

UNIVERZA V LJUBLJANI
PEDAGOŠKA FAKULTETA
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
FAKULTETA ZA KEMIJO IN KEMIJSKO TEHNOLOGIJO
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA

DIPLOMSKO DELO

IRENA KRAMAR

UNIVERZA V LJUBLJANI
PEDAGOŠKA FAKULTETA
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
FAKULTETA ZA KEMIJO IN KEMIJSKO TEHNOLOGIJO
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA
Študijski program: Kemija in fizika

Demonstracijski eksperimenti z rentgensko svetlobo
DIPLOMSKO DELO

Mentor: izr. prof. dr. Bojan Golli

Kandidatka: Irena Kramar

Ljubljana, avgust 2016

Zahvaljujem se mentorju, izr. prof. dr. Bojanu Goliju, za strokovno pomoč, nasvete in usmeritve pri pisanju diplomskega dela in Jožetu Veržetu, ki mi je pomagal pri pripravi vzorca bakra.

Zahvala gre tudi Kliničnemu inštitutu za radiologijo Univerzitetnega kliničnega centra Ljubljana, kjer so mi omogočili izvedbo eksperimentalnega dela diplomskega dela in Boštjanu Gajšku, dipl. inž. rad., ki mi je pomagal pri slikanju vzorcev z rentgensko svetlobo.

Rada bi se zahvalila tudi staršem za vso ljubezen, podporo in potrpežljivost skozi vsa leta mojega šolanja.

POVZETEK

V diplomskem delu opišem uporabo rentgenske svetlobe v zdravstvu, predvsem v diagnostične namene. Bolj podrobno predstavim tudi nastanek rentgenske svetlobe (zavorno in karakteristično sevanje) ter interakcije fotonov rentgenske svetlobe s snovjo, skozi katero prehajajo (fotoefekt, Comptonov pojav, Rayleighovo sipanje in nastanek para). Ker je bil eksperimentalni del diplomskega dela opravljen s klasičnim rentgenskim aparatom, na kratko opišem tudi njegovo zgradbo in delovanje. V eksperimentalnem delu so prikazane rentgenske slike vzorcev in rezultati obdelave teh slik s programom ImageJ. Iz dobljenih podatkov sem izračunala masni absorpcijski koeficienti aluminija in bakra pri različnih napetostih na rentgenski cevi ter konstantnem produktu jakosti električnega toka in ekspozicijskega časa. Na koncu sem komentirala tudi značilne rentgenske slike organskega vzorca (riba orada).

Ključne besede: radioaktivnost, ionizirajoče sevanje, rentgenska svetloba, zavorno sevanje, karakteristično sevanje, masni absorpcijski koeficient

ABSTRACT

In the thesis I describe the use of X-ray in medicine, particularly for diagnostic purposes. More specifically I describe formation of X-ray (characteristic radiation and bremsstrahlung) and interaction of X-ray photons with the substance (photoelectric effect, Compton scattering, Rayleigh scattering and pair production). Experimental part of the thesis was made with a classical X-ray machine, so I describe briefly its structure and functioning. The experimental part contains X-ray images of some samples and results of processing these images using ImageJ program. From the obtained data I calculated the mass attenuation coefficients of aluminium and copper at different voltages applied to an X-ray tube and at constant product of the electric current and the exposure time. I also commented on the characteristic X-ray images of an organic sample (breast).

Keywords: radiation, ionizing radiation, X-ray, characteristic radiation, bremsstrahlung, mass attenuation coefficient

KAZALO

1. Uvod.....	1
2. Kaj je sevanje	3
2.1. Ionizirajoče in neionizirajoče sevanje.....	3
2.2. Vrste ionizirajočega sevanja	5
2.2.1. Sevanje alfa	6
2.2.2. Sevanje beta.....	6
2.2.3. Sevanje gama.....	7
2.2.4. Rentgenska svetloba	7
3. Rentgenska svetloba.....	8
4. Kako fotoni reagirajo s snovjo	11
4.1. Fotoefekt	11
4.2. Comptonov pojav.....	12
4.3. Rayleighovo sipanje.....	13
4.4. Nastanek para.....	14
4.5. Oslabitev ali atenuacija toka fotonov.....	15
5. Količina sevanja v vsakdanjem življenju.....	16
6. Rentgenski aparat	19
6.1. Rentgenska cev	20
6.1.1. Zgradba rentgenske cevi.....	20
6.1.2. Delovanje rentgenske cevi	20
6.2. Filtri	21
6.3. Sprejemnik	22
6.3.1. Slikovne plošče	22
6.4. Generator	23
7. Eksperimentalni del.....	24
7.1. Slikanje vzorca aluminija.....	26
7.1.1. Napetost na rentgenski cevi $U = 81 \text{ kV}$, produkt električnega toka in ekspozicijskega časa $I_{\text{elt}} = 4 \text{ mAs}$	26
7.1.2. $U = 60 \text{ kV}$, $I_{\text{elt}} = 4 \text{ mAs}$	29
7.1.3. $U = 40 \text{ kV}$, $I_{\text{elt}} = 4 \text{ mAs}$	32
7.2. Slikanje vzorca bakra.....	35

7.2.1.	Napetost na rentgenski cevi $U = 81 \text{ kV}$, produkt električnega toka in ekspozicijskega časa $I_{\text{elt}} = 4 \text{ mAs}$	35
7.2.2.	$U = 60 \text{ kV}$, $I_{\text{elt}} = 4 \text{ mAs}$	38
7.2.3.	$U = 40 \text{ kV}$, $I_{\text{elt}} = 4 \text{ mAs}$	41
7.3.	Povzetek dobljenih rezultatov pri slikanju vzorcev aluminija in bakra.....	43
7.4.	Slikanje organskega vzorca – orada	44
8.	Zaključek.....	46
9.	Literatura.....	47

KAZALO SLIK

Slika 1: Spekter elektromagnetnega valovanja.....	5
Slika 2: Zavorno sevanje	8
Slika 3: Spekter rentgenske svetlobe pri nižji W_{k1} in višji W_{k2} kinetični energiji [4].....	9
Slika 4: Karakteristično sevanje	10
Slika 5: Spekter rentgenske svetlobe pri nižji in višji kinetični energiji vpadnih elektronov, pri čemer je višja energija dovolj visoka, da se pojavi karakteristično sevanje [4]	10
Slika 6: Fotoefekt	12
Slika 7: Comptonov pojav	13
Slika 8: Rayleighovo sipanje	14
Slika 9: Nastanek para	14
Slika 10: Spekter rentgenske svetlobe ob njenem nastanku (rdeča črta) [4]	15
Slika 11: Klasični rentgenski aparat	19
Slika 12: Rentgenska cev [13]	20
Slika 13: Slikovna plošča..	23
Slika 14: Čitalnik slike	23
Slika 15: Vzorec aluminija	24
Slika 16: Vzorec bakra	24
Slika 17: Rentgenska slika vzorca aluminija pri pogojih 81 kV in 4 mAs.....	26
Slika 18: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi.....	27
Slika 19: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 81 kV in 4 mAs	28
Slika 20: Rentgenska slika vzorca aluminija pri pogojih 60 kV in 4 mAs.....	29
Slika 21: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 60 kV in 4 mAs	30
Slika 22: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 60 kV in 4 mAs	31
Slika 23: Rentgenska slika vzorca aluminija pri pogojih 40 kV in 4 mAs.....	32
Slika 24: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 40 kV in 4 mAs	33
Slika 25: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 40 kV in 4 mAs	34

Slika 26: Rentgenska slika vzorca bakra pri pogojih 81 kV in 4 mAs.....	35
Slika 27: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 81 kV in 4 mAs	36
Slika 28: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 81 kV in 4 mAs	37
Slika 29: Rentgenska slika vzorca bakra pri pogojih 60 kV in 4 mAs.....	38
Slika 30: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 60 kV in 4 mAs	39
Slika 31: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 60 kV in 4 mAs	40
Slika 32: Rentgenska slika vzorca bakra pri pogojih 40 kV in 4 mAs.....	41
Slika 33: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 40 kV in 4 mAs	41
Slika 34: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 40 kV in 4 mAs	42
Slika 35: Rentgenska slika orade pri pogojih 40 kV in 32 mAs	44
Slika 36: Rentgenska slika orade pri pogojih 52 kV in 12,5 mAs	44
Slika 37: Rentgenska slika orade pri pogojih 81 kV in 4 mAs	44

KAZALO TABEL

Tabela 1: Doze, ki jih lahko prejmemo v vsakdanjem življenju poleg naravnega ozadja [2, 8, 11].....	18
Tabela 2: Masni absorpcijski koeficient za aluminij in baker pri različnih energijah [15, 16].....	25
Tabela 3: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca aluminija pri pogojih 81 kV in 4 mAs.....	27
Tabela 4: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca aluminija pri pogojih 60 kV in 4 mAs.....	29
Tabela 5: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca aluminija pri pogojih 40 kV in 4 mAs.....	32
Tabela 6: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca bakra pri pogojih 81 kV in 4 mAs.....	35
Tabela 7: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca bakra pri pogojih 60 kV in 4 mAs.....	38
Tabela 8: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca bakra pri pogojih 40 kV in 4 mAs.....	41
Tabela 9: Izmerjeni masni absorpcijski koeficient za aluminij pri različnih energijah.....	43
Tabela 10: Izmerjeni masni absorpcijski koeficient za baker pri različnih energijah.....	43

1. Uvod

V kurikulumu za osnovno šolo je bilo včasih temam radioaktivnost, radioaktivno sevanje in rentgenska svetloba posvečen vsaj majhen del snovi, v najnovejšem kurikulumu pa se teh tem sploh ne dotaknejo. Učitelji jih morda omenijo le kot zanimivost ali pa jih obravnavajo pri dodatnem pouku z nadarjenimi učenci. Zaradi premajhnega poznavanja teme si tako učenci predstavijo o radioaktivnosti in sevanju ustvarijo kar sami. Da ne bi bila ta predstava napačna, se mi je zdelo smiselno, da s pomočjo demonstracijskih eksperimentov, poskušam to temo približati učencem. V vsakdanjem življenju smo namreč ves čas izpostavljeni različnim virom sevanja in navsezadnje smo vir sevanja tudi sami. Ta tema je za nas, ki živimo v Sloveniji tudi precej aktualna, saj imamo po podatkih IAEA (International Atomic Energy Agency) eno izmed 447 trenutno delujočih jedrskih elektrarn na svetu. [1] Vsak izmed nas se v svojem življenju zagotovo slej ko prej sreča tudi s sevanjem v zdravstvene namene, kjer se rentgenska svetloba uporablja za ugotavljanje različnih poškodb in bolezni, sevanje gama radioaktivnih elementov pa za zdravljenje različnih rakavih obolenj. Ker sem zaposlena na Kliničnem inštitutu za radiologijo Univerzitetnega kliničnega centra Ljubljana, kjer se radiologi ukvarjajo z diagnosticiranjem poškodb in bolezni, se bom v diplomskem delu osredotočila predvsem na rentgensko svetlobo, njen nastanek in njene interakcije s snovjo.

V 2. poglavju bom opisala sevanje in njegove vire. Razložila bom razliko med ionizirajočim in neionizirajočim sevanjem, pri čemer bo večji poudarek na ionizirajočih sevanjih.

V 3. poglavju bom opisala kako nastane rentgenska svetloba (zavorno in karakteristično sevanje).

V 4. poglavju bom govorila o interakciji rentgenske svetlobe s snovjo, skozi katero prehaja. Opisala bom štiri najbolj značilne interakcije in sicer fotoefekt, Comptonov pojav, Rayleighovo sipanje in nastanek para.

V 5. poglavju bom govorila o količini sevanja, ki jo prejmemo v obdobju enega leta (efektivna doza) tako zaradi naravnega ozadja kot zaradi umetnih virov sevanja.

V 6. poglavju bom opisala zgradbo in delovanje klasičnega rentgenskega aparata, na katerem sem opravila meritve za eksperimentalni del diplomskega dela.

V 7. poglavju bom opisala potek eksperimentalnega dela (slikanje vzorcev s klasičnim rentgenskim aparatom, obdelava rentgenske slike z ImageJ programom) ter podala in razložila dobljene rezultate.

2. Kaj je sevanje

Sevanju smo izpostavljeni vsak trenutek, saj je del vsakdanjega življenja in narave. Naše telo je tako pravzaprav izpostavljeno različnim virom sevanja. Sevanje prihaja iz vesolja (kozmični žarki, sevanje sonca ...), iz zemeljske skorje (kamenine in minerali, topli vreli vode ...), mobilnih telefonov, televizijskih in računalniških ekranov, mikrovalovnih pečic.

