rastojanje između zidova je uglavnom manje od 1 mm. Ovaj tip komore karakteriše veoma dobra prostorna rezolucija, pogotovu ako se postavi normalno na pravac upadnog snopa zračenja. Na slici 4.5 može se videti ovaj tip jonizacione komore proizvođača PTW.



Slika 4.4 Šematski prikaz planparalelne jonizacione komore



Slika 4.5 Planparalelna jonizaciona komora proizvođača PTW tip 7862

5. METROLOGIJA

Metrologija je nauka koja se bavi merenjem i obuhvata sve teorijske i eksperimentalne aspekte merenja, a naročito istraživanje merne nesigurnosti dobijenih rezultata. [Terzić i Forkapić, 2018] Metrologija je bitna iz nekoliko ključnih razloga: omogućava precizna i tačna merenja u raznim naučnim i tehničkim oblastima, podržava standardizaciju, olakšava međunarodnu saradnju i razmenu znanja, poboljšava kvalitet proizvoda i usluga kroz kontrolu procesa proizvodnje i štiti potrošače kontrolom kvaliteta i tačnosti merenja u oblastima poput medicine, ishrane i zaštite životne sredine. Metrologija se može podeliti u tri glavne kategorije:

1. **Naučna metrologija** – bavi se naučnim istraživanjima koja su neophodna za unapređenja Međunarodnog sistema jedinica, kao i za definisanje i uspostavljanje nacionalnih i međunarodnih standarda. Takođe se bavi i rešavanjem problema mernih nesigurnosti i pružanjem ekspertskih usluga svim korisnicima metrološkog sistema. [Terzić i Forkapić, 2018]
2. **Industrijska metrologija** – fokusira se na istraživanje i unapređenje metoda merenja i instrumenata koji se koriste u industrijskim procesima, uključujući proizvodnju i testiranje gotovih proizvoda. Ovaj aspekt metrologije osigurava da industrijski proizvodi budu izrađeni u skladu sa međunarodnim, regionalnim ili nacionalnim standardima, čime se garantuje kvalitet proizvoda. [Terzić i Forkapić, 2018]
3. **Zakonska metrologija** – fokusira se na usaglašavanje zakona, propisa i kontrolnih postupaka vezanih za merenja, sa ciljem zaštite potrošača, zdravlja, bezbednosti i okoline, kao i poštovanja međunarodnih sporazuma i trgovinskih ugovora. Međunarodna organizacija za zakonsku metrologiju (fr. *Organisation Internationale de Métrologie Légale*, **OIML**) je vodeća organizacija čiji je zadatak usklađivanje zakonskih metroloških standarda širom sveta. [Terzić i Forkapić, 2018]

5.1 Metarska konvencija

Metrologija se kao nauka zvanično javlja u vreme industrijske revolucije, tačnije krajem 18. i početkom 19. veka, međutim, dobro razvijeni metrički sistemi zabeleženi su još u drevnim civilizacijama kao što su egipatska, grčka, kineska, rimska i indijska. U srednjem veku je situacija sa metričkim sistemima bila jako loša, toliko da su se različiti sistemi koristili u različitim regionima jedne iste države. Pojavom industrijske revolucije bilo je jasno da se problem usaglašenosti metričkih sistema treba rešiti, pre svega na nacionalnom, a zatim i

međunarodnom nivou. Tako je u Francuskoj 1790. godine uveden univerzalan, decimalni metrički sistem, ali je tek 20. maja 1875. godine potpisivanjem Metarske konvencije usvojen kao jedini zvaničan međunarodni sistem mera. Ovaj datum proglašen je za Svetski dan metrologije. Metarska konvencija predstavlja najviši međunarodni akt u metrologiji i ovaj ugovor su do danas potpisale 64 države članice i 36 država i ekonomija koje su pridružene članice. [BIPM, 2023] Prvim ugovorom, iz 1875. godine, definisane su jedinice za dužinu (metar) i masu (kilogram) i uvedena su tri glavna koordinaciona tela u okviru globalnog metrološkog sistema: Generalna konferencija za tegove i mere (CGPM), Međunarodni biro za mere i tegove (BIPM) i Međunarodni komitet za tegove i mere (CIPM).

5.1.1 Generalna konferencija za tegove i mere

Generalna konferencija za tegove i mere (fr. *Conférence Générale des Poids et Mesures*, **CGPM**) predstavlja vrhovni organ konvencije o metru i čine je predstavnici vlada država članica Metarske konvencije. Održava se svake četiri godine i na njoj se donose odluke o izmenama i dopunama SI sistema jedinica, kao i odluke o usvajanju novih standarda u oblasti metrologije. Dokumenti Generalne konferencije za tegove i mere nazivaju se rezolucijama.

5.1.2 Međunarodni biro za mere i tegove

Međunarodni biro za mere i tegove (fr. *Bureau International des Poids et Mesures*, **BIPM**) ima zadatak da obezbedi jedinstvo mera na svetskom nivou, uspostavlja i čuva etalone, poredi nacionalne i međunarodne etalone, osigura usklađenost metoda merenja i etaloniranja i rukovodi istraživanjima u vezi sa fizičkim konstantama koje imaju udela u praktičnoj realizaciji etalona.

5.1.3 Međunarodni komitet za tegove i mere

Međunarodni komitet za tegove i mere (fr. *Comité International des Poids et Mesures*, **CIPM**) ima zadatak da nadzire aktivnosti BIPM, u ime CGPM, ali i saraduje sa drugim međunarodnim metrološkim organizacijama kao što su ISO, IEC i druge. Komitet se sastoji od 18 članova koji su izabrani od strane CGPM, održava se svake godine i za sada sadrži deset konsultativnih (savetodavnih) komiteta (engl. *Consultative Committees*, **CC**), a svaki komitet je zadužen za jednu oblast određene fizičke veličine i u okviru svoje oblasti daje preporuke. Na primer, Konsultativni komitet za jonizujuća zračenja (eng. *Consultative Committee for Ionizing Radiation*, **CCRI**) osnovan je 1958. godine sa ciljem uspostavljanja sistema sledljivosti primarnih standarda do Međunarodnog sistema jedinica (SI) za standarde zračenja. [Allisy i drugi, 2009]

Pored gore navedenih koordinacionih tela, za globalni metrološki sistem su jako važni i Nacionalni metrološki instituti i Regionalne metrološke organizacije.

5.1.4 Regionalne metrološke organizacije

Regionalne metrološke organizacije (eng. *Regional Metrology Organization*, **RMO**) okupljaju nacionalne metrološke institute (NMI) u određenoj geografskoj regiji i promovišu saradnju među njima radi poboljšanja tačnosti i pouzdanosti merenja. Trenutno postoji 6 regionalnih organizacija za metrologiju koje su priznate od strane Međunarodnog biroa za težine i mere (BIPM):

- AFRIMETS – Afrička infrastruktura za metrologiju
- EURAMET – Evropska regionalna metrološka organizacija
- COOMET – Evro-azijska saradnja nacionalnih metroloških instituta
- SIM – Međuamerički metrološki sistem
- APMP – Azijsko-pacifički metrološki program
- GULFMET – Regionalna metrološka organizacija zemalja Persijskog zaliva

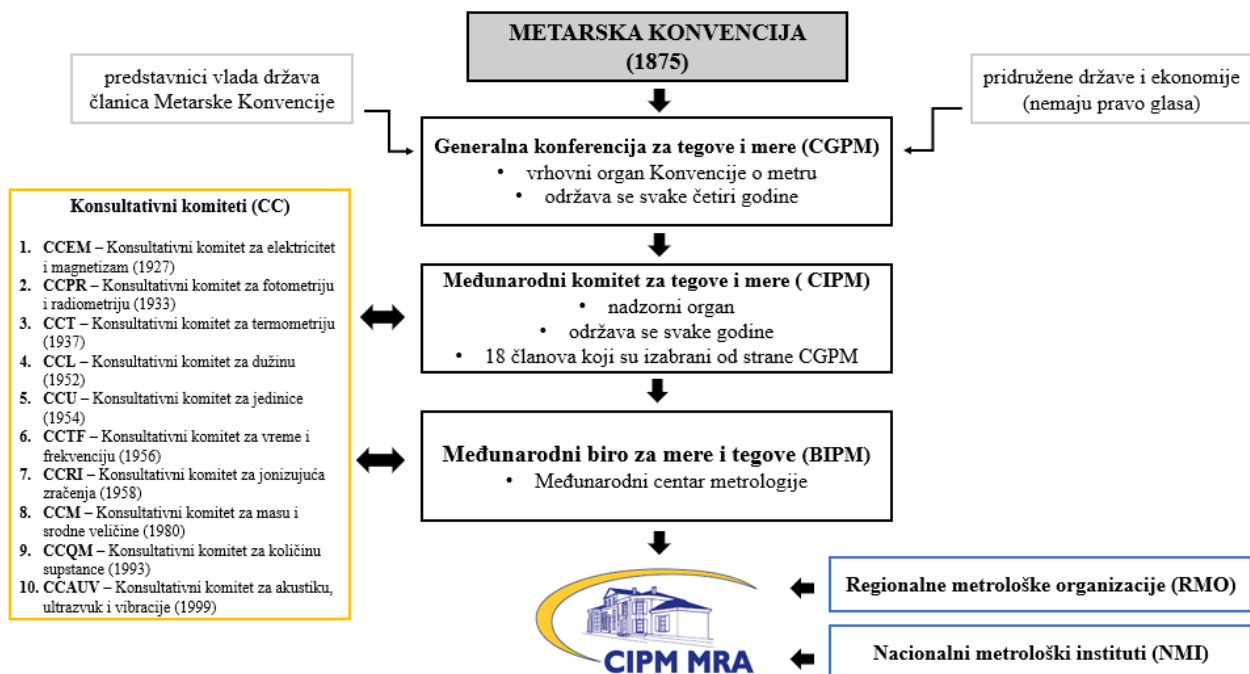
5.1.5 Nacionalni metrološki instituti

Nacionalni metrološki instituti (eng. *National Metrology Institute*, **NMI**) su organizacije koje imaju zadatak da razvijaju i održavaju etalone jedne ili više veličina na nacionalnom nivou. NMI predstavlja državu na međunarodnom nivou u odnosima sa NMI drugih država, zatim u odnosima sa RMO i sa BIPM. [Terzić i Forkapić, 2018] Mnogi NMI imaju kapacitete za razvoj i održavanje primarnih etalona osnovnih i izvedenih jedinica na najvišem međunarodnom nivou. Međutim, neki nacionalni instituti nemaju kapacitete za razvoj i održavanje primarnih etalona svih jedinica, već koriste sekundarne etalone koji su sledljivi do drugih nacionalnih metroloških instituta. Sekundarni etaloni su takođe visoko precizni i tačni etaloni, ali se kalibrišu i verifikuju na osnovu primarnih etalona drugih NMI. U Republici Srbiji postoji samo jedan nacionalni metrološki institut, a to je **Direkcija za mere i dragocene metale (DMDM)**. Nacionalni metrološki instituti imaju ovlašćenje da određene institute u državi imenuju za čuvanje i održavanje nacionalnih etalona. U Srbiji, prvi takav institut koji je imenovan je Institut za nuklearne nauke „Vinča“. Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine Instituta za nuklearne nauke "Vinča" je nosilac nacionalnih etalona u oblasti jonizujućeg zračenja u Srbiji.