Navsezadnje je vir sevanja tudi človek sam, saj oddaja toploto, nekaj sevanja pa oddaja tudi zaradi radioaktivnih snovi, ki se nabirajo v telesu. V kosteh se nabirata radioaktivna polonij in radij, v mišicah radioaktivna ogljik in kalij, v pljučih pa se zadržujejo radioaktivni žlahtni plini. Velika večina sevanj je torej naravnega izvora. Ta del sevanja imenujemo naravno ozadje. [2]

Nekaj sevanja, manjši del, pa je produkt človekove dejavnosti in razvoja tehnologije. Med te vrste sevanja spadajo rentgenski žarki, ki jih v medicini uporabljajo za diagnosticiranje različnih bolezni in poškodb, ter sevanje gama, ki se uporablja za zdravljenje rakavih obolenj. [3]

Zaradi nezadostnega poznavanja tematike, je razširjeno prepričanje, da so sevanja nevarna in škodljiva. Pa je to res?

2.1. Ionizirajoče in neionizirajoče sevanje

Fiziki sevanje opisujejo kot prenos energije v obliki toka delcev ali kot širjenje elektromagnetnega valovanja. Od energije delcev ali valovanja, ki ga vir oddaja, je odvisno, kakšen učinek ima sevanje na snov, skozi katero prehaja ali jo zadane na svoji poti.

Če je energija dovolj velika, sevanje pri prehodu skozi snov iz atomov izbije elektrone. V snovi se pojavijo ioni, zato tako sevanje imenujemo ionizirajoče sevanje. Sevanje, ki nima dovolj energije, da bi pri prehodu skozi snov atomom izbilo elektrone, imenujemo neionizirajoče sevanje. [2, 4]

Ker je elektromagnetno valovanje kvantizirano, energije z elektroni ne more izmenjevati zvezno. Prav tako elektroni iz elektromagnetnega valovanja ne morejo dobiti poljubne energije. Dobijo lahko samo določen obrok energije ali pa nič. Ta obrok energije imenujemo kvant elektromagnetnega valovanja ali foton. [5] Fotonu kot delcu pripišemo energijo in gibalno količino.

Foton ima energijo, ki je premo sorazmerna s frekvenco pripadajočega elektromagnetnega valovanja:

$$W = h \nu,$$

pri čemer je W energija fotona, h Planckova konstanta ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{Js}$) in ν frekvenca elektromagnetnega valovanja. [6]

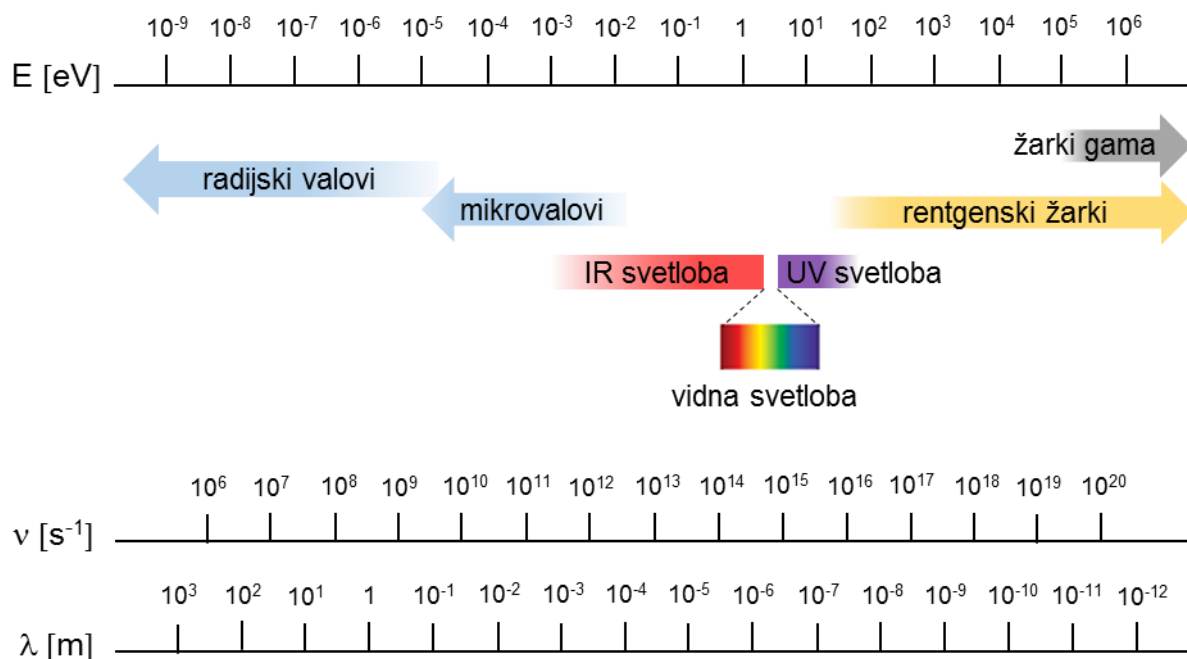
Kadar govorimo o valovanju, namesto energije raje uporabljamo pojma frekvenca ali valovna dolžina. Oba sta neposredno povezana z energijo, ki jo nosi valovanje oziroma fotoni. Višja frekvenca in krajša valovna dolžina sta značilni za sevanje, ki nosi veliko energije, to je ionizirajoče sevanje. Nižja frekvenca in daljša valovna dolžina pa sta značilni za sevanje, ki nosi manj energije, to je neionizirajoče sevanje. [2]

Frekvenca in valovna dolžina sta povezani:

$$c = \lambda \nu,$$

pri čemer je c svetlobna hitrost v vakuumu ($\approx 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$) in λ valovna dolžina. Če upoštevamo zvezo med frekvenco in valovno dolžino, lahko energijo fotona izračunamo tudi na ta način:

$$W = h \nu = \frac{h c}{\lambda}.$$



Slika 1: Spekter elektromagnetnega valovanja

Med neionizirajoča sevanja spadajo radijski valovi, mikrovalovi, infrardeči valovi in vidna svetloba. Energija, ki jo oddajajo, ni velika, zato človeku in njegovemu zdravju niso posebej nevarni. Med ionizirajoča sevanja spadajo ultravijolični žarki, rentgenski žarki in žarki gama. Energija, ki jo oddajajo je zelo velika, zato so človeku in njegovemu zdravju lahko škodljiva. V celicah lahko povzročijo nastanek ionov ali prostih radikalov, ki spremenijo obliko ali delovanje celice, kar lahko vodi do nastanka opeklin, poškodb ali mutacije celic in s tem tudi nastanka različnih rakavih obolenj. Vendar če imamo vire ionizirajočih sevanj pod nadzorom in jih previdno uporabljamo oziroma upoštevamo načela varnega ravnanja z njimi, se nam jih ni potrebno bati. Nasprotno, lahko jih uporabljamo v vsakdanjem življenju, predvsem v industriji in medicini. [2]

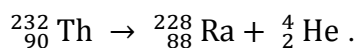
2.2. Vrste ionizirajočega sevanja

Nekatere snovi so radioaktivne. To pomeni, da so njihova atomska jedra nestabilna, zato se s časoma sama od sebe, brez zunanjih vplivov spreminjajo v bolj stabilna atomska jedra drugih snovi. Pri tem se sprošča sevanje, pojav pa imenujemo radioaktivni razpad.

Poznamo tri osnovne vrste radioaktivnih razpadov: razpad alfa, beta in gama. Pri razpadu alfa in beta nastanejo delci, pri razpadu gama pa elektromagnetno valovanje z zelo majhno valovno dolžino, kar pomeni, da ima zelo veliko energijo.

2.2.1. Sevanje alfa

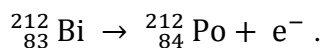
Pri sevanju alfa nestabilno jedro atoma odda delec alfa. To je v bistvu helijevo jedro, ki je zgrajeno iz dveh protonov p^+ in dveh nevtronov n^0 . [7] Tako se novonastalemu, bolj stabilnemu atomu zmanjša vrstno število za dva, masno število pa za štiri. Primer takega razpada je, ko jedro torija odda delec alfa in pri tem nastane jedro radija:



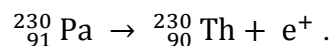
Delci alfa so pozitivno nabiti delci, ki so precej težki in se zato gibljejo relativno počasi. Niso zelo prodorni, saj v zraku prepotujejo dolžino le nekaj centimetrov, zaustavi pa jih že tanek list papirja ali povrhnjica kože, zato so živim bitjem nevarni le, če jih vnesemo v telo, zaužijemo ali vdihnemo. [8]

2.2.2. Sevanje beta

Pri sevanju beta nestabilno jedro atoma odda delec beta, ki nastane v jedru ob pretvorbi nevtrona v proton p^+ in elektron e^- (negativni razpad beta β^-). [7] Novonastalemu, bolj stabilnemu atomu se vrstno število poveča za ena, masno število pa ostane enako. Primer takega razpada je, ko jedro bizmuta odda delec beta (e^-) in pri tem nastane jedro polonija:



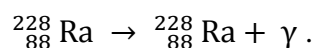
Pri pozitivnem razpadu beta β^+ pa se proton v jedru pretvori v nevtron n^0 in pozitron e^+ (antidelec elektrona), pri čemer se novonastalemu atomu vrstno število zmanjša za ena, masno število pa ostane enako. [7] Primer takega razpada je, ko jedro protaktinija odda delec beta (e^+) in pri tem nastane jedro torija:



Delci beta so bolj prodorni od delcev alfa, saj v zraku prepotujejo dolžino približno enega metra. Zaustavi jih nekaj milimetrov debela plast kovine, na primer svinca, bakra ali aluminija. So zelo lahki delci in se gibljejo skoraj s svetlobno hitrostjo. Tako kot delci alfa, so živim bitjem nevarni le, če jih vnesemo v telo. [8]

2.2.3. Sevanje gama

Sevanji alfa in beta skoraj vedno spremlja tudi sevanje gama, za katerega večkrat uporabljamo tudi izraz žarki gama. Pri sevanju gama nestabilno vzbujeno jedro atoma pri prehodu v stabilnejše stanje odda foton. Ker je foton nevtralen, vrstno in masno število atoma ostaneta enaka. [7, 9] Tak primer sevanja je tudi primer sevanja radija:



Sevanje gama ima veliko prodorno moč. Žarki gama se brez težav gibljejo skozi človeško telo, zaustavi jih šele več centimetrov debela plast svinca, betona ali vode. Zaradi svoje prodornosti so živim bitjem mnogo bolj nevarni kot alfa in beta delci. [8]

2.2.4. Rentgenska svetloba

Rentgenska svetloba je tako kot sevanje gama elektromagnetno valovanje z visoko energijo, ki ima veliko prodorno moč, le da ima rentgenska svetloba manjšo energijo in večjo valovno dolžino kot sevanje gama. Njen nastanek bom bolj podrobno opisala v naslednjem poglavju.

Velik problem pri vseh omenjenih sevanjih predstavlja dejstvo, da nobene od teh vrst sevanja, kadar smo mu izpostavljeni, ne občutimo, zato dobimo lažni občutek, da ni nevarno.

3. Rentgenska svetloba

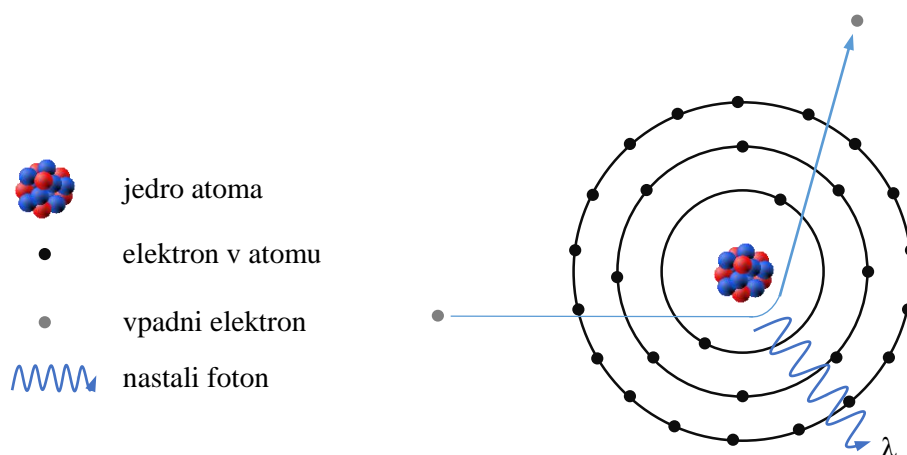
Rentgensko svetlobo lahko dobimo na dva načina. Pri upočasnevanju pospešenih elektronov v bližini jeder, kar imenujemo zavorno sevanje ali pri prehodih med energijskimi stanji elektronov v elektronski ovojnici, kar imenujemo značilno ali karakteristično sevanje.

Rentgenska svetloba nastane v rentgenski cevi, ko zaradi termične emisije iz katode izhajajo elektroni, ki jih električno polje med katodo in anodo pospeši. Tik pred trkom z anodo, elektroni pridobijo maksimalno kinetično energijo:

$$W_{k\max} = e_o U ,$$

pri čemer je e_o naboj elektrona ($1,6 \cdot 10^{-19}$ As) in U napetost med elektrodama.