5.1.6 Sporazum o međunarodnom priznavanju

Sporazum o međunarodnom priznavanju CIPM MRA (eng. *Mutual Recognition Arrangement*) je jako bitan dogovor koji je potpisan 1999. godine i odnosi se na međusobno priznanje nacionalnih mernih standarda i sertifikata o etaloniranju izdatih od strane Nacionalnih metroloških instituta (NMI). Ukratko, CIPM MRA je sporazum koji olakšava međunarodnu saradnju u smislu priznavanja rezultata merenja, trgovine, zaštite potrošača i doprinosi očuvanju međunarodnih standarda u metrologiji.

Na slici 5.1 nalazi se šematski prikaz strukture globalnog metrološkog sistema koji bi trebalo da olakša razumevanje načina povezanosti organa i funkcija koje oni obavljaju.

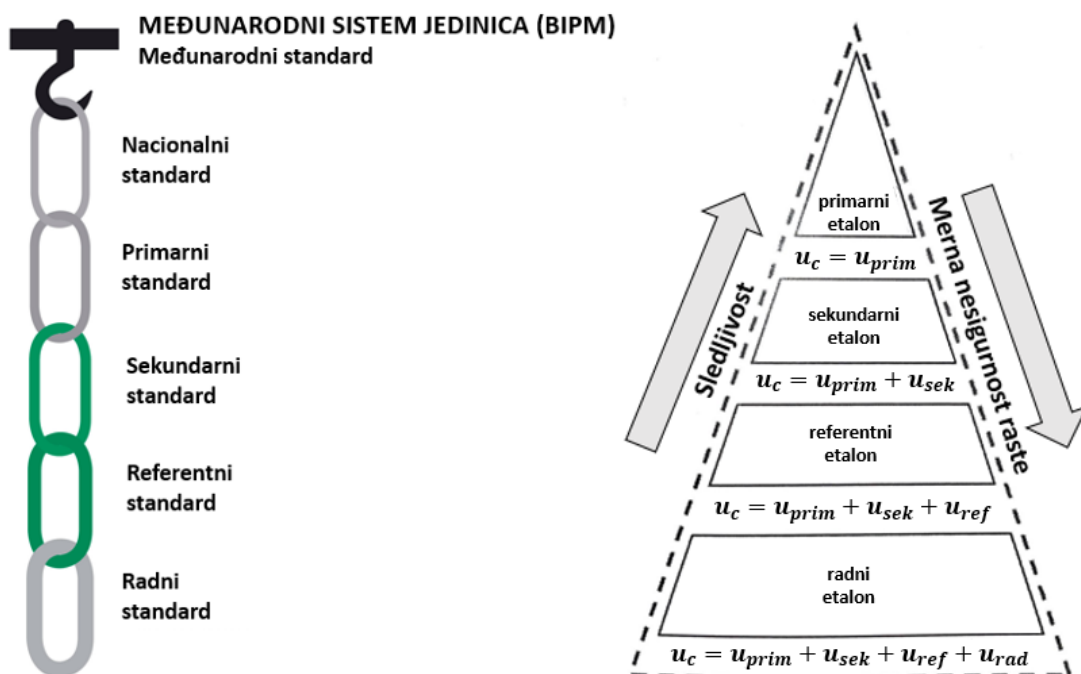


Slika 5.1 Šematski prikaz strukture globalnog metrološkog sistema

5.2 Metrološka sledljivost

Metrološka sledljivost predstavlja proces poređenja rezultata merenja mernog instrumenta (odgovor instrumenta sa pridruženom mernom nesigurnošću) sa vrednošću standarda veće tačnosti, sve dok se ne dođe do primarnog etalona koji je baziran na Međunarodnom sistemu jedinica. Sledljivost se obično ostvaruje kroz postupak etaloniranja. Koncept metrološke sledljivosti je jako važan jer je na taj način osigurano da se merenja vrše na isti način širom sveta tj. omogućena je konzistentnost i pouzdanost merenja na globalnom nivou.

Sledljivost do Međunarodnog sistema jedinica ostvaruje se kroz niz etaloniranja i najčešće se ilustruje kroz lanac (levo) ili piramidu (desno) metrološke sledljivosti, a obe ilustracije su prikazane na slici 5.2. Piramida sledljivosti prikazuje hijerarhiju svake referentne standardne vrednosti, pri čemu svako upoređivanje ima navedenu mernu nesigurnost. Što je referentna standardna vrednost viša na piramidi, to je merenje preciznije i manja je nesigurnost merenja. U prevodu, ako se etaloniranje radi pomoću sekundarnog referentnog standarda, očekuje se da merna nesigurnost bude veća nego kada se radi etaloniranje pomoću primarnog referentnog standarda. Merna nesigurnost mora biti izračunata ili procenjena i navedena za svaki korak u lancu sledljivosti kako bi se mogla izračunati ili proceniti ukupna merna nesigurnost za ceo lanac.



Slika 5.2 Šematski prikaz lanca sledljivosti (levo) i piramide sledljivosti (desno) do Međunarodnog standarda

5.2.1 IAEA/WHO SSDL mreža

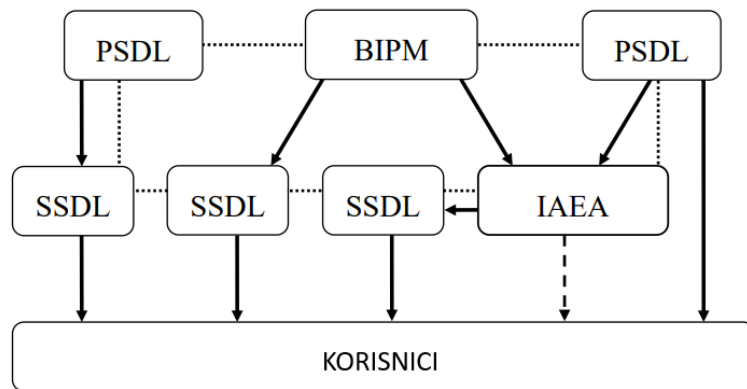
U svakoj zemlji koja koristi jonizujuće zračenje neophodna su i precizna merenja doza zračenja. Kalibracija svih dozimetara koji se koriste za merenje doza zračenja kod pacijenata, kao i onih koji se upotrebljavaju za kalibraciju izvora zračenja, mora biti sledljiva do odgovarajuće laboratorije za standardnu dozimetriju, kako bi se osigurala tačnost i pouzdanost merenja.

U metrologiji jonizujućeg zračenja, primarni standardi za merenje zračenja razvijeni su u Dozimetrijskim laboratorijama primarnog etalona (eng. *Primary Standard Dosimetry*

Laboratory, PSDL). Ovi standardi se periodično upoređuju direktno sa standardima BIPM-a, koji služe kao međunarodni referentni standard dozimetrijskih veličina. Kako primarnih dozimetrijskih laboratorija ima svega dvadesetak u svetu, one nisu u mogućnosti da kalibrišu sve instrumente koji se koriste globalno, pa je stoga formirana svetska mreža sekundarnih standarda. Ova mreža osnovana je 1976. godine na predlog Međunarodne agencije za atomsku energiju (eng. *International Atomic Energy Agency, IAEA*) i Svetske zdravstvene organizacije (eng. *World Health Organization, WHO*) i poznata je pod nazivom IAEA/WHO SSDL mreža.

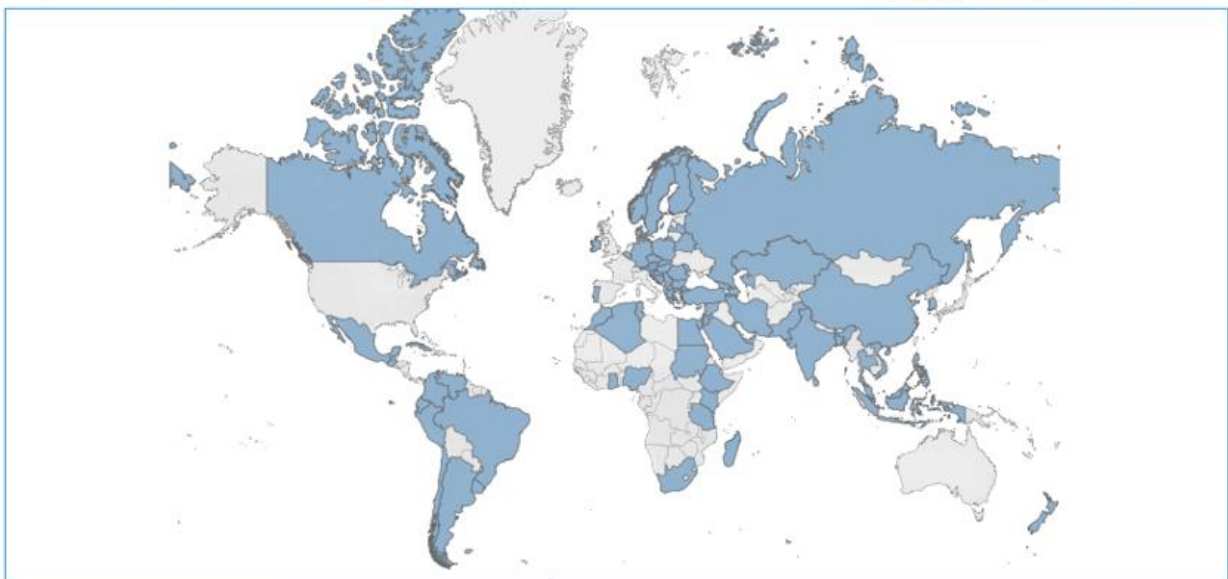
Zadatak Sekundarnih dozimetrijskih laboratorija (eng. *Secondary Standard Dosimetry Laboratory, SSDL*) je da održavaju primarne standarde i prenose ih na krajnjeg korisnika. Laboratorija za dozimetriju IAEA i sama funkcioniše kao SSDL laboratorija i ona ima važnu ulogu u razvoju novih SSDL laboratorija kao i obuci osoblja u ovim laboratorijama. [Allisy i drugi, 2009] IAEA poseduje sekundarne standarde za različite kvalitete snopa zračenja koji su kalibrisani prema primarnim standardima u BIPM-u ili drugim primarnim dozimetrijskim laboratorijama. IAEA dalje doprinosi širenju dozimetrijskih standarda, u oblastima radioterapije, dijagnostičke radiologije i zaštite od zračenja, kroz svoju mrežu SSDL laboratorija, a one zatim dalje prenose metrološku sledljivost do korisnika dozimetara. Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine Instituta za nuklearne nauke "Vinča" pripada IAEA mreži SSDL laboratorija.

Lanac kalibracije, koji je neophodan za održavanje sledljivosti svih merenja zračenja, prikazan je na slici 5.3. Strelice predstavljaju kalibracije koje osiguravaju lanac sledljivosti do međunarodnih mernih standarda, a isprekidane linije označavaju poređenja primarnih i sekundarnih standarda. Isprekidana strelica predstavlja kalibraciju korisničkog instrumenta od strane IAEA, u slučaju da zemlja nema SSDL i ima vrlo ograničene resurse. [IAEA, 2018] Prvu kariku u lancu čine zajedno BIPM i PSDL. SSDL-ovi sledljivost do Međunarodnog sistema jedinica mogu da ostvare preko primarnih standarda PSDL-a ili direktno preko BIPM-a. Mnogi članovi IAEA/WHO SSDL mreže sledljivi su do primarnih standarda upravo preko IAEA.



Slika 5.3 Šematski prikaz lanca kalibracije preko koga se ostvaruje sledljivost u metrologiji jonizujućeg zračenja

Na slici 5.4 prikazana je mapa država članica IAEA/WHO SSDL mreže, a dodatne informacije o ovoj mreži dostupne su u Povelji SSDL mreže [IAEA, 2018], kao i na njihovoj zvaničnoj stranici [IAEA, <https://ssdl.iaea.org/>].



Slika 5.4 Mapa država članica IAEA/WHO SSDL mreže

6. STANDARDIZACIJA

Standardizacija igra ključnu ulogu u svim oblastima ljudskog delovanja i neophodna je kako bi se uspostavila usaglašenost, efikasnost i kvalitet usluga i proizvoda u tim oblastima. Proces standardizacije podrazumeva razvoj, izdavanje i primenu standarda. Standard je finalni rezultat u procesu standardizacije i u zavisnosti od nivoa organizacije koja ga donosi postoji sledeća podela:

1. **Međunarodni standard** – objavljuju ga međunarodne organizacije za standardizaciju, od kojih su sledeće tri vodeće: Međunarodna organizacija za standardizaciju **ISO** (eng. *International Organization for Standardization*), Međunarodna elektrotehnička komisija **IEC** (eng. *International Electrotechnical Commission*) i Međunarodna unija za telekomunikacije **ITU** (eng. *International Telecommunication Union*). Republika Srbija kao članica međunarodnih organizacija za standardizaciju koristi standarde koje izdaju ISO i IEC.
2. **Evropski standard** – Za Republiku Srbiju od značaja su standardi sledećih evropskih organizacija za standardizaciju: Evropski komitet za standardizaciju **CEN** (eng. *European Committee for Standardization*), Evropski komitet za elektrotehničku standardizaciju **CENELEC** (eng. *European Committee for Electrotechnical Standardization*) i Evropski institut za telekomunikacione standarde **ETSI** (eng. *European Telecommunications Standards Institute*). [ISS, https://iss.rs/sr_Cyrl/shta-je-standard_p13.html]
3. **Nacionalni standard** – standard koji donosi Institut za standardizaciju Srbije **ISS**, kao jedino nacionalno telo za standarde u Republici Srbiji. Srpski standardi se označavaju oznakom koja počinje skraćenicom SRPS. [ISS, https://iss.rs/sr_Cyrl/shta-je-standard_p13.html]

6.1 Standard ISO 4037-1

Usled široke primene jonizujućeg zračenja u različitim oblastima, poput medicine, industrije, za potrebe istraživanja, zaštite životne sredine i ostalih, zaštita od zračenja je izuzetno važna i neophodna. Merenje doze zračenja je jedna od ključnih mera koja se primenjuje u oblasti zaštite od zračenja, a da bi ova merenja bila precizna, tačna i u skladu sa Međunarodnim smernicama i standardima, neophodno je prethodno izvršiti kalibraciju dozimetara. Međunarodni standard ISO 4037 (1–4) se upravo bavi kalibracijom dozimetara za zaštitu od zračenja korišćenjem X

i γ referentnih polja zračenja. Za ovaj rad od značaja je prvi deo standarda, ISO 4037-1, u kojem su opisana referentna polja zračenja i predstavljene njihove karakteristike i načini proizvodnje. Da bi pružili usluge kalibracije krajnjim korisnicima, svaki SSDL treba da razvije iste referentne snopove kvaliteta koji se koriste za kalibraciju njihovih referentnih instrumenata, prateći međunarodne preporučene standarde. [Herrati i drugi, 2016]

Prema standardu ISO 4037-1 postoje tri grupe referentnog zračenja [ISO 4037-1, 2019]:

1. Kontinuirano filtrirano X-zračenje u opsegu energija od oko 8 keV do 330 keV
2. Gama zračenje emitovano od strane radionuklida, sa energetske opsegom od 600 keV do 1,3 MeV
3. Fotonsko zračenje proizvedeno akceleratorima, energija od 4 MeV do 9 MeV

6.1.1 Kontinuirano referentno X-zračenje

Odeljak 4. standarda ISO 4037-1 detaljno opisuje karakteristike referentnog X-zračenja i metode i zahteve pomoću kojih laboratorije mogu proizvesti referentno polje za izabrani kvalitet zračenja. Kvalitet filtriranog X-zračenja karakteriše se sledećim parametrima:

- a) srednja energija snopa E (Φ), izražena u kiloelektronvoltima (keV)
- b) rezolucija R_E
- c) debljina poluslabljenja snopa HVL, izražena u milimetrima Al ili Cu
- d) koeficijent homogenosti h .

Postoje četiri serije kontinuiranog referentnog X-zračenja definisane standardom, a navedene su po redosledu povećanja filtracije, od najmanje do najveće:

1. **L – serija** (*Low air kerma rate series*) – serija niske brzine kerme u vazduhu
2. **N – serija** (*Narrow spectrum series*) – uskospektralna serija
3. **W – serija** (*Wide spectrum series*) – širokospektralna serija
4. **H - serija** (*High air kerma rate*) – serija visoke brzine kerme u vazduhu

Za svaki kvalitet zračenja unutar jedne serije postoje određeni zahtevi i uslovi koji moraju biti ispunjeni prema standardu. Ovi zahtevi se odnose na potencijal cevi, debljinu i materijal ukupne filtracije (kako bi se dobila željena serija i kvalitet), materijal anode, ugao rendgenske cevi i distancu između izvora rendgenske cevi i mesta ispitivanja (tačke gde se merenje vrši). N serija se ne odnosi na jačinu kerme već na energetski spektar koji napusti rendgensku cev. Kako bi se realizovali ovako uski spektri, svi snopovi iz N serije su veoma dobro filtrirani, a materijali i

debljine filtracije mogu se naći u standardu. Za potrebe ovog eksperimenta realizovan je kvalitet N – 120 tj. kvalitet N serije sa potencijalom rendgenske cevi od 120 kV.

Nakon što se realizuje željeni kvalitet, neophodno je izvršiti njegovu validaciju i to je moguće uraditi pomoću tri metode:

1. Dozimetrijskom metodom
2. Merenjem HVL referentnog kvaliteta zračenja i
3. Spektrometrijskom metodom

Eksperimentalni deo ovog master rada bavi se procesom validacije kvaliteta N – 120 merenjem veličine HVL, a postupak je predstavljen u sledećem poglavlju.

7. EKSPERIMENTALNI DEO

Institut za nuklearne nauke „Vinča“ kao standardna dozimetrijska laboratorija mora da ima referentna polja zračenja koja su definisana standardom ISO 4037-1. Kao što je već napomenuto, cilj ovog master rada jeste validacija referentnog kvaliteta X-zračenja merenjem veličine HVL. Reč je o kvalitetu N – 120, čije su karakteristike prikazane u sledećoj tabeli:

Tabela 4 Karakteristike N – 120 referentnog kvaliteta rendgenskog zračenja

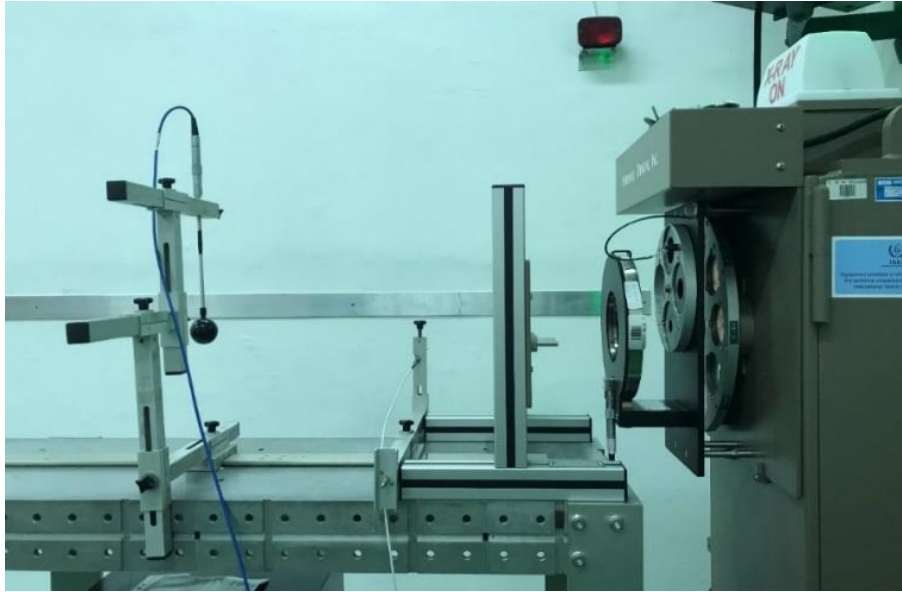
Kvalitet	Srednja energija	Rezolucija	Potencijal cevi	Inherentna filtracija	Debljina dodatne filtracije		1 st HVL
N - 120	100 keV	27 %	120 kV	4 mm Al	1 mm Sn	5 mm Cu	1.67 mm Cu

Za realizaciju je korišćen napon rendgenske cevi od 120 kV, struja od 15 mA, a srednja energija fotona iznosi 100 keV. Kao što se u tabeli može videti, očekivana (referentna) vrednost debljine poluslabljenja za dati kvalitet iznosi 1.67 mm Cu. Veoma je važno da vrednost koja bude dobijena ovim merenjem ne premašuje dozvoljeno odstupanje od referentne vrednosti koje je definisano standardom. Pored izmerenog HVL-a biće priložen i budžet merne nesigurnosti kako bi se imao uvid u mernu nesigurnost cele procedure.