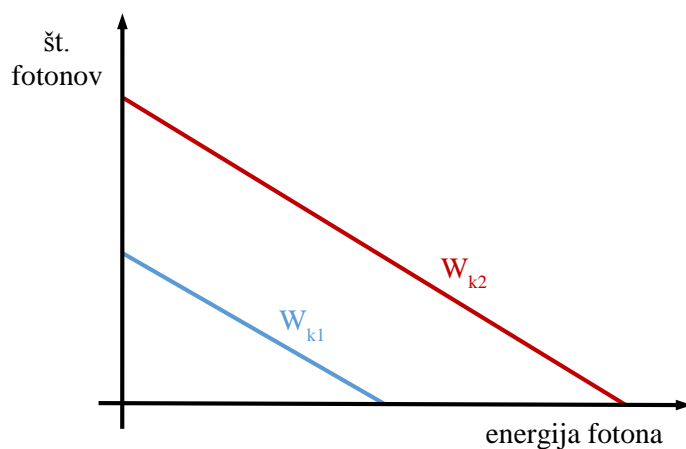
Ob trku elektronov z anodo se njihova kinetična energija spremeni v druge oblike energije. Večina se je spremeni v toploto, manjši del pa v rentgensko svetlobo. Ko pride elektron v bližino jedra atoma anode, se mu zaradi elektromagnetne privlačne sile jedra spremeni smer gibanja ter zmanjša hitrost oziroma kinetična energija. Pri tem nastane foton. Njegova energija je enaka razliki kinetičnih energij pospešenega elektrona pred zaviranjem in po njem, pri čemer pa maksimalna energija fotona ne more biti večja od kinetične energije pospešenega elektrona. Ta pojav imenujemo zavorno sevanje. [4, 5]



Slika 2: Zavorno sevanje

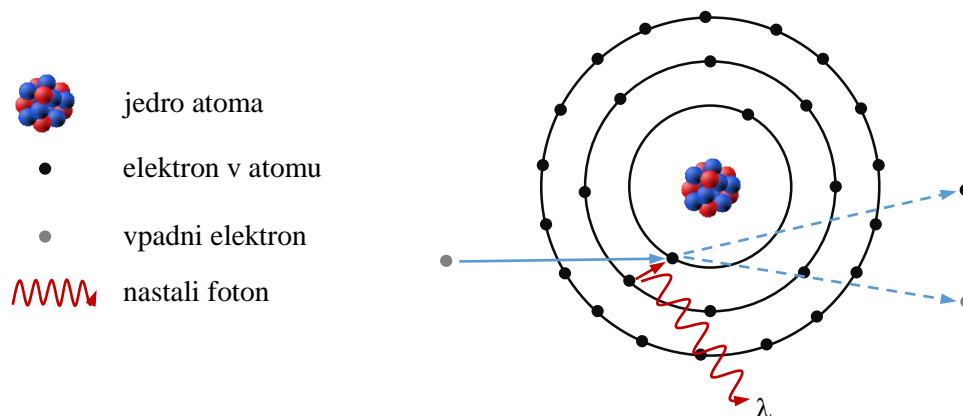
Verjetnost, da se kinetična energija pospešenih elektronov spremeni v rentgensko svetlobo, je večja pri visokih energijah pospešenih elektronov in večjem vrstnem številu snovi, iz katere je anoda.

Pri pospešenih elektronih s kinetično energijo 100 keV, ki priletijo v anodo iz volframa, se manj kot 1 % njihove energije spremeni v rentgensko svetlobo, pri pospešenih elektronih s kinetično energijo 6 MeV pa 54 %. Preostanek energije se spremeni v toploto. [4]



Slika 3: Spekter rentgenske svetlobe pri nižji W_{k1} in višji W_{k2} kinetični energiji [4]

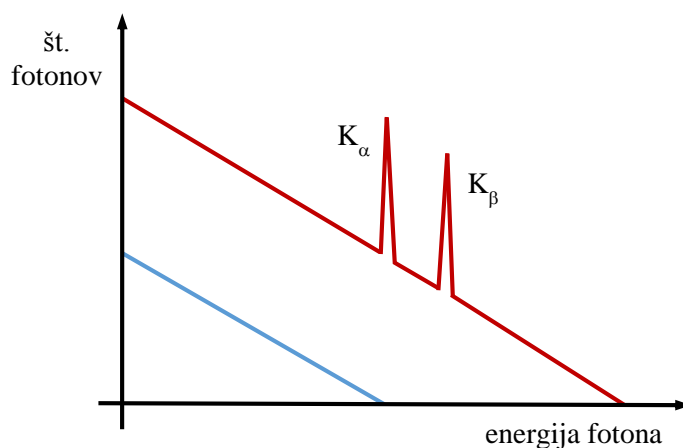
Če je kinetična energija pospešenih elektronov dovolj velika, lahko pospešeni elektron iz atoma v anodi izbije elektron, ki se nahaja v eni izmed notranjih lupin tega atoma. To se zgodi le, če ima pospešeni elektron kinetično energijo, ki je večja od vezavne energije elektrona v atomu. Atom z nezasedeno lupino je v energijsko nestabilnem stanju, zato želijo elektroni iz zunanjih lupin zasesti izpraznjeno mesto. Ko elektron zasede izpraznjeno mesto, preide iz višjega v nižje energijsko stanje. Pri tem nastane foton. Njegova energija je enaka razliki energij začetnega in končnega stanja elektrona, ki je zasedel izpraznjeno mesto. Ta pojav imenujemo značilno ali karakteristično sevanje. [4]



Slika 4: Karakteristično sevanje

Verjetnost, da nastane večje število karakterističnih fotonov, je večja pri visokih energijah pospešenih elektronov, ki so malenkost večje od vezavnih energij elektronov v atomih anode. Prehodi elektronov iz ene lupine v drugo so različno verjetni. Najverjetnejši so prehodi med sosednjimi lupinami.

Pri pospešenih elektronih s kinetično energijo 80 keV, ki priletijo v anodo iz volframa, je približno 5 % fotonov, ki nastanejo karakterističnih, pri pospešenih elektronih s kinetično energijo 100 keV pa 10 %. Preostali fotoni nastanejo z zavornim sevanjem. [4]



Slika 5: Spekter rentgenske svetlobe pri nižji in višji kinetični energiji vpadnih elektronov, pri čemer je višja energija dovolj visoka, da se pojavi karakteristično sevanje [4]

Spekter zavornega sevanja je zvezen, saj so v njem zastopane energije vseh fotonov, od nič pa do maksimalne energije. Pri spektru karakterističnega sevanja pa se pojavijo tudi spektralne črte. Njihove valovne dolžine so značilne oziroma karakteristične za posamezen element, iz katerega je anoda. Najizrazitejše so črte K_{α} , ki ustrezajo prehodu elektrona iz 2. lupine (energijskega nivoja) v 1. lupino, črte K_{β} pa ustrezajo prehodu elektrona iz 3. lupine v 1. lupino. [5]

Približno valovno dolžino črte K_{α} lahko izračunamo po Moseleyevem zakonu:

$$\lambda_{K\alpha} = \frac{\lambda_o}{(Z-1)^2},$$

pri čemer je $\lambda_{K\alpha}$ valovna dolžina črte K_{α} , Z vrstno število elementa in λ_o valovna dolžina 1. karakteristične črte v vodikovem spektru (21,6 nm).

4. Kako fotoni reagirajo s snovjo

Snop rentgenske svetlobe pri prehodu skozi snov zaradi različnih interakcij z gradniki v snovi oslabi ali atenuira. Oslabitev ali atenuacija je posledica absorpcije in sipanja fotonov rentgenske svetlobe.

Pri absorpciji se energija fotona spremeni v drugo obliko energije. Pri sipanju pa se fotonu spremeni smer gibanja, pri čemer lahko pride do prenosa energije. [4]

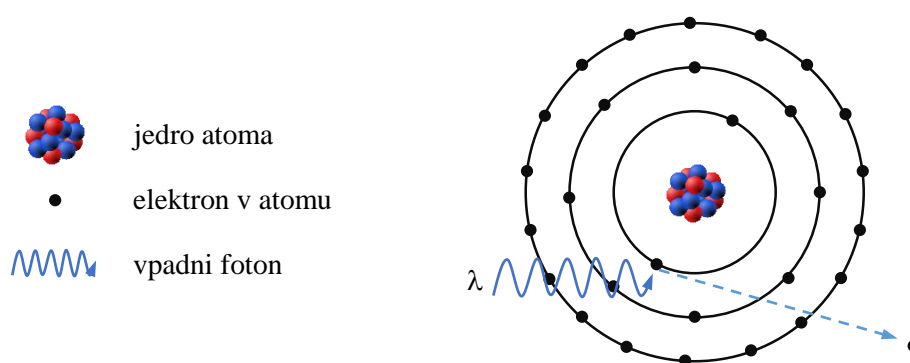
Znane so predvsem naslednje interakcije fotonov s snovjo: fotoefekt, Comptonov pojav, Rayleighovo sipanje in nastanek para.

4.1. Fotoefekt

Fotoefekt je pojav, pri katerem fotoni z dovolj energije iz snovi izbijejo elektrone. Fotoni vidne in ultravijolične svetlobe, ki imajo manjšo energijo kot fotoni rentgenske svetlobe,

izbijejo elektrone iz zunanjih lupin atoma. Fotoni rentgenske svetlobe pa imajo dovolj energije, da izbijejo elektrone iz notranjih lupin atoma.

Foton rentgenske svetlobe trči z elektronom, ki se nahaja v eni izmed notranjih lupin atoma. Elektron absorbira vso energijo fotona in zapusti atom. Pride do ionizacije atoma. Kinetična energija elektrona, ki je zapustil atom, je enaka razliki med energijo vpadnega fotona in vezavno energijo elektrona v nivoju lupine iz katere je bil izbit elektron. [4]



Slika 6: Fotoefekt

4.2. Comptonov pojav

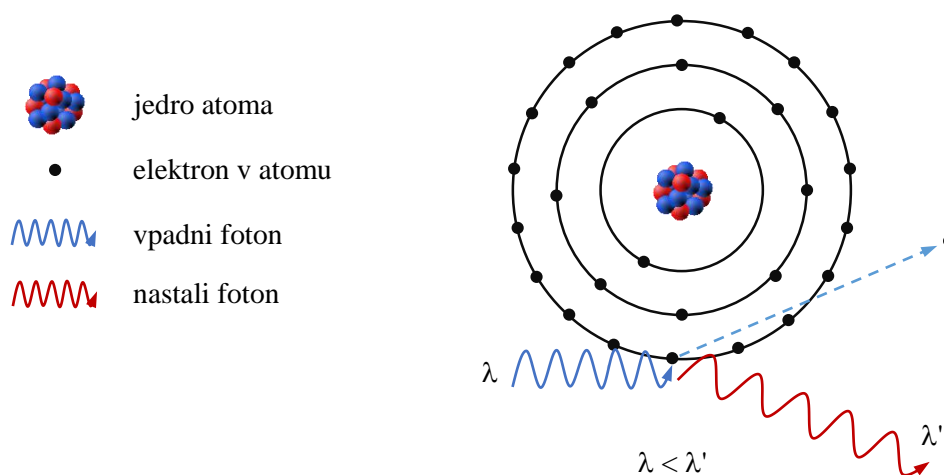
Comptonov pojav imenovan tudi Comptonovo sipanje, je pojav, pri katerem fotoni reagirajo s šibko vezanimi zunanjimi ali valenčnimi elektroni v atomu.

Foton rentgenske svetlobe trči z zunanjim elektronom atoma. Elektron absorbira foton. Takoj zatem elektron odda nov foton, ki ima nekoliko nižjo energijo in večjo valovno dolžino kot vpadni foton. Novonastali foton ima tudi spremenjeno smer gibanja glede na vpadni foton. Pri tem zunanji elektron zapusti atom, tako da pride do ionizacije atoma. Energija vpadnega fotona se torej porazdeli med novo nastali foton in izbiti zunanji elektron, pri čemer večji del energije prevzame novonastali foton. [4, 5]

Pojav lahko obravnavamo kot elastični trk fotona in prostega elektrona. Od tod dobimo naslednjo zvezo:

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta),$$

pri čemer je λ' valovna dolžina novonastalega fotona, λ valovna dolžina vpadnega fotona, λ_c Comptonova valovna dolžina elektrona (0,0024 nm) in θ kot, za katerega se spremeni smer fotona.