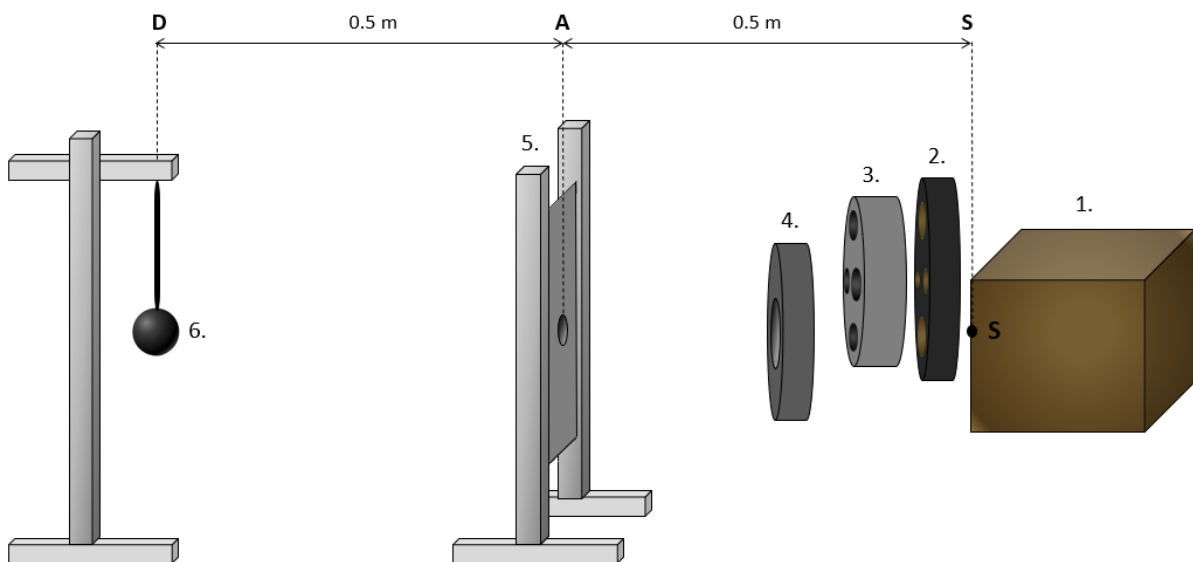
7.1 Opis eksperimentalnog postupka

Odeljak 4.5.4 standarda precizno definiše uslove koji moraju biti ispunjeni prilikom izvođenja procedure merenja veličine HVL. Eksperimentalna postavka prikazana je na slici 7.1, a radi lakšeg razumevanja prikazan je i njen 3d model sa svim navedenim komponentama i njihovim ulogama (slika 7.2).

Referentni kvalitet N – 120 realizovan je u laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“ pomoću generatora X-zračenja Hopewell Designs X80-225 kV-E. Nakon izlaska iz rendgenske cevi, snop prvo prolazi kroz točak sa filtrima koji sadrži određenu filtraciju potrebnu za formiranje referentnog snopa N – 120. Ukupna filtracija zahtevana standardom navedena je u tabeli 4 i sastoji se od 4 mm aluminijuma, 1 mm kalaja i 5 mm bakra. Na ovaj način su eliminisani svi niskoenergetski fotoni koji nisu od interesa za eksperiment.



Slika 7.1 Eksperimentalna postavka za proceduru merenja veličine HVL



Slika 7.2 3d model eksperimentalne postavke sa sledećim komponentama: 1. rendgenska cev, 2. točak sa filtrima, 3. kolimator 1, 4. monitorska jonizaciona komora, 5. kolimator 2 i 6. sferna jonizaciona komora

Snop zatim nailazi na prvi kolimator, koji u sebi sadrži četiri dimenzije otvora, a za eksperiment je korišćen najmanji otvor prečnika $d_S = 2.1$ cm.

Sledeća komponenta je monitorska (planparalelna) jonizaciona komora čija je uloga da meri izlaznu količinu naelektrisanja iz samog rendgena. Naelektrisanje izmereno ovom jonizacionom komorom prikazuje se na elektrometru PTW UNIDOS i koristiće se za korekciju onoga što izmeri sferna jonizaciona komora. Na ovaj način se osigurava tačnost merenja jer se uzimaju u obzir male varijacije u struji i naponu (output-u) rendgenskog uređaja koje se

dešavaju sve vreme tokom trajanja eksperimenta. Položaj monitorske komore je definisan standardom i kao što se sa slike može videti, komora se postavlja između dva seta kolimatora.

Nakon prolaska kroz monitorsku komoru, snop nailazi na drugi kolimator sa otvorom $d_C = 2.5$ cm, koji u tački merenja pravi veličinu polja prečnika $d_B = 5$ cm i na čiji otvor se postavljaju apsorberi od bakra. Položaj ovog kolimatora je takođe definisan standardom i on se postavlja na pola puta između izvora zračenja i tačke merenja tj. nalazi se na rastojanju $L_C = 0.5$ m od izvora zračenja. Za potrebe eksperimenta korišćena su dva seta bakarnih apsorbera, prikazanih na slici 7.3.



Slika 7.3 Set starih (levo) i novih apsorbera od bakra (desno)

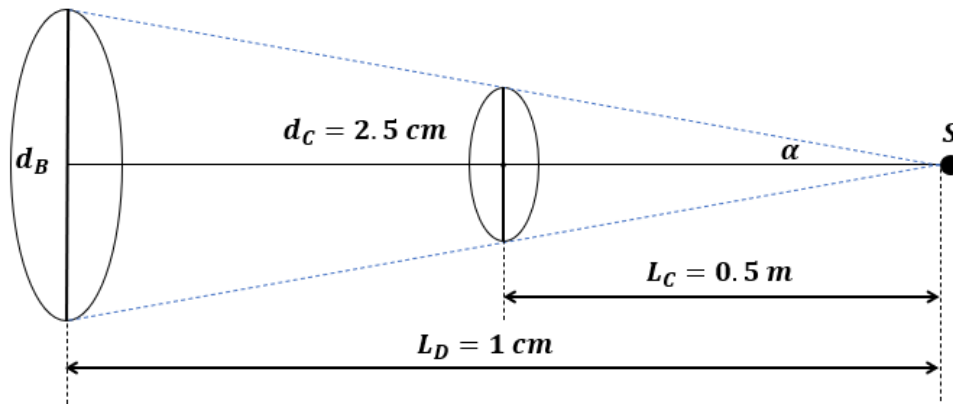
Poslednja komponenta je sferna jonizaciona komora tipa PTW 32005, zapremine $V_{ic} = 30\text{cm}^3$ i prečnika $d_D = 3.854$ cm. Kalibracioni koeficijent jonizacione komore iznosi $N_K = 1.085 \pm 0.020$ mGy/nC i njega unosimo kao podatak u elektrometar. Komora se pozicionira u žarišnu tačku pomoću lasera, na rastojanje $L_D = 1$ m od izvora zračenja i povezana je na elektrometar PTW UNIDOS weblina na kojem se onda očitava jačina kerme u vazduhu. Veličina polja u tački merenja iznosi 5 cm, a prečnik jonizacione komore 3.854 cm, što znači da je detektor potpuno i uniformno ozračen, čime je ispunjen jos jedan uslov iz standarda.

Rastojanje između metalnih apsorbera i detektora treba da bude najmanje deset puta veće od prečnika snopa zraka na poziciji detektora, što je takođe ispunjeno.

Slika 7.4 daje trigonometrijski prikaz za izračunavanje prečnika snopa na poziciji detektora, a proračun se izvodi pomoću sledećih izraza:

$$d_B = \tan(\alpha) \cdot L_D \cdot 2 \quad (19)$$

$$\tan \alpha = \frac{d_C}{L_C} \quad (20)$$



Slika 7.4 Grafički prikaz trigonometrijskog izračunavanja prečnika snopa na poziciji detektora

Takođe je potrebno izvršiti korekcije na gustinu vazduha u jonizacionoj komori, jer ona utiče na to kako se nalektrisanje raspoređuje unutar komore. Gustina vazduha varira sa promenama temperature i pritiska, pa će se njihove vrednosti beležiti sve vreme tokom trajanja eksperimenta. Referentne vrednosti za pritisak i temperaturu iznose 101.325 kPa i 20 °C, respektivno. Korekcije se izvode pomoću korekcionog faktora k_{TP} , koji je dat sledećom relacijom:

$$k_{TP} = \frac{101.325}{P} \cdot \frac{(273.15 + T)}{293.15} \quad (21)$$

Gde je P ambijentalni pritisak koji se beleži i izražen je u kPa, a T ambijentalna temperatura u °C.

7.2 Obrada rezultata merenja

7.2.1 Obrada rezultata merenja za set starih apsorbera od bakra

Za početak se meri „nulta“ vrednost tj. jačina kerme u vazduhu bez filtracije, a zatim se postavljaju atenuatori od bakra. Set se sastoji od četiri filtra različitih debljina, a njihovom kombinacijom dobijeno je šest debljina apsorbera prikazanih u tabeli 5. Kako su apsorberi stariji, merenjem debljine na pet različitih mesta i uzimanjem srednje vrednosti, smanjuje se mogućnost greške u merenju debljine filtera. Za svaku debljinu filtra izvršeno je pet merenja

jačine kerme u vazduhu i tri merenja naelektrisanja monitorkom komorom, nakon čega su izračunate i njihove srednje vrednosti.

Slabljenje snopa određeno je poređenjem korigovanih vrednosti dobijenih sfernom jonizacionom komorom, za svaku debljinu bakarnog apsorbera, sa vrednostima izmerenim bez dodatne filtracije. Ove vrednosti su prikazane ekponencijalno opadajućom krivom na grafiku 1.

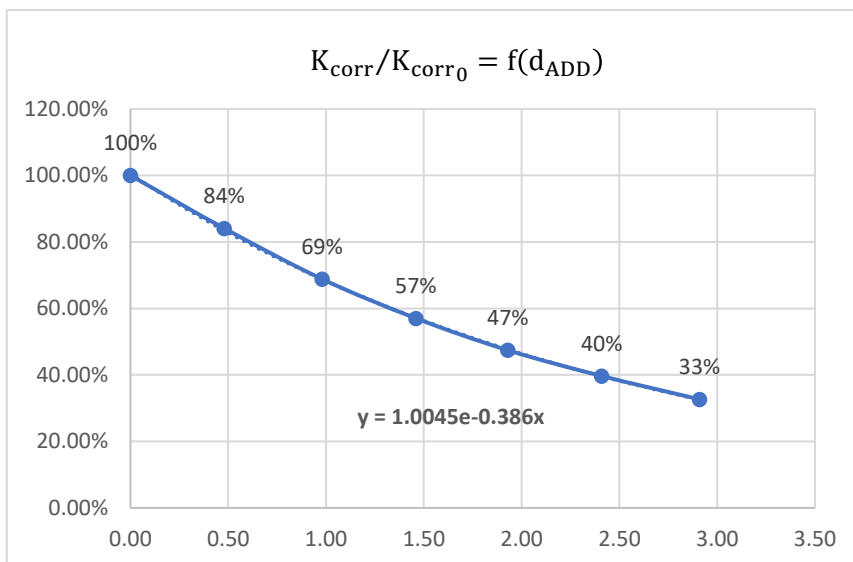
Kako bi se olakšala analiza podataka, eksponencijalna kriva slabljenja se transformiše u linearnu formu primenom negativnog logaritma, što je predstavljeno izrazom:

$$A = -\ln \frac{K_{corr}}{K_{corr_0}} \quad (22)$$

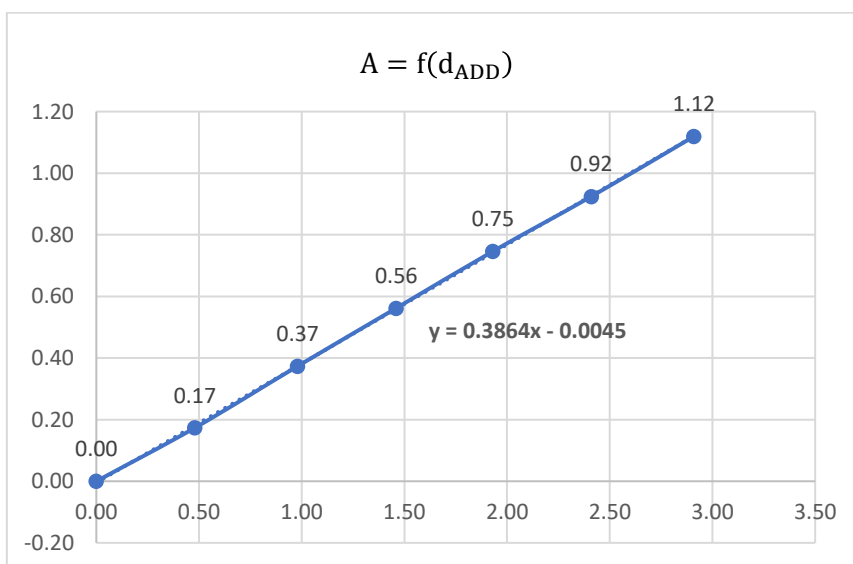
Linearno rastuća kriva je prikazana grafikom 2, a fitovanjem ove krive i korišćenjem jednačine prave linije u Microsoft Office Excel-u, za HVL se dobija vrednost prikazana u tabeli 6.

Tabela 5 Rezultati merenja za eksperimentalnu postavku sa setom starih apsorbera od bakra

d_{ADD} (mm Cu)	0.00	0.48	0.98	1.46	1.93	2.41	2.91
$\langle K_{AIR} \rangle$ (μ Gy/min)	447.0	372.3	302.9	250.9	209.8	175.0	144.2
$\langle Q_M \rangle$ (pC/min)	878.7	877.9	872.3	872.2	876.1	875.1	876.4
$\langle K_{AIR} \rangle / \langle Q_M \rangle$	0.51	0.42	0.35	0.29	0.24	0.20	0.16
T($^{\circ}$ C)	21.9	24.1	24.2	24.2	24.1	24.5	24.5
P(kPa)	100.75	100.65	100.70	100.70	100.75	100.70	100.70
k_T	1.006	1.014	1.014	1.014	1.014	1.015	1.015
k_P	1.006	1.007	1.006	1.006	1.006	1.006	1.006
k_{TP}	1.012	1.021	1.021	1.021	1.020	1.022	1.022
K_{corr}	0.51	0.43	0.35	0.29	0.24	0.20	0.17
K_{corr} / K_{corr_0}	100%	84%	69%	57%	47%	40%	33%
A	0.00	0.17	0.37	0.56	0.75	0.92	1.12



Grafik 1 Grafički prikaz slabljenja snopa nakon prolaska kroz različite debljine starih apsorbere od bakra



Grafik 2 Grafički prikaz linearne transformacije eksponencijalne krive slabljenja snopa za set starih apsorbere od bakra

Veličina HVL definiše se kao ona debljina apsorbere koja, u ovom kontekstu, smanjuje jačinu kerme u vazduhu na polovinu njene prvobitne vrednosti. Na osnovu ovog podatka i jednačine prave dobijene fitovanjem podataka iz tabele 5, lako se nalazi debljina poluslabljenja snopa za referentni kvalitet N-120 i prikazana je u tabeli 6. U tabeli je takođe navedena i relativna greška merenja ove veličine.

Tabela 6 Izmerena vrednost debljine poluslabljenja, referentna vrednost debljine poluslabljenja i relativna greška merenja za set starih apsorbera

HVL	1.78
HVL ISO 4037	1.67
δ HVL	6.71%

Prema standardu maksimalna apsolutna devijacija izmerene debljine poluslabljenja u odnosu na referentnu vrednost (Δ HVL_{ref}) tj. najveća vrednost razlike između izmerene i referentne debljine poluslabljenja ne sme biti veća od 200 μ m. Maksimalna apsolutna devijacija dobijena u ovom eksperimentu prikazana je u tabeli 7, čime se zaključuje da je navedeni kriterijum ispunjen, odnosno, eksperiment je uspešno obavljen.

Tabela 7 Maksimalna apsolutna devijacija izmerene debljine poluslabljenja u odnosu na referentnu vrednost prema standardu i maksimalna apsolutna devijacija dobijena eksperimentom za set starih apsorbera od bakra

Δ HVL ref (μ m)	N-120	200
Δ HVL m (μ m)	N-120	112

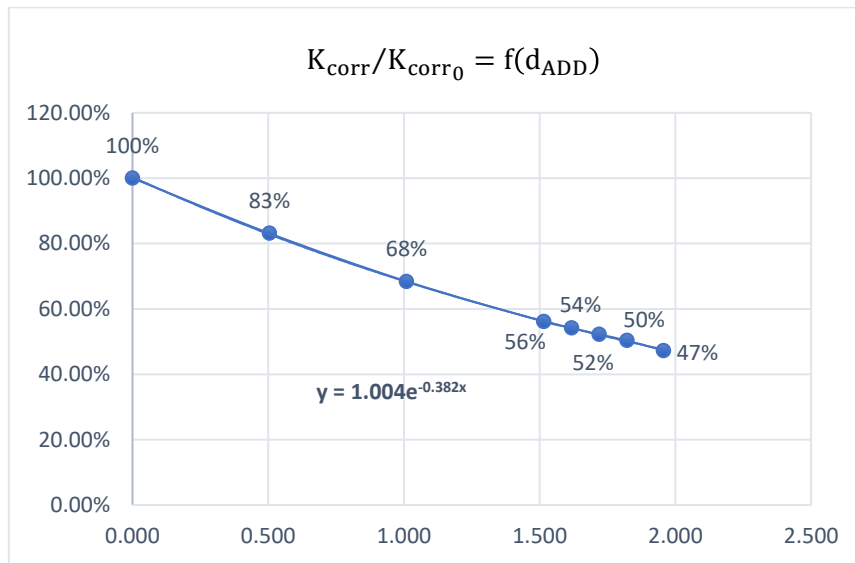
7.2.2 Obrada rezultata merenja za set novih apsorbera od bakra

Kao i u prethodnom slučaju, prvo se meri jačina kerme u vazduhu bez dodatne filtracije, a zatim se ista postavlja. Set se sastoji od novijih apsorbera, čije su debljine unapred poznate i prikazane su u tabeli 8. Za svaku debljinu filtera je takođe izvršeno pet merenja jačine kerme u vazduhu i tri merenja naelektrisanja monitorskom komorom, nakon čega su izračunate i njihove srednje vrednosti. Rezultati merenja prikazani su u tabeli 8.

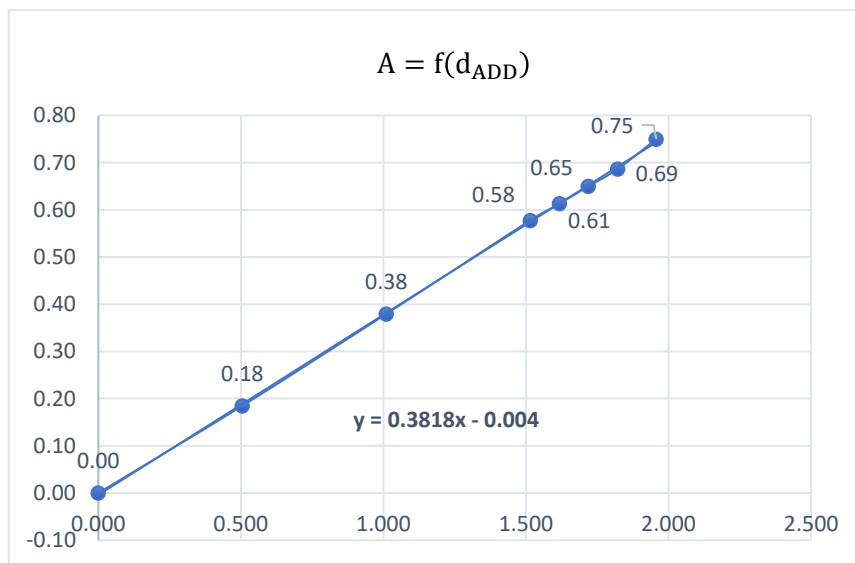
Tabela 8 Rezultati merenja za eksperimentalnu postavku sa setom novih apsorbera od bakra

d_{ADD} (mm Cu)	0.000	0.505	1.010	1.515	1.618	1.719	1.822	1.957
$\langle K_{AIR} \rangle$ (μ Gy/min)	447.0	366.8	301.6	247.3	238.9	230.0	223.0	207.9
$\langle Q_M \rangle$ (pC/min)	878.7	874.7	873.6	873.5	873.7	873.9	879.1	872.8
$\langle K_{AIR} \rangle / \langle Q_M \rangle$	0.51	0.42	0.35	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24
T($^{\circ}$ C)	21.9	24.1	24.2	24.2	24.1	24.5	24.5	24.5
P(kPa)	100.75	100.65	100.70	100.70	100.75	100.70	100.70	100.75
k_T	1.006	1.014	1.014	1.014	1.014	1.015	1.015	1.015
k_P	1.006	1.007	1.006	1.006	1.006	1.006	1.006	1.006
k_{TP}	1.012	1.021	1.021	1.021	1.020	1.022	1.022	1.021
K_{corr}	0.51	0.43	0.35	0.29	0.28	0.27	0.26	0.24
K_{corr} / K_{corr_0}	100%	83%	68%	56%	54%	52%	50%	47%
A	0.00	0.18	0.38	0.58	0.61	0.65	0.69	0.75

Dalja obrada rezultata iz tabele 8. vrši se na isti način kao i za set starih apsorbera od bakra.