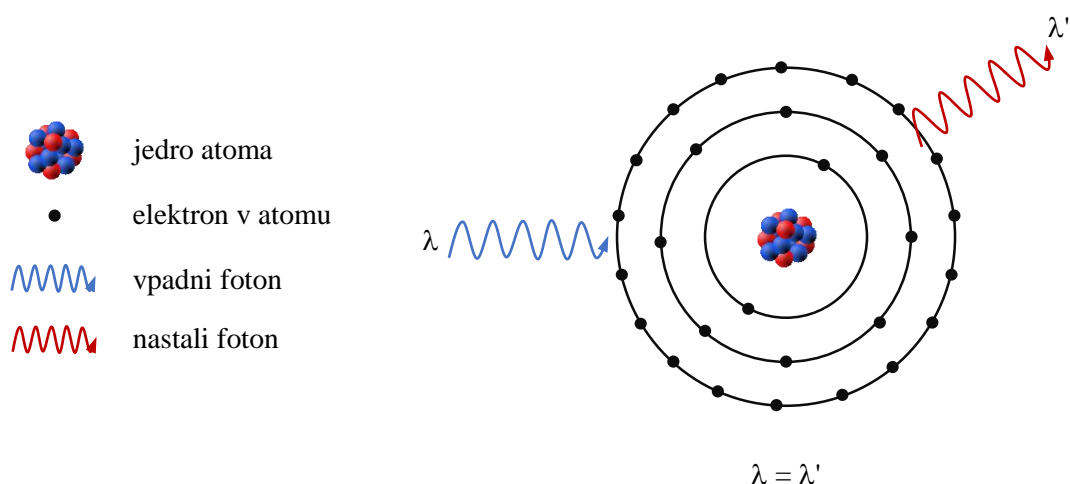
Slika 7: Comptonov pojav

4.3. Rayleighovo sipanje

Rayleighovo sipanje je pojav, pri katerem fotoni sodelujejo z elektroni, vezanimi v atomu.

Foton rentgenske svetlobe preda energijo elektronu v elektronski ovojnici atoma. S tem atom vzbudi v višje energijsko stanje, ki pa je nestabilno. Zato se atom po krajšem času zopet vrne v osnovno stabilnejše stanje. Pri tem odda foton, ki ima enako energijo kot vpadni foton, le smer njegovega gibanja se malce spremeni. [4]

Rayleighovo sipanje je podoben pojav kot fotoefekt. Razlika je le v tem, da pri Rayleighovem sipanju elektron ne zapusti atoma. Atom na koncu ostane v istem stanju kot je bil pred trkom fotona, pri čemer se ohrani tudi energija fotona.

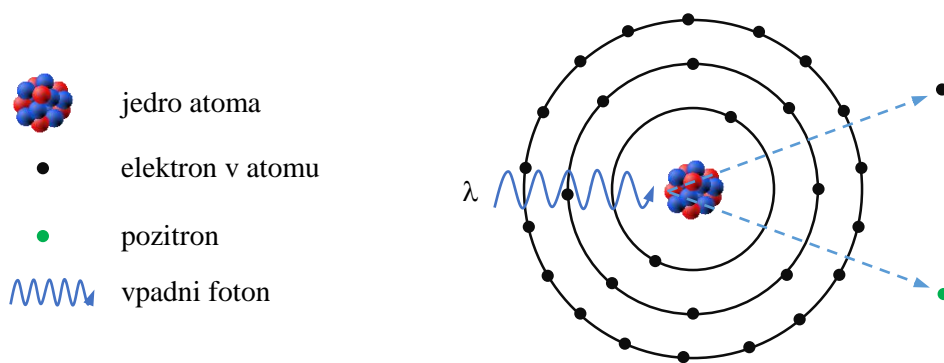


Slika 8: Rayleighovo sipanje

4.4. Nastanek para

Nastanek para je pojav, pri katerem fotoni interagirajo z atomskim jedrom in pri tem nastane par elektron – pozitron.

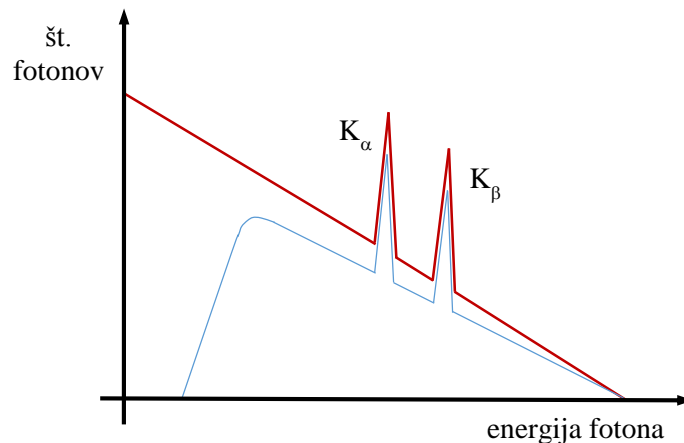
Interakcija, pri kateri v bližini jedra nastane par elektron – pozitron, je možna le pri dovolj visoki energiji fotona rentgenske svetlobe. Ker imata tako elektron kot pozitron mirovno energijo 0,51 MeV, mora za nastanek para elektron – pozitron, energija fotona presegati vsoto njunih mirovnih energij: 1,02 MeV. Kadar je energija fotona večja od 1,02 MeV, pa par elektron – pozitron preostalo energijo prevzame kot kinetično energijo. [6]



Slika 9: Nastanek para

4.5. Oslabitev ali atenuacija toka fotonov

Pri prehajanju rentgenske svetlobe skozi snov število fotonov upada. Večja je debelina snovi, več fotonov bo snov absorbirala, kar pomeni, da bo iz snovi izstopilo manjše število fotonov. Ta pojav imenujemo oslabitev ali atenuacija toka fotonov.



Slika 10: Spekter rentgenske svetlobe ob njenem nastanku (rdeča črta) [4]

Fotoni, ki nastanejo ob zavornem in karakterističnem sevanju, imajo energijo enakomerno porazdeljeno med nič in maksimalno kinetično energijo $W_{k \max}$. Pri prehodu skozi snov vsi fotoni zaradi oslabitve ali atenuacije izgubijo nekaj svoje energije. Ker fotone rentgenske svetlobe z majhno energijo zaustavi že tanka plast snovi, skozi snov izstopijo večinoma le fotoni z večjo energijo. To pomeni, da pri prehodu skozi snov oslabi predvsem tok nizkoenergijskih fotonov. [4]

Intenziteta prepuščenih fotonov skozi snov je manjša od intenzitete vpadnih fotonov. Intenziteta prepuščenih fotonov je odvisna od vrste in debeline snovi, skozi katero potujejo, ter od valovne dolžine rentgenske svetlobe. V odvisnosti od debeline snovi eksponentno pojema. To opišemo z enačbo:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

pri čemer je I intenziteta prepuščenih fotonov, I_0 intenziteta vpadnih fotonov, μ absorpcijski ali atenuacijski koeficient in x debelina snovi.

Pri rentgenski svetlobi namesto absorpcijskega koeficienta uporabljamo masni absorpcijski koeficient, zato zgornjo enačbo zapišemo v naslednji obliki:

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho) x \rho},$$

pri čemer je ρ gostota snovi in μ/ρ masni absorpcijski koeficient.

5. Količina sevanja v vsakdanjem življenju

Tveganje, ki ga sevanje predstavlja za neko živo bitje, ni odvisno le od prejete količine sevanja, temveč je odvisno tudi od tega, za katero vrsto sevanja gre, v kolikšnem času je telo prejelo sevanje in kateri organi oziroma tkiva so bila izpostavljena sevanju. V uporabi so naslednje količine za opisovanje učinkov sevanja na telo človeka: absorbirana, ekvivalentna in efektivna doza.

Absorbirana doza nam pove količino energije oziroma sevanja, ki jo absorbira 1 kilogram snovi. Enota za absorbirano dozo je 1 Gy (gray): $1\text{Gy} = 1\text{ J/kg}$.

Ekvivalentna doza poleg absorbirane količine sevanja upošteva še različne biološke učinke posameznih vrst sevanja. Zato se vpelje utežni faktor sevanja w_R za različne vrste sevanja, s katerim nato množimo absorbirano dozo. Bolj je učinek sevanja škodljiv za živo bitje, večji je utežni faktor sevanja. Največji utežni faktor sevanja imajo alfa delci ($w_R = 20$), najmanjšega pa rentgenska svetloba in gama žarki ($w_R = 1$). Enota za ekvivalentno dozo je 1 Sv (sievert). [2]

Ekvivalentno dozo se izračuna po naslednji enačbi:

$$H_T = D_T w_R,$$

pri čemer je H_T ekvivalentna doza, D_T absorbirana doza in w_R utežni faktor sevanja.

Efektivna doza poleg absorbirane količine sevanja in različnih bioloških učinkov posameznih vrst sevanja upošteva še različno občutljivost posameznih organov ali tkiva na sevanje. Lahko rečemo tudi, da upošteva dovzetnost posameznega organa ali tkiva za razvoj rakavega obolenja. Efektivna doza je vsota ekvivalentnih doz posameznih organov ali tkiv pomnoženih z ustreznim utežnim tkivnim faktorjem w_T . Večja je verjetnost za nastanek rakavega obolenja, večji je utežni tkivni faktor. Največji utežni tkivni faktor imajo spolne žleze ($w_T = 0,20$), najmanjšega pa koža ($w_T = 0,01$). Enota za efektivno dozo je 1 Sv (sievert). [2]

Efektivno dozo se izračuna po naslednji enačbi:

$$E = \sum H_T w_T ,$$

pri čemer je E efektivna doza in w_T tkivni utežni faktor.

Največje doze, ki jih lahko posameznik prejme v roku enega leta, če pri tem ne upoštevamo sevanja zaradi naravnega ozadja, so določene z Uredbo o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih, ki je stopila v veljavo aprila 2004. Uredba določa, da je mejna efektivna doza za posameznika iz prebivalstva 1 mSv na leto (10. člen), za izpostavljene delavce pa 20 mSv na leto (6. člen), pri čemer se upošteva le izpostavljenost ionizirajočim sevanjem, ki so posledica izvajanja sevalnih dejavnosti. [10]

Letni prispevek sevanja zaradi naravnega ozadja v svetu ni povsod enak, temveč se razlikuje glede na zemljepisno širino (na zemeljskih polih je sevanje večje kot na ekvatorju) in nadmorsko višino (sevanje z nadmorsko višino narašča). V večji meri je odvisen tudi od zgradbe zemeljske skorje, saj različne kamenine in prsti vsebujejo različne radioaktivne elemente. V Sloveniji povprečni letni prispevek naravnega ozadja znaša 2,4 mSv.

Največji delež sevanja k naravnemu ozadju prispeva žlahtni plin radon, ki je razširjen po vsej zemeljski skorji, nahaja pa se tudi v materialu, iz katerega so zgrajena naša bivališča. Večkrat se zadržuje v zaprtih prostorih kot so rudniki in različne zgradbe. K naravnemu ozadju nekaj prispeva tudi kozmično sevanje, ki prihaja k nam iz vesolja. Prav tako pa v

naše telo vnašamo radioaktivne elemente s hrano in pijačo. Vsi ti naštet dejavniki prispevajo od 85 do 90 % sevanja k naravnemu ozadju. Od 10 do 15 % prispevata še medicina in nuklearna industrija. [8] Sevanju zaradi naravnega ozadja se nikakor ne moremo izogniti, lahko pa se odrečemo kakšni škodljivi navadi kot je na primer kajenje, saj je iz tabele 1 razvidno, da kadilec, ki na dan pokadi eno škatlico cigaret, k svojemu povprečnemu letnemu prispevku naravnega ozadja doda kar 10 mSv.

	Prejeta doza
vsak dan pokadim 1 zavitek cigaret	10 mSv/leto
vsak dan gledam televizijo	0,01 mSv/leto
vsak dan delam z računalnikom	0,01 mSv/leto
vsak dan delim posteljo z odraslo osebo	0,01 mSv/leto
astronavt na vesoljski postaji	150 mSv/leto
polet z letalom na višini 15 km	10 μ Sv/uro
polet z letalom na višini 10 km	5 μ Sv/uro
pregled z letališkim skenerjem	5 μ Sv
slikanje prsnega koša s CT-jem	7 mSv
mamografija	0,4 mSv
slikanje prsnega koša	0,1 mSv
slikanje okončin in sklepov	0,06 mSv
slikanje zob	0,01 mSv

Tabela 1: Doze, ki jih lahko prejmemo v vsakdanjem življenju poleg naravnega ozadja
[2, 8, 11]

Kot zanimivost naj še dodam, da je letni prispevek jedrske elektrarne Krško le 0,01 mSv in je že všteti v naravno ozadje za Slovenijo. Celotni prispevek zaradi jedrske nesreče v Černobilu, ki se je zgodila pred tridesetimi leti, znaša 0,72 mSv, celotni prispevek vseh dosedanjih jedrskih poskusov po svetu pa 7,2 mSv. [12]

6. Rentgenski aparat

Rentgenski aparat je zgrajen iz vira rentgenske svetlobe, premične preiskovalne mize, sprejemnika in generatorja.