Grafik 3 Grafčki prikaz slabljenja snopa nakon prolaska kroz različite debljine novih apsorbera od bakra



Grafik 4 Grafčki prikaz linearne transformacije eksponencijalne krive slabljenja snopa za set novih apsorbera od bakra

Tabela 9 Izmerena vrednost debljine poluslabljenja, referentna vrednost debljine poluslabljenja i relativna greška merenja za set novih apsorbera

HVL	1.80
HVL ISO 4037	1.67
δ HVL	8.08%

Tabela 10 Maksimalna apsolutna devijacija izmerene debljine poluslabljenja u odnosu na referentnu vrednost prema standardu i maksimalna apsolutna devijacija dobijena eksperimentom za set novih apsorbera od bakra

$\Delta\text{HVL ref } (\mu\text{m})$	N-120	200
$\Delta\text{HVL m } (\mu\text{m})$	N-120	135

8. BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI

Prilikom prikazivanja rezultata merenja neke fizičke veličine neophodno je prikazati i kvantitativni indikator kvaliteta tog rezultata. On omogućava korisnicima procenu verodostojnosti i pouzdanosti rezultata. Bez njega, rezultati merenja se ne mogu efikasno uporediti međusobno ili sa referentnim vrednostima koje su navedene u standardima. Analiza merenja se izražava kroz budžet merne nesigurnosti, a dobijena ukupna merna nesigurnost predstavlja verovatnoću da se rezultat merenja nalazi u intervalu koji je definisan procenjenom vrednošću i mernom nesigurnošću. Sam budžet biće predstavljen u vidu tabele, u kojoj će biti navedeni svi izvori koji doprinose mernoj nesigurnosti, vrednost veličine, merna jedinica, proširena merna nesigurnost, tip raspodele, faktor pokrivanja i standardna (relativna) merna nesigurnost. Na samom dnu tabele biće prikazana ukupna tj. kombinovana merna nesigurnost. Budžet će biti predstavljen za set starih bakarnih apsorbera.

8.1 Merna nesigurnost tipa A i tipa B

Kao što se iz podnaslova može zaključiti, postoje dva tipa mernih nesigurnosti, a podela je izvršena prema načinu njihove procene.

Tip A merne nesigurnosti se procenjuje statističkom analizom niza merenja. Ukoliko je izvršeno n merenja veličine x_i , najpre se računa srednja vrednost te veličine prema formuli:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (23)$$

Zatim je potrebno izračunati standardnu devijaciju, $s(x)$, koja opisuje rasipanje pojedinačnih vrednosti oko njihove srednje vrednosti prema jednačini:

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (24)$$

Srednja vrednost \bar{x} takođe ima svoje standardno odstupanje koje se izražava kroz standardnu devijaciju srednje vrednosti, $s(\bar{x})$:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x})^2} \quad (25)$$

Upravo će se standardna devijacija srednje vrednosti koristiti u daljem proračunu merne nesigurnosti A tipa. Standardna merna nesigurnost tipa A će u budžetu biti prikazana kao relativna standardna merna nesigurnost i za svaku od merenih veličina se računa na sledeći način:

$$u_{r,i} = \frac{s(\bar{x})}{\bar{x} \cdot 2} \quad (26)$$

U jednačini iznad, \bar{x} predstavlja srednju vrednost veličine za koju se računa relativna standardna merna nesigurnost, a 2 je faktor pokrivanja za Gausovu (normalnu) raspodelu. Ako je vrednost neke veličine određena ponovljenim merenjima, najčešće se pretpostavlja normalna raspodela verovatnoće. Za slučaj normalne raspodele, vrednosti $k=2$ približno odgovara nivo pouzdanosti od 95 %. [Živanović, 2016]

Standardna merna nesigurnost tipa B, u_B , određuje se drugačijim postupkom od statističke analize niza merenja. U ovom radu, za procenu merne nesigurnosti B tipa, korišćene su normalna i pravougaona raspodela. Pravougaona raspodela verovatnoće koristi se u situacijama kada se pretpostavlja da se vrednost veličine nalazi unutar određenog intervala. Tada je moguće pretpostaviti da se tačna vrednost nalazi u datom intervalu sa verovatnoćom od 100%, a odgovarajući faktor pokrivanja iznosi $k=1.73$. [Živanović, 2016]

8.2 Kombinovana merna nesigurnost

Nakon što se identifikuju svi izvori nesigurnosti i odrede njihovi doprinosi, potrebno je izračunati ukupnu mernu nesigurnost, u_C . Ona se izračunava kombinacijom doprinosa ulaznih veličina, prema jednačini 27, pa otuda i naziv kombinovana merna nesigurnost.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (27)$$

8.3 Identifikacija izvora mernih nesigurnosti za set starih apsorbera

8.3.1 Debljina filtara

Ovaj doprinos mernoj nesigurnosti podrazumeva mernu nesigurnost tipa A koja potiče od ponovljivosti merenja debljina filtara, kao i mernu nesigurnost tipa B koja se odnosi na sledljivost odnosno etaloniranje korišćenog merila debljine tj. mikrometra. U uverenju o etaloniranju data je kao standardna merna nesigurnost pomnožena faktorom poverenja $k=2$, odnosno $(25+0.006 L) \mu\text{m}$, gde je L u mm. Da bi se dobila maksimalna očekivana nesigurnost mikrometra pri merenju debljine, u formulu je potrebno uneti najveću izmerenu debljinu filtra ($L = 2.89 \text{ mm}$). Na taj način, dobijena je standardna relativna merna nesigurnost od 0.87%.

Što se tiče doprinosa A tipa, u konačan budžet će ući slučaj koji se odnosi na debljinu filtra koja je bliska očekivanom HVL-u, a iz tabele 11. se može videti da on iznosi 0.15%.

Tabela 11 Doprinosi ponovljivosti merenja debljine starih filtara

Izvor merne nesigurnosti	Vrednost	Proširena merna nesigurnost	Jedinica	Raspodela	Faktor pokrivanja	Standardna merna nesigurnost	Stand. rel. merna nesigurnost
Ponovljivost merenja debljine filtra d1	0.45	0.007	mm Cu	Normalna	2	0.003	0.75%
Ponovljivost merenja debljine filtra d2	0.94	0.004	mm Cu	Normalna	2	0.002	0.21%
Ponovljivost merenja debljine filtra d3	1.46	0.004	mm Cu	Normalna	2	0.002	0.14%
Ponovljivost merenja debljine filtra d4	1.89	0.006	mm Cu	Normalna	2	0.003	0.15%
Ponovljivost merenja debljine filtra d5	2.39	0.002	mm Cu	Normalna	2	0.001	0.05%
Ponovljivost merenja debljine filtra d6	2.89	0.004	mm Cu	Normalna	2	0.002	0.06%

8.3.2 Sferna jonizaciona komora (sekundarni etalon)

Doprinos mernoj nesigurnosti uključuje merne nesigurnosti tipa A koje su povezane sa merenjem jačine kerme sekundarnim etalomom i mernu nesigurnost tipa B koja se odnosi na linearnost elektrometra povezanog sa ovom komorom. U slučaju novih UNIDOS Weblina elektrometara, navedena linearnost je bolja od $\pm 0.25 \%$. Pretpostavljajući pravougaonu raspodelu, standardna relativna merna nesigurnost usled nelinearnosti iznosi 0.14 %. [Institut za nuklearne nauke "VINČA", 2020]

Što se tiče doprinosa koji potiče od ponovljivosti merenja jonizacionom komorom, po pravilu se bira najveći doprinos za ceo opseg debljina, koji u ovom slučaju iznosi 0.04%. Kako je on

manji od 0.1% neće biti uključen u ukupan budžet. Svi doprinosi mernoj nesigurnosti tipa A su navedeni u tabeli 12.

Tabela 12 Doprinosi ponovljivosti merenja jačine kerme u vazduhu sekundarnim etalonom

Izvor merne nesigurnosti	Vrednost	Proširena merna nesigurnost	Jedinica	Raspodela	Faktor pokrivanja	Standardna merna nesigurnost	Relativna merna nesigurnost
Ponovljivost merenja jačine kerme (bez filtracije)	447.0	0.18	μGy/min	Normalna	2	0.09	0.02%
Ponovljivost merenja jačine kerme (za debljinu filtera d1)	372.3	0.10	μGy/min	Normalna	2	0.05	0.01%
Ponovljivost merenja jačine kerme (za debljinu filtera d2)	302.9	0.08	μGy/min	Normalna	2	0.04	0.01%
Ponovljivost merenja jačine kerme (za debljinu filtera d3)	250.9	0.12	μGy/min	Normalna	2	0.06	0.02%
Ponovljivost merenja jačine kerme (za debljinu filtera d4)	209.8	0.15	μGy/min	Normalna	2	0.07	0.04%
Ponovljivost merenja jačine kerme (za debljinu filtera d5)	175.0	0.07	μGy/min	Normalna	2	0.04	0.02%
Ponovljivost merenja jačine kerme (za debljinu filtera d6)	144.2	0.10	μGy/min	Normalna	2	0.05	0.03%

Pored prethodno navedenih, u budžet je neophodno uvrstiti i doprinos koji se odnosi na energetske odziv jonizacione komore. Jonizaciona komora je izložena spektru N-120, koji je formiran pomoću filtracije definisane standardom. Međutim, dodavanjem novih filtera od bakra, dolazi do promene spektra na poziciji jonizacione komore, a samim tim se menja i kalibracioni koeficijent komore (zbog njegove zavisnosti od energije snopa). Zbog ove činjenice je potrebno uvrstiti ovaj doprinos, koji treba da nam da uvid u to kako se menja kalibracioni koeficijent jonizacione komore tokom dodavanja filtera različitih debljina. Doprinos se računa preko sledećeg izraza:

$$en. o. j. k. = \frac{HVL_{N-120}^{2nd} - HVL_{N-120}^{1st}}{HVL_{N-150}^{1st} - HVL_{N-120}^{1st}} * \frac{N_{N-150}^k - N_{N-120}^k}{N_{N-120}^k} \quad (28)$$

Gde su HVL_{N-120}^{1st} i HVL_{N-120}^{2nd} prvi i drugi HVL za kvalitet N-120, a HVL_{N-150}^{1st} prvi HVL za kvalitet N-150. Njihove vrednosti se uzimaju iz standarda i iznose 1.67, 1.73 i 2.30 mmCu, redom. N_{N-120}^k i N_{N-150}^k predstavljaju kalibracione koeficijente jonizacione komore PTW 32005 za odgovarajuće kvalitete i iznose 1.085 ± 0.020 i 1.098 ± 0.020 . Pretpostavljajući pravougaonu raspodelu, za relativnu mernu nesigurnost se dobija vrednost od 0.07%.

8.3.3 Monitorska jonizacijska komora

Obuhvata merne nesigurnosti tipa A koje su povezane sa merenjima naelektrisanja monitorskom komorom, a koje su prikazane u tabeli 13 i mernu nesigurnost tipa B koja se odnosi na linearnost elektrometra povezanog sa ovom komorom. Kada su u pitanju stari UNIDOS elektrometri, u specifikaciji proizvođača je navedeno da je linearnost bolja od ± 0.5 %. Raspodela je i u ovom slučaju pravougaona, a standardna relativna merna nesigurnost usled nelinearnosti iznosi 0.29%. [Institut za nuklearne nauke “VINČA”, 2020] Doprinos koji se odnosi na ponovljivost merenja monitorskom komorom iznosi 0.03%, bira se na isti način kao i u prethodnom slučaju i iz istih razloga neće biti prikazan u ukupnom budžetu.

Tabela 13 Doprinosi ponovljivosti merenja naelektrisanja monitorskom komorom

Izvor merne nesigurnosti	Vrednost	Proširena merna nesigurnost	Jedinica	Raspodela	Faktor pokrivanja	Standardna merne nesigurnosti	Relativna merna nesigurnost
Ponovljivost merenja naelektrisanja (bez filtracije)	878.7	0.10	pC/min	Normalna	2	0.05	0.01%
Ponovljivost merenja naelektrisanja (za debljinu filtera d1)	877.9	0.40	pC/min	Normalna	2	0.20	0.02%
Ponovljivost merenja naelektrisanja (za debljinu filtera d2)	872.3	0.50	pC/min	Normalna	2	0.25	0.03%
Ponovljivost merenja naelektrisanja (za debljinu filtera d3)	872.2	0.35	pC/min	Normalna	2	0.18	0.02%
Ponovljivost merenja naelektrisanja (za debljinu filtera d4)	876.1	0.30	pC/min	Normalna	2	0.15	0.02%
Ponovljivost merenja naelektrisanja (za debljinu filtera d5)	875.1	0.45	pC/min	Normalna	2	0.22	0.03%
Ponovljivost merenja naelektrisanja (za debljinu filtera d6)	876.4	0.40	pC/min	Normalna	2	0.20	0.02%

8.3.4 Merenja temperature

Obuhvata doprinos merne nesigurnosti tipa B koji se odnosi na razliku u merenju temperature na poziciji monitorske komore i sekundarnog etalona, zbog čega u ukupan budžet ulazi dvaput. Iznosi 0.2 K i izražena je kao proširena merna nesigurnost ukoliko se prostorija u kojoj se merenje obavlja drži pod referentnim ambijentalnim uslovima. Pretpostavljajući pravougaonu raspodelu, standardna relativna merna nesigurnost iznosi 0.04 %.

8.3.5 Merenja pritiska

Ovaj doprinos takođe u ukupan budžet ulazi dvaput jer predstavlja doprinos merne nesigurnosti B tipa koji se odnosi na razliku u merenju pritiska na poziciji monitorske komore i sekundarnog etalona. Ovaj doprinos je procenjen na 1 mbar i izražen je kao proširena merna nesigurnost sa

pretpostavljenom pravougaonom rasodelom. Procenjena relativna standardna merna nesigurnost iznosi 0.06%. [Institut za nuklearne nauke “VINČA”, 2020]

8.3.6 Propagacija merne nesigurnosti

Poslednji doprinos, $u(HVL)$, je posledica samog procesa propagacije merne nesigurnosti. Ovaj doprinos je bitan deo ukupnog budžeta merne nesigurnosti, budući da je veličina HVL izračunata na osnovu eksperimentalno dobijenih vrednosti za d i A . Svaka od ovih vrednosti ima svoju mernu nesigurnost, uslovljenu ograničenjima samog procesa merenja. Te individualne nesigurnosti se prenose ili propagiraju na izračunatu vrednost HVL. Stoga je neophodno uzeti u obzir i taj doprinos pri sastavljanju konačnog budžeta merne nesigurnosti.

U tabeli 14. nalaze se ulazni podaci na osnovu kojih su generisane sve kombinacije u razlikama debljina filtera i veličina A , a zatim za svaku od njih izvršena je propagacija prikazana tabelom 15.

Tabela 14 Tabela ulaznih podataka na osnovu kojih se formiraju kombinacije za tabelu 15.

	0	1	2	3	4	5
d (mm Cu)	0.48	0.98	1.46	1.93	2.41	2.91
A	0.17	0.37	0.56	0.75	0.92	1.12

Kako se veličina HVL dobija iz jednačine prave linije, propagacija merne nesigurnosti se radi pomoću sledećeg izraza:

$$HVL = \frac{d_2 - d_1}{A_2 - A_1} (-\ln 0.5 + A_1) + d_1 \quad (29)$$

Jednačina 29 je izvedena upravo iz jednačine prave tj. predstavlja njenu modifikaciju. Član $\frac{d_2 - d_1}{A_2 - A_1}$ predstavlja recipročnu vrednost koeficijenta prave, član $(-\ln 0.5 + A_1)$ je korekcija za isečak na y-osi, dok je d_1 početna debljina filtra.

Radi lakšeg razumevanja i proračuna, jednačina 29 je pojednostavljena na sledeći način:

$$HVL = z + d_1 \quad (30)$$

Procena doprinosa $u(HVL)$ mernoj nesigurnosti vrši se prema sledećem izrazu:

$$u(HVL) = \sqrt{u(d_1)^2 + u(z)^2 + u_{met}^2} \quad (31)$$

Član $u(d_1)$ predstavlja kombinovanu mernu nesigurnost debljine filtera, računa se pomoću izraza 27, a $u(z)$ je merna nesigurnost veličine z i data je sledećom jednačinom:

$$u(z) = z \cdot \sqrt{\left(\frac{u(\Delta_d)}{\Delta_d}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta_A)}{\Delta_A}\right)^2 + \left(\frac{u(A_1)}{A_1}\right)^2} \quad (32)$$

A_1 predstavlja odnos jačine kerme nakon filtracije i bez dodatne filtracije, računa se pomoću jednačine 22, a vrednost je navedena u tabeli 14. Član $u(A_1)$ predstavlja kombinovanu mernu nesigurnost ove veličine, a dobija se kombinacijom svih pojedinačnih doprinosa koji se odnose na sekundarni etalon i monitorsku komoru. Sa Δ_d označene su razlike u debljinama filtera po kombinaciji, Δ_A predstavlja razliku u veličinama A , dok su $u(\Delta_d)$ i $u(\Delta_A)$ njihove merne nesigurnosti date sledećim jednačinama:

$$u(\Delta d) = \sqrt{2 \cdot u(d)^2} \quad (33)$$

$$u(\Delta A) = \sqrt{2 \cdot u(A)^2} \quad (34)$$

U izrazu za $u(HVL)$ se pored merne nesigurnosti debljine filtra $u(d_1)$ i merne nesigurnosti veličine z pojavljuje i član u_{met} , koji se odnosi na metodologiju proračuna HVL. U teoriji, prilikom prolaska monoenergetskog fotonskog snopa kroz apsorber, svi fotoni bivaju atenuirani sa istom verovatnoćom. Međutim, snop X-zračenja koji je korišćen za određivanje HVL-a nije idealno monoenergetski, već postoji uzak spektar fotonskih energija. Kada ovakav snop prolazi kroz atenuatore različitih debljina, dolazi do njegovog otvrdnjavanja, zbog činjenice da fotoni različitih energija neće biti atenuirani u istoj meri. Ovo može rezultirati promenom vrednosti koeficijenta prave u proračunu za HVL. Iz svega prethodno navedenog, nameće se zaključak da odabir debljine filtera može uticati na vrednost određivanja HVL, pa se shodno tome i dodaje merna nesigurnost koja se odnosi na samu metodu određivanja ove veličine, a u tabeli 15. je prikazana kao u_{met} . Ovaj doprinos je dobijen tako što se za referentnu razliku u debljinama filtera uzima kombinacija 2-3, zbog činjenice da se između ove dve debljine očekuje HVL, a zatim se ostali podaci normiraju u odnosu na nju. Izabran je slučaj koji odgovara celom opsegu

debljina filtera (kombinacija 0-5) i iznosi 0.02, što je proširena merna nesigurnost, a raspodela ove komponente se može smatrati pravougaonom sa faktorom poverenja $k=1.73$.