Slika 11: Klasični rentgenski aparat

Vir rentgenske svetlobe oddaja rentgensko svetlobo, ki se jo usmeri na preiskovanca. Preiskovanec sedi, leži ali pa se naslanja na preiskovalno mizo. Preiskovalna miza je premična, zato da omogoča lažje nameščanje preiskovanca. Sprejemnik zaznava rentgensko svetlobo, ki prodre skozi preiskovanca. Generator pa je namenjen električnemu napajanju rentgenskega aparata in nastavljanju vrednosti izhodnih parametrov aparata (napetost, jakost električnega toka in ekspozicijski čas). [4]

6.1. Rentgenska cev

6.1.1. Zgradba rentgenske cevi

Vir rentgenske svetlobe je rentgenska cev. Rentgenska cev je steklena ali kovinska vakuumska posoda, v kateri sta nameščeni dve elektrodi. Vstavljena je v kovinsko ohišje, ki je napolnjeno z oljem. Ker se nastali fotoni širijo v vse smeri, je v ohišju nameščena svinčena plast, ki medicinsko osebje in preiskovanca varuje pred nepotrebnim sevanjem. V svinčeni plasti je odprtina, skozi katero prehajajo fotoni, ki so usmerjeni proti preiskovancu oziroma delu preiskovanca in nato naprej proti sprejemniku. Olje v kovinskem ohišju je namenjeno hlajenju rentgenske cevi. [4]



Slika 12: Rentgenska cev [13]

6.1.2. Delovanje rentgenske cevi

V rentgenski cevi sta nameščeni dve elektrodi: na katodo je priključen negativni in na anodo pozitivni pol enosmerne napetosti.

Katoda je v spiralo zvita žica, ki je ponavadi iz volframa. Skozi njo teče električni tok, ki jo segreje na temperaturo okoli 2000 °C. Zaradi termične emisije iz nje izhajajo elektroni. Katoda torej služi kot vir elektronov. Negativno naelektrena vdolbina poskrbi, da se elektroni ne razpršijo naokoli po rentgenski cevi, temveč se zberejo v snop in usmerijo proti anodi.

Med anodo in katodo je priključena visoka enosmerna napetost od 10 kV do 200 kV. Pospešeni elektroni z veliko hitrostjo zadenejo anodo in se v njej ustavijo. Pri tem se sprosti veliko toplote, zato mora biti anoda iz materiala, ki ima visoko tališče, da se ne začne taliti. Anoda je prav tako kot katoda ponavadi iz volframa, saj ima ta tališče pri 3422 °C. Pri mamografiji se uporabljajo tudi anode iz molibdena, ki ima tališče pri 2623 °C, ali rodija, ki ima tališče pri 1964 °C. Ker previsoka temperatura lahko povzroči poškodbe rentgenske cevi, je le ta obdana z oljno kopeljo, katere funkcija je hlajenje rentgenske cevi oziroma celotnega sistema.

V rentgenografiji se večinoma uporabljajo vrteče anode (okrogla ploskev z nagnjenim robom), saj z vrtenjem dosežejo, da elektroni zadevajo cel kolobar, tako da se toplota porazdeli po celotni površini, nagnjeni rob anode pa usmeri rentgensko sevanje v željeno smer. [4]

6.2. Filtri

Rentgenska svetloba po prehodu iz rentgenske cevi vsebuje fotone tako z nizko kot z visoko energijo. Ker se fotoni z nizko energijo, ko prehajajo skozi preiskovanca, absorbirajo že v zgornjih plasteh tkiva in zato ne dosežejo sprejemnika slike, jih je potrebno zaustaviti ali vsaj zmanjšati njihovo število. Delež fotonov z nizko energijo je potrebno zmanjšati zato, ker le povečujejo dozo, ki jo preiskovanec prejme, ničesar pa ne prispevajo h kakovosti slike.

To naredimo s filtri, ki se jih namesti med rentgensko cevjo in preiskovanca. Najpogosteje se uporabljajo filtri iz aluminija ali bakra, lahko pa tudi kombinacija obeh.

S filtriranjem tako v rentgenskem snopu povečamo delež fotonov z visoko energijo, ki so potrebni za nastanek slike. Ker s filtriranjem oslabimo tudi tok fotonov z visoko energijo, je potrebno to pomanjkljivost navadno nadomestiti s podaljšanjem ekspozicijskega časa. Kljub temu je preiskovanec izpostavljen manjši dozi, kot če filtra ne bi uporabili. [14]

6.3. Sprejemnik

Sprejemnik je namenjen zaznavanju prepuščene rentgenske svetlobe skozi preiskovanca. Je medij, v katerem nastane slika.

Ko homogeni rentgenski snop zadane preiskovanca, pride v njem do različnih oslabitev, saj različna tkiva rentgensko svetlobo različno oslabijo. To je odvisno od njihove zgradbe, gostote in debeline tkiva v smeri razširjanja rentgenskega snopa. Po izstopu iz preiskovanca rentgenski snop zaradi različnih oslabitev ni več homogen, temveč ima različne jakosti. Prav te različne jakosti pa nosijo informacije o tem, kako je preiskovanec zgrajen. Sprejemnik tako rentgensko svetlobo zazna in jo pretvori v signal.

Sprejemniki so lahko analogni ali digitalni. Med analogne sprejemnike spadajo rentgenski filmi, ki pa jih zelo hitro zamenjujejo digitalni sprejemniki. Digitalne sprejemnike delimo na slikovne plošče, neposredne digitalne sprejemnike in posredne digitalne sprejemnike.

Neposredni digitalni sprejemniki rentgensko svetlobo neposredno pretvorijo v električni signal in ga digitalizirajo. Posredni digitalni sprejemniki pa rentgensko svetlobo najprej spremenijo v vidno svetlobo in nato vidno svetlobo spremenijo v električni signal, ki ga digitalizirajo. [4]

6.3.1. Slikovne plošče

Slikovne plošče so vmesni člen med analogno in digitalno rentgenografijo. Plošča je analogni sprejemnik. Po odčitavanju latentne slike pa se analogni signal shrani in digitalizira.

Ko rentgenska svetloba pride skozi preiskovanca, reagira s fotoluminiscenčno aktivno snovjo slikovne plošče, tako da nastane latentna slika. Latentno sliko tvorijo vzbujeni elektroni, ki se ujamejo v pasti v snovi. Pri slikovnih ploščah se za aktivne snovi danes večinoma uporabljajo snovi iz družine barijevih fluorohalidov, ker je latentna slika pri teh snoveh precej obstojna: od nekaj ur, pa tudi do nekaj tednov.

Sledi odčitavanje latentne slike v čitalniku, kjer se laserski žarek sistematično premika preko slikovne plošče. Ko laserski žarek zadane vzbujene elektrone ujete v pasteh, se ti iz

vzbujenih stanj vrnejo nazaj v osnovna stanja. Pri tem se izseva vidna svetloba, ki jo izmeri fotopomnoževalka. Te informacije se nato shranijo in digitalizirajo.

Na koncu čitalnik še izbriše latentno sliko s slikovne plošče tako, da jo osvetli z močnim virom svetlobe. Po brisanju je plošča zopet pripravljena za nadaljnjo uporabo. [4]



Slika 13: Slikovna plošča



Slika 14: Čitalnik slike

6.4. Generator

Omrežna napetost v Sloveniji (izmenična, 230 V) ni primerna za delovanje rentgenskega aparata, zato transformator v generatorju rentgenskega aparata napetost najprej ustrezno spremeni (poveča ali zmanjša), nato pa še usmeri. Generator rentgenskega aparata je zgrajen iz dveh transformatorjev.

Eden spreminja izmenično omrežno napetost v nizko enosmerno napetost, okoli 10 V, ki je potrebna za segretje katodne spirale. Drugi pa spreminja izmenično omrežno napetost v visoko enosmerno napetost, več 10 kV, ki usmerja elektrone v anodo in jih tudi pospeši.

Generator omogoča tudi nastavitve izhodnih parametrov aparata: napetost med katodo in anodo, ki jo podajamo v kilovoltih (kV), jakost toka, ki segreva katodo in ga podajamo v miliamperih (mA), ter ekspozicijski čas, ki ga podajamo v milisekundah (ms). Ekspozicijski čas je čas delovanja rentgenske cevi. V radiografiji namesto jakosti toka in ekspozicijskega časa uporabljajo kar parameter, ki je produkt jakosti toka in ekspozicijskega časa, in ga podajamo v miliamper sekundah (mAs). [4]

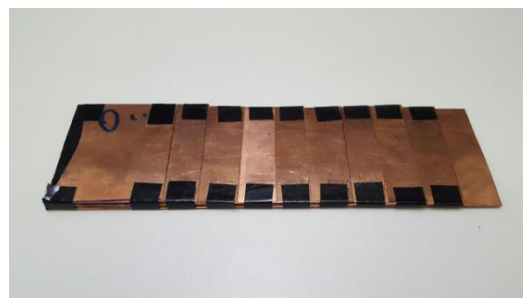
7. Eksperimentalni del

Eksperimentalni del diplomskega dela sem s pomočjo radiološkega inženirja - dozimetrista izvajala na skeletni diagnostiki na Kliničnem inštitutu za radiologijo, ki se nahaja v Univerzitetnem kliničnem centru Ljubljana.

Želela sem preveriti, kako je prehajanje rentgenske svetlobe skozi snov odvisno od njene gostote in debeline. Uporabila sem dva vzorca. Prvi je bil aluminij, katerega vrstno število je 13 in gostota $2,7 \text{ g/cm}^3$. Drugi je bil baker, katerega vrstno število je 29 in gostota $8,9 \text{ g/cm}^3$. Vzorca sta bila stopničaste oblike, tako da je bilo preverjanje prehajanja rentgenske svetlobe skozi različne debeline snovi olajšano v smislu, da nisem potrebovala večjega števila vzorcev. Pri vzorcu aluminija je vsaka stopnička visoka 0,3 cm (14 stopničk: najnižja debeline 0,3 cm in najvišja 4,2 cm), pri vzorcu bakra pa 0,3 mm (10 stopničk: najnižja debeline 0,3 mm in najvišja 3,0 mm).



Slika 15: Vzorec aluminija



Slika 16: Vzorec bakra

Vzorke smo slikali na klasičnem rentgenskem aparatu znamke Siemens (slika 11). Razdalja med rentgensko cevjo in preiskovalno mizo, na katero sem polagala vzorce je bila 1 m. Za sprejemnik slike smo uporabili CR ploščo znamke Agfa, velikosti 35 x 45 cm (slika 13).

Da bi preverila, če na prehajanje rentgenske svetlobe skozi snov vpliva tudi napetost med katodo in anodo v rentgenski cevi, ki pospešuje elektrone, ki sodelujejo pri nastanku rentgenske svetlobe, smo vzorca slikali pri treh različnih napetostih (40 kV, 60 kV in 81 kV), ter enaki jakosti električnega toka in ekspozicijskega časa (4 mAs).

Ko so bile rentgenske slike narejene, sem jih obdelala s programom ImageJ, ki je javno dostopen na internetnem omrežju. S programom sem izmerila intenziteto prepuščene rentgenske svetlobe skozi različne debeline posameznega vzorca. Za vsak vzorec sem nato pri različnih napetostih narisala graf intenzitete prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline vzorca.

Masni absorpcijski koeficient je osnovna količina, ki se uporablja pri izračunih prehajanja rentgenske svetlobe skozi različne snovi, zato sem želela primerjati podatke svojih merjenj s podatki, ki sem jih našla na internetni strani ameriškega inštituta NIST (National Institute of Standards and Technology).

Energija [keV]	μ/ρ aluminija [cm^2/g]	μ/ρ bakra [cm^2/g]
10	26,23	215,9
15	7,955	74,05
20	3,441	33,79
30	1,128	10,92
40	0,569	4,862
50	0,368	2,613
60	0,278	1,593
80	0,202	0,763
100	0,170	0,458
150	0,138	0,222
200	0,122	0,156
300	0,104	0,112

Tabela 2: Masni absorpcijski koeficient za aluminij in baker pri različnih energijah [15, 16]

Da bi narisala graf, iz katerega bi lahko razbrali masni absorpcijski koeficient za posamezni vzorec pri različnih napetostih, je bilo potrebno intenziteto prepuščene rentgenske svetlobe še logaritmirati.

Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe pojema eksponentno z debelino snovi:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-(\mu/\rho) \cdot \rho \cdot x}.$$

Če enačbo logaritmiramo, dobimo premico, katere tangens naklonskega kota je μ :

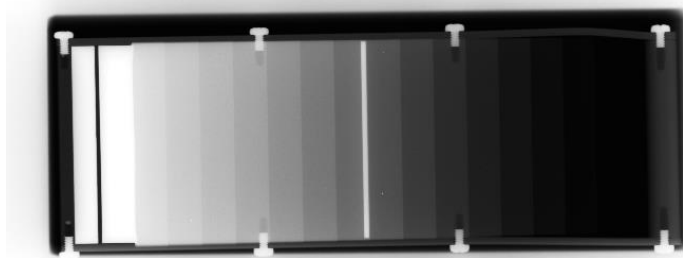
$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu x.$$

Da bi bil graf res linearen, sem pri intenziteti prepuščene rentgenske svetlobe uporabila še korekcijski faktor za linearizacijo intenzitete [17]:

$$J = \left(\frac{282}{282 - I} \right)^{1,16} I.$$

7.1. Slikanje vzorca aluminija

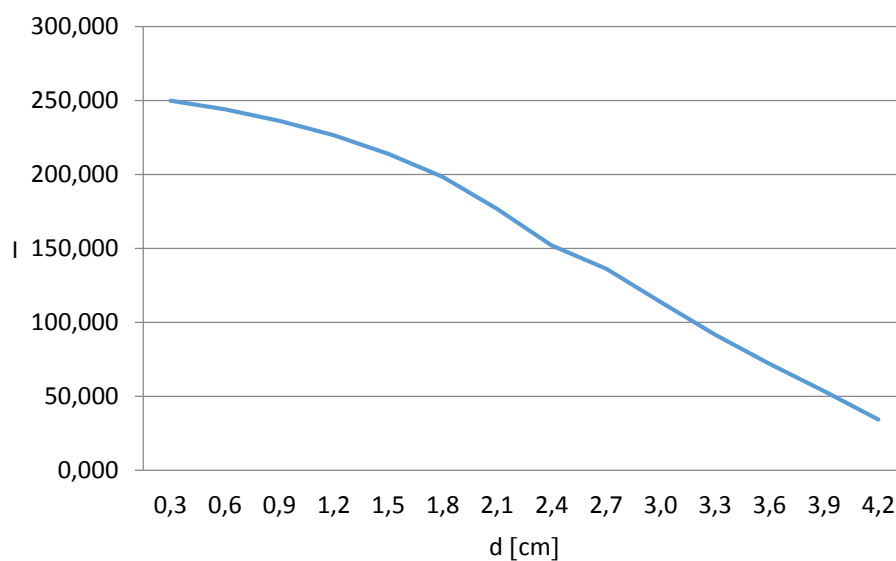
7.1.1. Napetost na rentgenski cevi $U = 81$ kV, produkt električnega toka in ekspozicijskega časa $I_{et} = 4$ mAs



Slika 17: Rentgenska slika vzorca aluminija pri pogojih 81 kV in 4 mAs

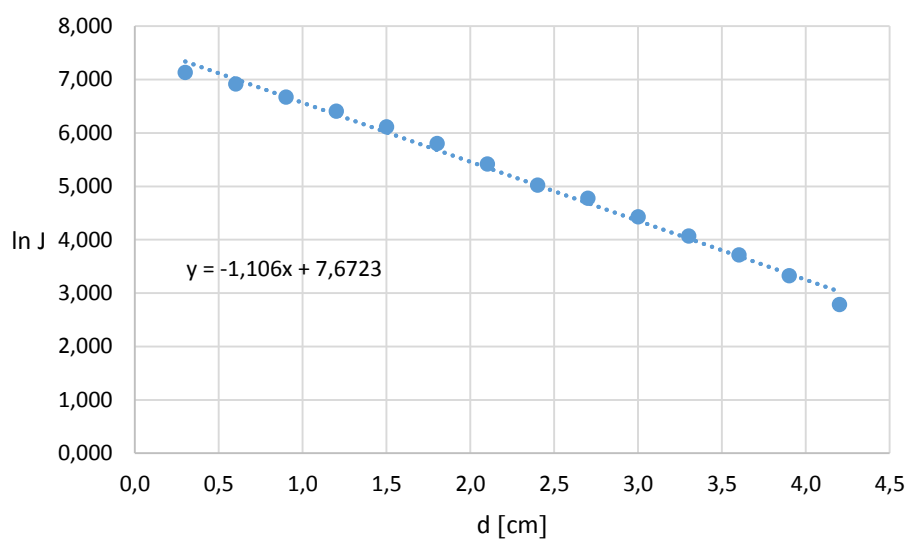
d [cm]	I	ln J
0,3	249,797	7,135
0,6	243,935	6,917
0,9	236,320	6,674
1,2	226,469	6,405
1,5	213,884	6,111
1,8	198,479	5,799
2,1	176,782	5,416
2,4	152,082	5,021
2,7	136,182	4,776
3,0	113,710	4,430
3,3	91,593	4,070
3,6	72,000	3,716
3,9	53,541	3,322
4,2	34,291	2,783

Tabela 3: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca aluminija pri pogojih 81 kV in 4 mAs



Slika 18: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 81 kV in 4 mAs

Iz slike 18 je razvidno, da se intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe pri vzorcu iz aluminija ter pogojih 81 kV in 4 mAs z enakomernim večanjem debeline snovi približno enakomerno zmanjšuje.



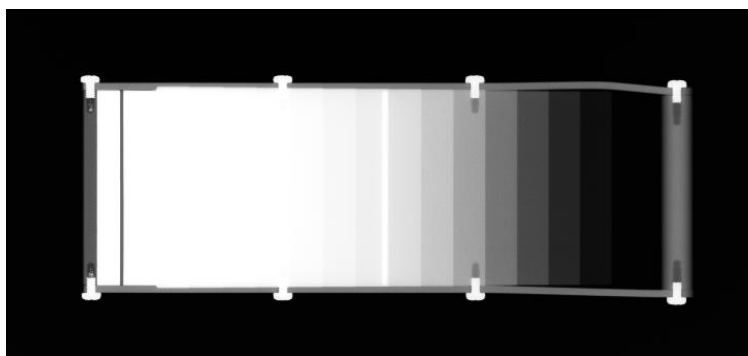
Slika 19: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 81 kV in 4 mAs

Iz slike 19 razberemo, da absorpcijski koeficient za vzorec aluminija pri pogojih 81 kV in 4 mAs znaša $1,106 \text{ cm}^{-1}$. Če želimo dobiti masni absorpcijski koeficient, moramo vrednost dobljenega absorpcijskega koeficienta deliti še z gostoto aluminija.

$$\mu/\rho = \frac{1,106 \text{ cm}^{-1}}{2,7 \text{ g/cm}^3} = 0,409 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

Iz tabele 2 razberemo, da naj bi masni absorpcijski koeficient aluminija pri energiji 80 keV znašal $0,202 \text{ cm}^2/\text{g}$, pri naših meritvah in izračunih pa smo pri enaki energiji dobili vrednost $0,409 \text{ cm}^2/\text{g}$. Ta vrednost bi glede na tabelo 2 ustrezala energiji približno 48 keV.

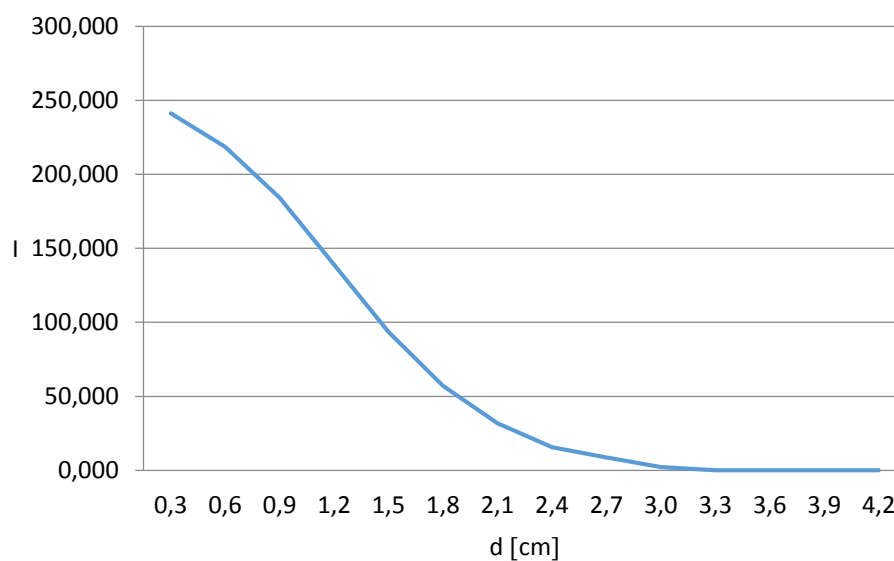
7.1.2. $U = 60 \text{ kV}$, $I_{\text{el}}t = 4 \text{ mAs}$



Slika 20: Rentgenska slika vzorca aluminija pri pogojih 60 kV in 4 mAs

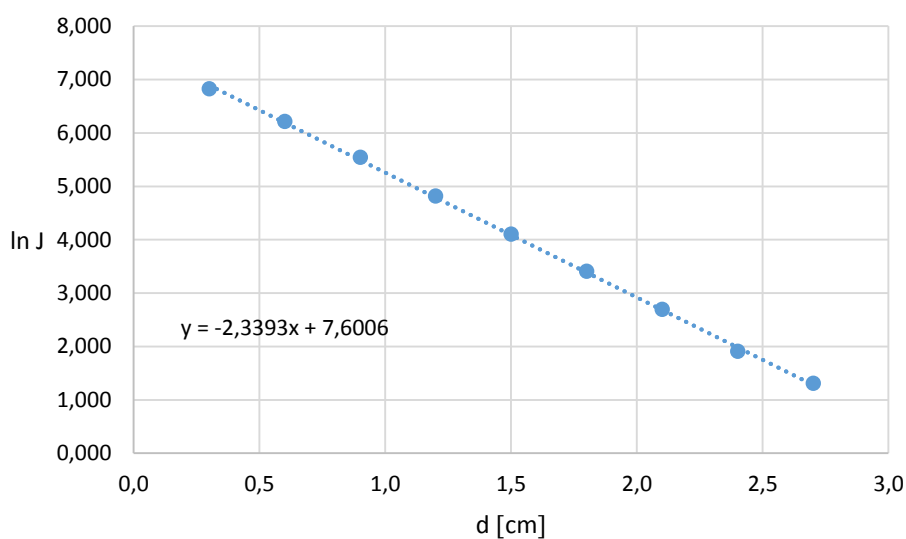
d [cm]	I	ln J
0,3	241,285	6,828
0,6	218,593	6,216
0,9	184,135	5,541
1,2	138,982	4,819
1,5	93,517	4,103
1,8	57,160	3,406
2,1	31,790	2,695
2,4	15,595	1,910
2,7	8,779	1,306

Tabela 4: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca aluminija pri pogojih 60 kV in 4 mAs



Slika 21: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 60 kV in 4 mAs

Iz slike 21 je razvidno, da se intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe pri vzorcu iz aluminija ter pogojih 60 kV in 4 mAs z enakomernim večanjem debeline snovi približno enakomerno zmanjšuje tja do debeline vzorca 2,4 cm. Od debeline vzorca 2,7 cm do 4,2 cm pa je intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe enaka nič, kar pomeni, da je energija vpadnih fotonov rentgenske svetlobe pri napetosti 60 kV premajhna, da bi prešla skozi snov.

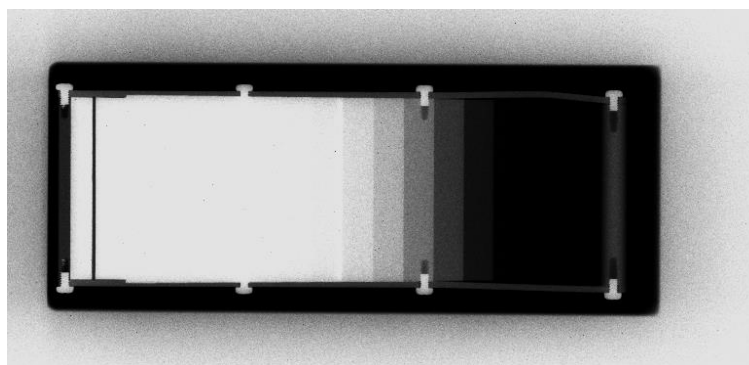


Slika 22: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 60 kV in 4 mAs

Iz slike 22 razberemo, da absorpcijski koeficient za vzorec aluminija pri pogojih 60 kV in 4 mAs znaša $2,339 \text{ cm}^{-1}$. Na enak način kot pri prejšnjih pogojih, tudi v tem primeru izračunamo masni absorpcijski koeficient.

Iz tabele 2 razberemo, da naj bi masni absorpcijski koeficient aluminija pri energiji 60 keV znašal $0,278 \text{ cm}^2/\text{g}$, pri naših meritvah in izračunih pa smo pri enaki energiji dobili vrednost $0,866 \text{ cm}^2/\text{g}$. Ta vrednost bi glede na tabelo 2 ustrezala energiji približno 35 keV.