Nakon određivanja doprinosa koji se odnosi na metodologiju proračuna HVL i ostalih članova iz jednačine 31, za $u(\text{HVL})$ dobijaju se vrednosti u tabeli ispod. I kod ovog doprinosa u konačan budžet će ući slučaj koji se odnosi na ceo opseg debljina filtera (kombinacija 0-5), iznosi 0.036 i izražen je kao proširena merna nesigurnost. I u ovom slučaju pretpostavljena raspodela je pravougaona, a relativna merna nesigurnost iznosi 1.14%

Tabela 15 Tabela podataka na osnovu kojih su dobijeni doprinosi u_{met} i $u(\text{HVL})$

Komb.	z	HVL	U_{met}	$u(\text{HVL})$
0-1	1.30	1.78	-0.016	0.055
0-2	1.31	1.79	-0.003	0.036
0-3	1.32	1.80	0.001	0.032
0-4	1.34	1.82	0.021	0.037
0-5	1.33	1.81	0.020	0.036
1-2	0.82	1.80	-8.4E-06	0.032
1-3	0.82	1.80	1.7E-06	0.019
1-4	0.83	1.81	0.015	0.021
1-5	0.83	1.81	0.012	0.018
2-3	0.34	1.80		0.015
2-4	0.34	1.80	0.009	0.014
2-5	0.34	1.80	0.006	0.012
3-4	-0.14	1.79	-0.007	0.013
3-5	-0.14	1.79	-0.004	0.010
4-5	-0.59	1.82	0.023	0.032

Svi identifikovani izvori merne nesigurnosti se nalaze u konačnom budžetu koji je prikazan tabelom 16.

Tabela 16 Budžet merne nesigurnosti za set starih apsorbera od bakra

Redni broj	Izvor merne nesigurnosti	Vrednost	Proširena merna nesigurnost, U_i	Jedinica	Raspodela	Faktor pokrivanja	Standardna relativna merna nesigurnost, $u_{r,i}$
	1. Debljina filtera						
1-1	Ponovljivost merenja debljine filtera	1.89	0.01	mm Cu	Normalna	2	0.15%
1-2	Etaloniranje mikrometra	2.89	0.05	mm	Normalna	2	0.87%
	2. Jonizaciona komora (sekundarni etalon)						
2-1	Linearnost merog sklopa	1	0.0025	/	Pravoug.	1.73	0.14%
2-2	Merenje temperature	293.15	0.2	K	Pravoug.	1.73	0.04%
2-3	Merenje pritiska	1013.25	1	mbar	Pravoug.	1.73	0.06%

2-4	Energetski odziv jonizacione komore	1	0.001	/	Pravoug.	1.73	0.07%
3. Monitorska komora							
3-1	Linearnost mernog sklopa	1	0.005	/	Pravoug.	1.73	0.29%
3-2	Merenje temperature	293.15	0.2	K	Pravoug.	1.73	0.04%
3-3	Merenje pritiska	1013.25	1	mbar	Pravoug.	1.73	0.06%
4. Propagacija merne nesigurnosti							
4-1	Analiza doprinosa u(HVL)	1.81	0.036	/	Pravoug.	1.73	1.14%
Kombinovana merna nesigurnost							1.48%

Kao što se može videti, kombinovana merna nesigurnost je procenjena na 1.48%. Za faktor poverenja $k=1$, čiji je nivo pouzdanosti približno 68 %, izmerena vrednost i odgovarajuća merna nesigurnost za HVL iznose:

$$(1.78 \pm 0.03) \text{ mm Cu}$$

Korišćenjem faktora poverenja $k=2$, izračunata kombinovana merna nesigurnost iznosi 2.96%. Ovo daje interval pouzdanosti od 95%, a rezultat merenja se izražava kao:

$$(1.78 \pm 0.05) \text{ mm Cu}$$

ZAKLJUČAK

Kao što je na početku rada spomenuto, bolji rezultati merenja su očekivani za noviji set filtara od bakra, zbog činjenice da je čistoća ovih filtara tačno definisana od strane proizvođača. Međutim, iz rezultata merenja se može videti da to nije slučaj. Razlog tome može biti značajan uticaj rasejanja, koji bi se možda regulisao korišćenjem sferne jonizacione komore Exradin A3, čija zapremina iznosi 3 cm³. Kako se radi o snopu koji je jako filtriran, postojala je opasnost da nivo signala bude jako nizak ukoliko bi se koristila komora manje zapremine, pa je ovo i glavni razlog zašto ona nije korišćena.

U standardu ISO 4037-1 se kao uslov za uspešnost merenja navodi da maksimalna apsolutna devijacija izmerene debljine poluslabljenja u odnosu na referentnu vrednost ne sme biti veća od 200 µm. Merenja za oba seta filtara uspešno su obavljena, jer ne premašuju zadato ograničenje od 200 µm.

Nakon identifikacije svih izvora koji mogu da doprinesu mernoj nesigurnosti i primene faktora pokrivanja $k = 2$, može se zaključiti da se vrednost HVL dobijena eksperimentom nalazi unutar intervala od ± 0.05 mm Cu sa pouzdanošću od 95 %.

LITERATURA

- [1] Mould, R. F. (1995). Rontgen and the discovery of X-rays. The British Journal of Radiology.
- [2] Martin, J. E. (2006). Physics for radiation protection: A handbook (2nd ed.). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [3] Krmar, M. (2013). Uvod u nuklearnu fiziku. Univerzitet u Novom Sadu.
- [4] IAEA (2014). Diagnostic radiology physics: a handbook for teachers and students. Vienna.
- [5] Petrović, B. (2018). Fizičke osnove radioterapije, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet. Departman za fiziku. Novi Sad.
- [6] IAEA (1999). Assessment of occupational exposure due to external sources of radiation: safety guide. Vienna.
- [7] IAEA (2014). Nuclear medicine physics: a handbook for students and teachers. Vienna.
- [8] ICRP (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [9] Knoll, G. F. (1999). Radiation Detection and Measurement (3rd ed.). John Wiley & Sons, New York.
- [10] Steinmeyer, P. R. (2003). Ion Chambers: Everything You've Wanted to Know (But Were Afraid to Ask). RSO Magazine. 8(5).
- [11] Boström, C. and Messler, O. (2019). Design and Evaluation of a 3D Printed Ionization Chamber. Degree Project in Technology. First Cycle. Stockholm, Sweden.
- [12] PTW Detectors for Ionizing Radiation. Catalog.
- [13] Vičić, M. (2014) Osnovi fizike radijacione terapije. Deo 1. Teleterapija.
- [14] Terzić, M. i Forkapić, S. (2018) Uvod u metrologiju i standardizaciju. Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku
- [15] BIPM Member States, <https://www.bipm.org/en/member-states>
- [16] Allisy, P. J., Burns, D. T., and Andreo, P. (2009) International framework of traceability for radiation dosimetry quantities.

- [17] IAEA (2018) SSDL NETWORK CHARTER. Vienna
- [18] IAEA SSDL Network, <https://ssdl.iaea.org/>
- [19] Institut za standardizaciju Srbije, https://iss.rs/sr_Cyrl/shta-je-standard_p13.html
- [20] Herrati, A., Arib, M., Sidahmed, T., and Khalal-Kouache, K. (2016) Establishment of ISO 4037-1 X-Ray Narrow-Spectrum Series at SSDL of Algiers. Department of Medical Physics, Nuclear Research Center of Algiers (CRNA)
- [21] International Organization for Standardization (2019), X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1. ISO 4037-1, Geneva
- [22] Miloš Z. Živanović (2016) Optimizacija merenja koncentracije radona u zatvorenom prostoru metodom ugljenih filtera, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju
- [23] Institut za nuklearne nauke VINČA” (2020) BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI ZA ETALONIRANJE, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Laboratorija za radijaciona merenja, Beograd

Biografija



Nina Šćepanović, rođena 1993. godine u Valjevu, Republika Srbija, provela je svoje detinjstvo u Kraljevu. Srednjoškolsko obrazovanje stiče u Gimnaziji, gde kao maturantkinja učestvuje na Kraljevačkom festivalu nauke.

Nakon srednje škole, 2012. godine, započinje studije primenjene i kompjuterske fizike na Fizičkom fakultetu u Beogradu. U okviru ovih studija, takođe učestvuje kao volonter na Festivalu nauke.

Tokom studija otkriva veliku zainteresovanost prema medicinskoj fizici, što je rezultiralo njenim prelaskom na ovaj smer na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu 2016. godine. Nakon uspešnog završetka osnovnih studija na ovom smeru, nastavlja svoje obrazovanje upisivanjem master studija.

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:

Nina Šćepanović

AU

Mentor:

prof. dr Nataša Todorović
dr Nikola Kržanović

MN

Naslov rada:

Merenje debljine poluslabljenja referentnih kvaliteta X-zračenja uz procenu merne nesigurnosti

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2023

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:

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

MA*Fizički opis rada:*

Broj poglavlja: 8
Broj strana: 68
Broj tabela: 16
Broj slika: 25
Broj referenci: 23

FO*Naučna oblast:*

Fizika

NO*Naučna disciplina:*

Medicinska fizika

ND*Predmetna odrednica/ ključne reči:*

Rendgensko zračenje, dozimetrija, zaštita od zračenja, ISO 4037:2019

PO**UDK***Čuva se:*

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU*Važna napomena:*

nema

VN*Izvod:*

U ovom master radu izvršena je validacija referentnog kvaliteta X-zračenja N-120 prema standardu ISO 4037:2019, merenjem veličine HVL za dva seta filtera od bakra. Takođe je priložen i budžet merne nesigurnosti radi uvida u nesigurnost cele procedure.

IZ*Datum prihvatanja teme od NN veća:***DP***Datum odbrane:*

13.09.2023.

DO*Članovi komisije:***KO***Predsednik:*

prof. dr Jovana Nikolov

Član:

prof. dr. Ivana Stojković

Član:

prof. dr Nataša Todorović

Član:

dr Nikola Kržanović

Član:

dr Miloš Živanović

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:

Master thesis

CC

Author:

Nina Šćepanović

AU

Mentor/comentor:

prof. dr Nataša Todorović
dr Nikola Kržanović

MN

Title:

Measurement of half-value layer thickness of reference X-ray beam
qualities with uncertainty estimation

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

Serbian/English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2023

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

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

PP

Physical description: Number of chapters: 8
PD Number of pages: 68
Number of tables: 16
Number of pictures: 25
Number of references: 23

Scientific field: Physics
SF

Scientific discipline: Medical Physics
SD

Subject/ Key words: X-ray radiation, dosimetry, radiation protection, ISO 4037:2019
SKW

UC

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD

Note: none
N

Abstract: In this master paper, the validation of reference X-ray qualities N-120 was carried out, in accordance with ISO 4037:2019, by measuring the HVL for two sets of copper filters. A measurement uncertainty budget is also provided for insight into the uncertainty of the entire procedure.
AB

Accepted by the Scientific Board:
ASB

Defended on: 13.09.2023.
DE

Thesis defend board:
DB

President: prof. dr Jovana Nikolov

Member: prof. dr Ivana Stojković

Member: prof. dr Nataša Todorović

Member: dr Nikola Kržanović

Member: dr Miloš Živanović