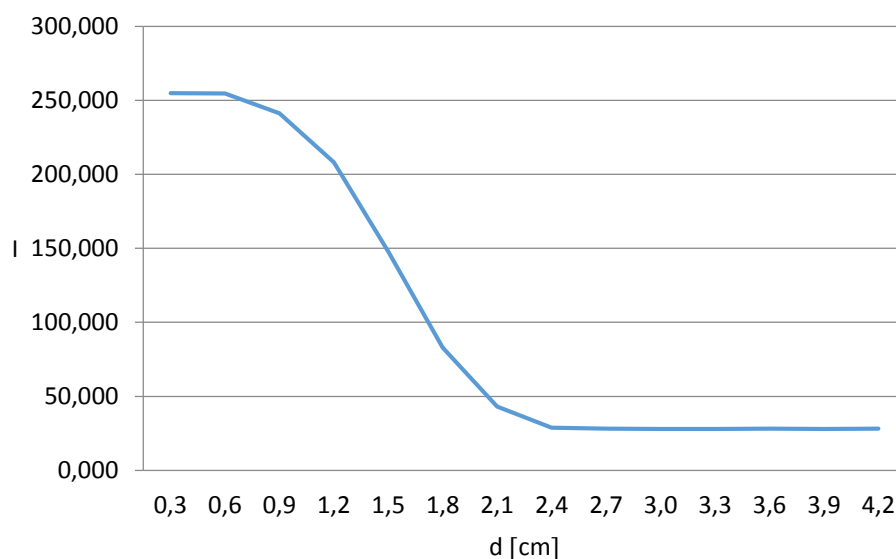
7.1.3. $U = 40 \text{ kV}$, $I_{\text{el}}t = 4 \text{ mAs}$



Slika 23: Rentgenska slika vzorca aluminija pri pogojih 40 kV in 4 mAs

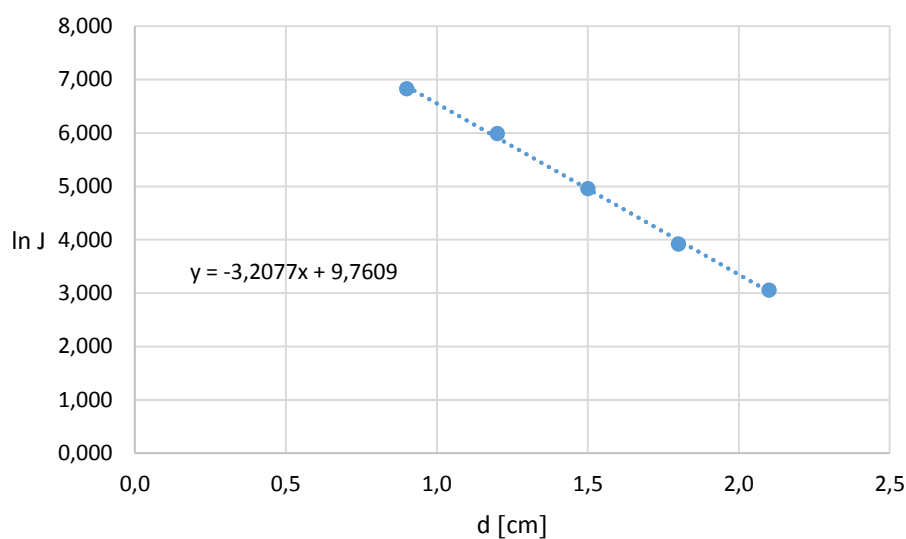
d [cm]	I	ln J
0,3	255,000	7,360
0,6	254,648	7,344
0,9	241,335	6,830
1,2	208,125	5,989
1,5	147,787	4,954

Tabela 5: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca aluminija pri pogojih 40 kV in 4 mAs



Slika 24: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 40 kV in 4 mAs

Iz slike 24 je razvidno, da se intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe pri vzorcu iz aluminija ter pogojih 40 kV in 4 mAs z enakomernim večanjem debeline snovi približno enakomerno zmanjšuje od debeline vzorca 0,9 cm pa do 2,1 cm. Od debeline vzorca 0,3 cm do 0,9 cm je intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe maksimalna (program ImageJ ima privzeto maksimalno vrednost intenzivnosti svetlobe 255), kar pomeni, da je bila na tem področju energija fotonov vpadne rentgenske svetlobe dovolj velika, da so vsi prešli skozi snov. Od debeline vzorca 2,4 cm do 4,3 cm pa je intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe skoraj nič, kar pomeni, da je energija vpadnih fotonov rentgenske svetlobe pri napetosti 40 kV premajhna, da bi prešla skozi snov.



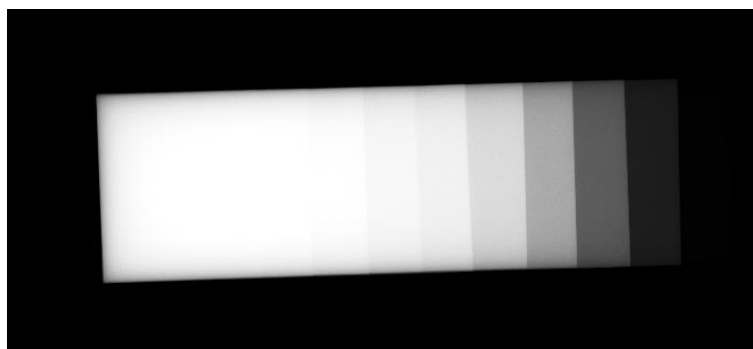
Slika 25: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec aluminija pri pogojih 40 kV in 4 mAs

Iz slike 25 razberemo, da absorpcijski koeficient za vzorec aluminija pri pogojih 40 kV in 4 mAs znaša $3,207 \text{ cm}^{-1}$. Na enak način kot pri prejšnjih dveh primerih, tudi tukaj izračunamo masni absorpcijski koeficient.

Iz tabele 2 razberemo, da naj bi masni absorpcijski koeficient aluminija pri energiji 40 keV znašal $0,569 \text{ cm}^2/\text{g}$, pri naših meritvah in izračunih pa smo pri enaki energiji dobili vrednost $1,187 \text{ cm}^2/\text{g}$. Ta vrednost bi glede na tabelo 2 ustrezala energiji približno 30 keV.

7.2. Slikanje vzorca bakra

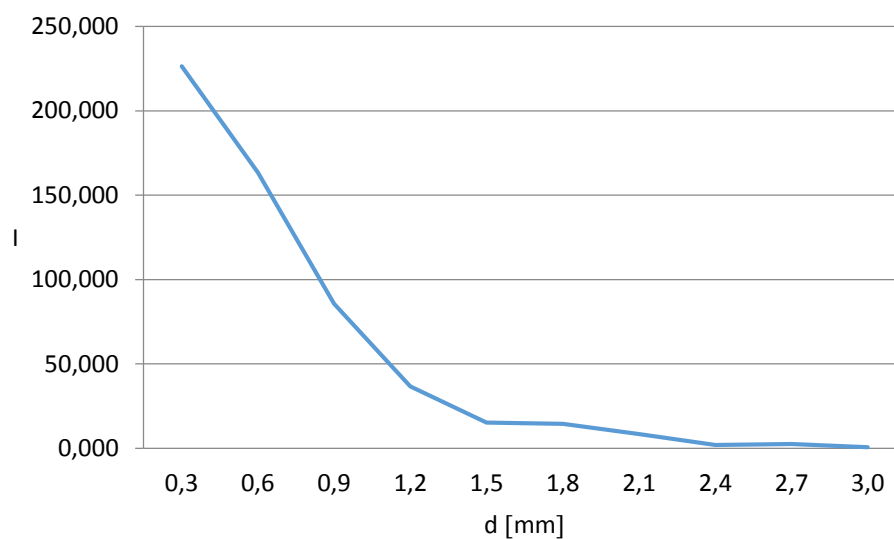
7.2.1. Napetost na rentgenski cevi $U = 81$ kV, produkt električnega toka in ekspozicijskega časa $I_{et} = 4$ mAs



Slika 26: Rentgenska slika vzorca bakra pri pogojih 81 kV in 4 mAs

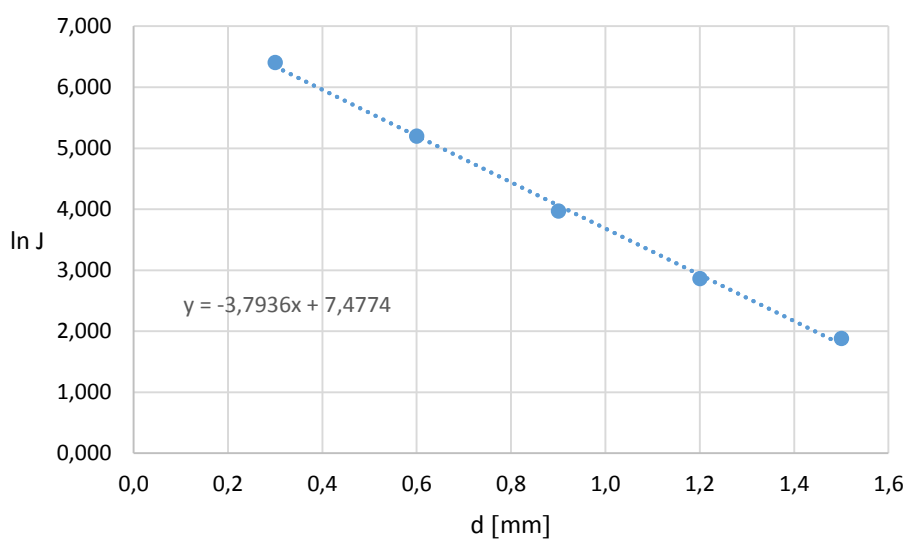
d [mm]	I	ln J
0,3	226,472	6,405
0,6	163,410	5,198
0,9	85,605	3,967
1,2	36,756	2,864
1,5	15,186	1,882

Tabela 6: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca bakra pri pogojih 81 kV in 4 mAs



Slika 27: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 81 kV in 4 mAs

Iz slike 27 je razvidno, da se intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe pri vzorcu iz bakra ter pogojih 81 kV in 4 mAs z enakomernim večanjem debeline snovi približno enakomerno zmanjšuje od debeline vzorca 0,3 mm do 1,2 mm. Od debeline vzorca 1,5 mm do 3,0 mm pa je intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe skoraj nič, kar pomeni, da je energija vpadnih fotonov rentgenske svetlobe pri napetosti 81 kV premajhna, da bi prešla skozi snov.



Slika 28: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 81 kV in 4 mAs

Iz slike 28 razberemo, da absorpcijski koeficient za vzorec bakra pri pogojih 81 kV in 4 mAs znaša $37,936 \text{ cm}^{-1}$. Če želimo dobiti masni absorpcijski koeficient, moramo vrednost dobljenega absorpcijskega koeficienta deliti z gostoto bakra.

$$\mu/\rho = \frac{37,936 \text{ cm}^{-1}}{8,9 \text{ g/cm}^3} = 4,262 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$$

Iz tabele 2 razberemo, da naj bi masni absorpcijski koeficient bakra pri energiji 80 keV znašal $0,763 \text{ cm}^2/\text{g}$, pri naših meritvah in izračunih pa smo pri enaki energiji dobili vrednost $4,262 \text{ cm}^2/\text{g}$. Ta vrednost bi glede na tabelo 2 ustrezala energiji približno 42 keV.

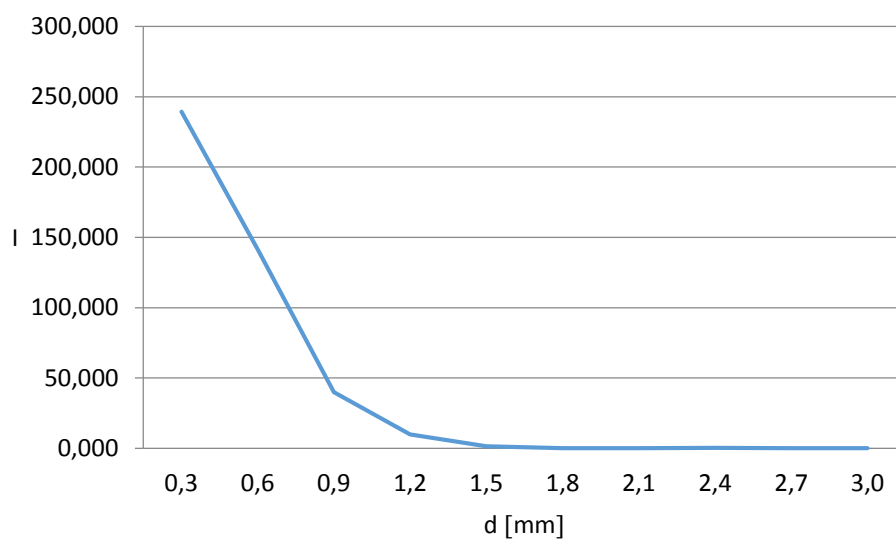
7.2.2. $U = 60 \text{ kV}$, $I_{\text{el}}t = 4 \text{ mAs}$



Slika 29: Rentgenska slika vzorca bakra pri pogojih 60 kV in 4 mAs

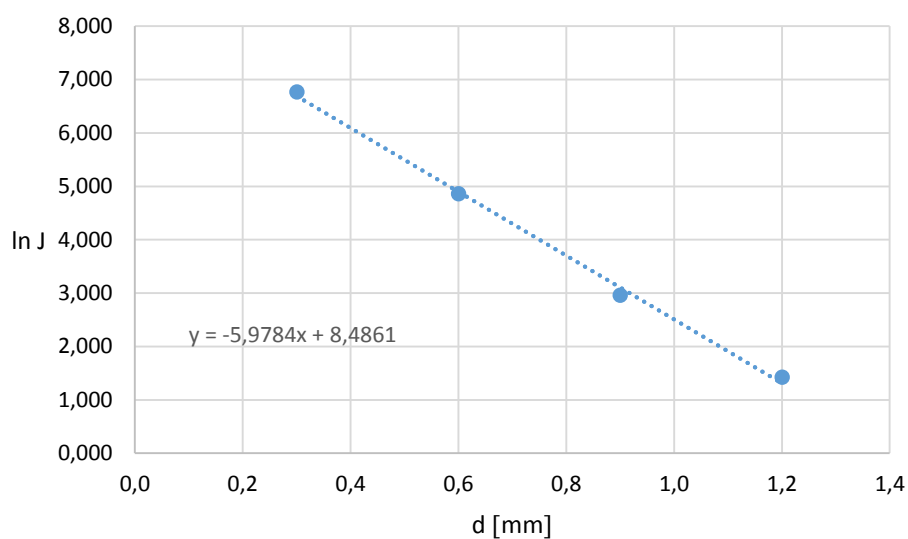
d [mm]	I	ln J
0,3	239,392	6,768
0,6	141,566	4,859
0,9	39,905	2,961
1,2	9,811	1,422

Tabela 7: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca bakra pri pogojih 60 kV in 4 mAs



Slika 30: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 60 kV in 4 mAs

Iz slike 30 je razvidno, da se intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe pri vzorcu iz bakra ter pogojih 60 kV in 4 mAs z enakomernim večanjem debeline snovi enakomerno zmanjšuje od debeline vzorca 0,3 mm do 0,9 mm. Od debeline vzorca 1,2 mm do 3,0 mm pa je intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe skoraj nič, kar pomeni, da je energija vpadnih fotonov rentgenske svetlobe pri napetosti 60 kV premajhna, da bi prešla skozi snov.



Slika 31: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 60 kV in 4 mAs

Iz slike 31 razberemo, da absorpcijski koeficient za vzorec bakra pri pogojih 60 kV in 4 mAs znaša $59,784 \text{ cm}^{-1}$. Na enak način kot pri prejšnjih pogojih, tudi v tem primeru izračunamo masni absorpcijski koeficient.

Iz tabele 2 razberemo, da naj bi masni absorpcijski koeficient bakra pri energiji 60 keV znašal $1,593 \text{ cm}^2/\text{g}$, pri naših meritvah in izračunih pa smo pri enaki energiji dobili vrednost $6,717 \text{ cm}^2/\text{g}$. Ta vrednost bi glede na tabelo 2 ustrezala energiji približno 36 keV.

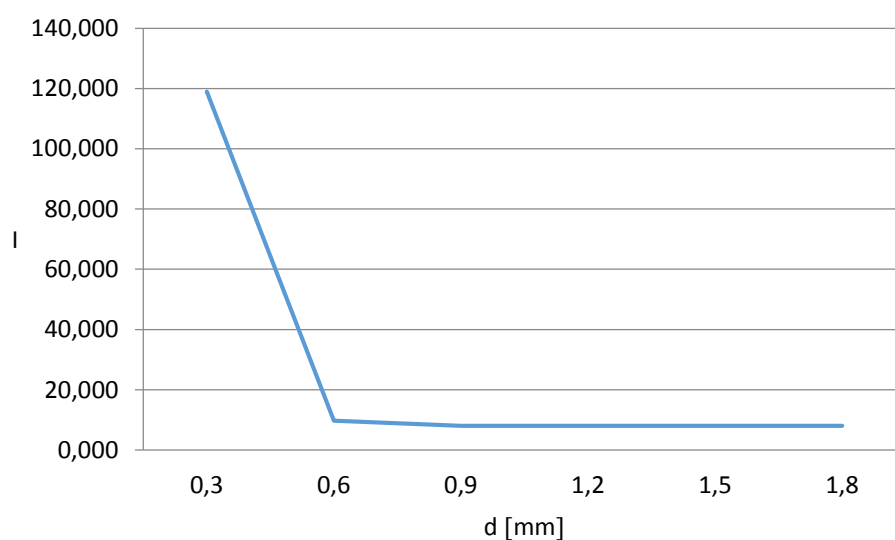
7.2.3. $U = 40 \text{ kV}$, $I_{\text{el}}t = 4 \text{ mAs}$



Slika 32: Rentgenska slika vzorca bakra pri pogojih 40 kV in 4 mAs

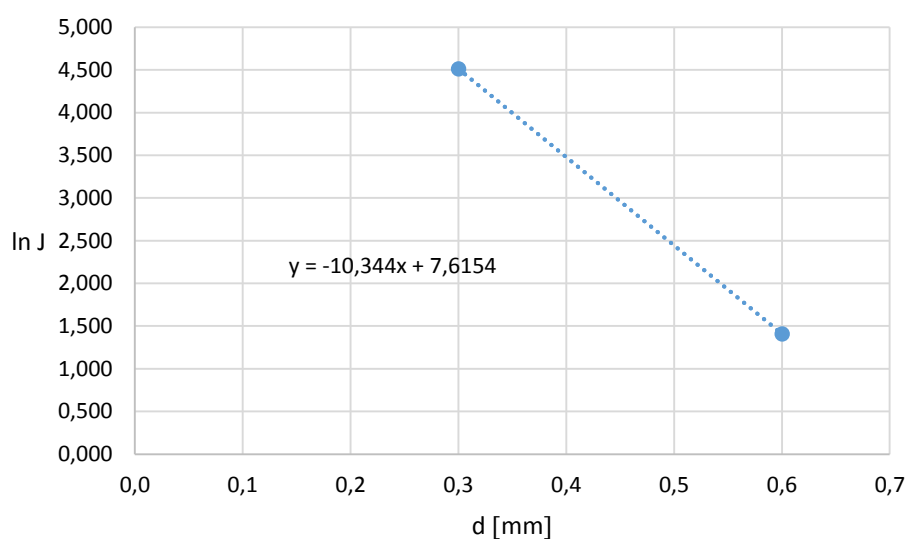
d [mm]	I	ln J
0,3	118,994	4,512
0,6	9,690	1,409

Tabela 8: Vrednosti za rentgensko sliko vzorca bakra pri pogojih 40 kV in 4 mAs



Slika 33: Intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 40 kV in 4 mAs

Energija fotonov rentgenske svetlobe pri napetosti 40 kV je tako majhna, da lahko na sliki 32 odčitamo le dve vrednosti intenzitete prepuščene rentgenske svetlobe in sicer pri debelini vzorca 0,3 mm in 0,6 mm. Iz slike 33 lahko razberemo, da se intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe pri vzorcu iz bakra ter pogojih 40 kV in 4 mAs s povečano debelino snovi zmanjša. Od debeline vzorca 0,9 mm naprej je intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe skoraj nič, kar pomeni, da je energija vpadnih fotonov rentgenske svetlobe pri napetosti 40 kV premajhna, da bi prešla skozi snov.



Slika 34: Logaritmirana intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe v odvisnosti od debeline snovi za vzorec bakra pri pogojih 40 kV in 4 mAs

Iz slike 34 razberemo, da absorpcijski koeficient za vzorec bakra pri pogojih 40 kV in 4 mAs znaša $103,44 \text{ cm}^{-1}$. Na enak način kot pri prejšnjih dveh primerih, tudi tukaj izračunamo masni absorpcijski koeficient.

Iz tabele 2 razberemo, da naj bi masni absorpcijski koeficient bakra pri energiji 40 keV znašal $4,862 \text{ cm}^2/\text{g}$, pri naših meritvah in izračunih pa smo pri enaki energiji dobili vrednost $11,622 \text{ cm}^2/\text{g}$. Ta vrednost bi glede na tabelo 2 ustrezala energiji približno 29 keV.

7.3. Povzetek dobljenih rezultatov pri slikanju vzorcev aluminija in bakra

V obeh primerih, tako pri vzorcu aluminija kot pri vzorcu bakra, sem ugotovila, da se intenziteta prepuščene rentgenske svetlobe z večanjem debeline snovi manjša. Masni absorpcijski koeficient se z manjšanjem energije povečuje, kar pomeni, da pri manjših energijah fotoni težje prehajajo skozi snov.

μ/ρ aluminija [cm ² /g]	Največja energija [keV]	Ocenjena energija [keV]	Odstotek največje energije [%]
0,409	80	48	60
0,866	60	35	58
1,187	40	30	75

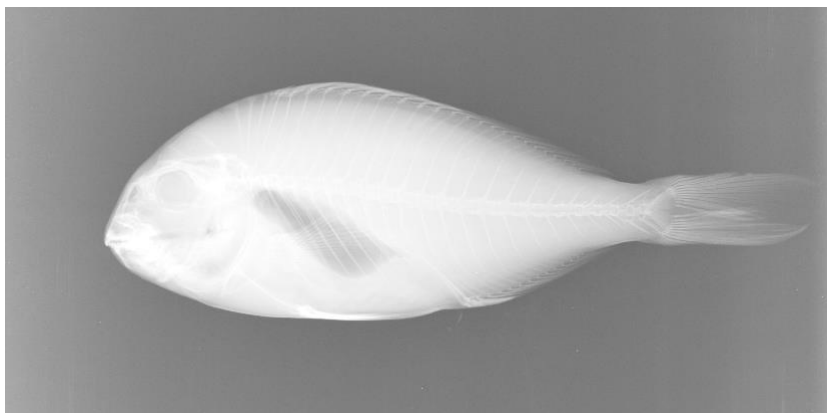
Tabela 9: Izmerjeni masni absorpcijski koeficient za aluminij pri različnih energijah

μ/ρ bakra [cm ² /g]	Največja energija [keV]	Ocenjena energija [keV]	Odstotek zmanjšanja [%]
4,262	80	42	67
6,717	60	36	60
11,622	40	29	72

Tabela 10: Izmerjeni masni absorpcijski koeficient za baker pri različnih energijah

Pri določanju masnega absorpcijskega koeficienta je potrebno vedeti, da se vrednosti v tabeli 2 nanašajo na najvišjo energijo fotonov, večina fotonov pri rentgenski svetlobi pa ima manjšo energijo (fotoni v snopu rentgenske svetlobe imajo energijo porazdeljeno od nič do maksimalne energije), kar pomeni, da imajo večji masni absorpcijski koeficient. Predvidevam, da je energija, ki ustreza našim meritvam in izračunom masno absorpcijskega koeficienta, povprečna energija vseh fotonov, zato smo tudi dobili večje vrednosti masnih absorpcijskih koeficientov. Naše vrednosti masnih absorpcijskih koeficientov so tako pri vzorcu aluminija kot pri vzorcu bakra večje za cca. 65 % največje energije fotonov.

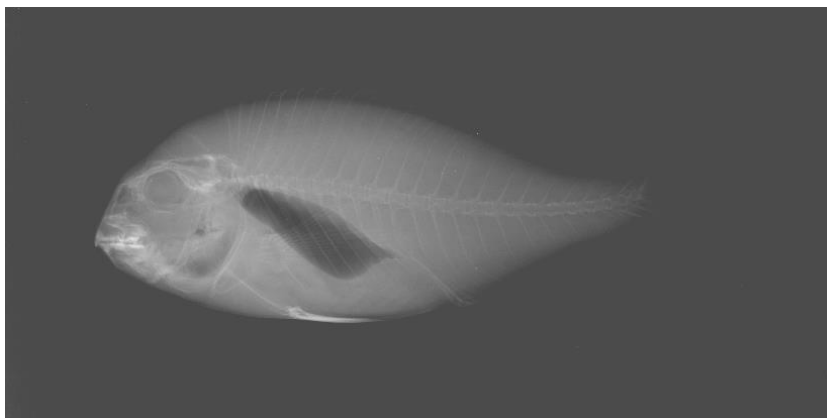
7.4. Slikanje organskega vzorca – orada



Slika 35: Rentgenska slika orade pri pogojih 40 kV in 32 mAs



Slika 36: Rentgenska slika orade pri pogojih 52 kV in 12,5 mAs



Slika 37: Rentgenska slika orade pri pogojih 81 kV in 4 mAs

Za primer slikanja organskega vzorca, smo uporabili ribo orado. Poslikali smo jo pri različnih ekspozicijskih vrednostih. Radiološki inženirji, ki so v zdravstvu odgovorni za to, da naredijo rentgensko sliko, ki bo primerna za diagnosticiranje različnih poškodb ali bolezni, uporabljajo različne ekspozicijske vrednosti. Kakšne ekspozicijske vrednosti bodo naravnali na rentgenskem aparatu je odvisno od tega ali želi zdravnik radiolog pregledati skelet ali mehko tkivo.

Slika 35 ni uporabna v diagnostične namene, saj na njej nista dobro vidna niti skelet niti mehko tkivo. Na taki sliki bi bilo težko prepoznati kakršne koli poškodbe ali bolezenska stanja.

Slika 36 je optimalna za diagnosticiranje skeleta, saj je na njej vidnih veliko podatkov. Pri pregledovanju skeleta radiolog išče in gleda majhne podrobnosti, kot so zlomi, poke ali obrabe sklepov. Take slike dobimo pri zmerno visoki napetosti ter velikem produktu jakosti električnega toka in ekspozicijskega časa.

Slika 37 je optimalna za diagnosticiranje mehkih tkiv, kot so na primer pljuča. Pri pregledovanju mehkih tkiv radiolog išče in gleda velike strukture in spremembe kot so različni zračni mehurčki, izlivi ali spremembe v zgradbi tkiva, ki lahko nakazujejo na različna rakava obolenja. Take slike dobimo pri visoki napetosti ter majhnem produktu jakosti električnega toka in ekspozicijskega časa.

8. Zaključek

V diplomskem delu sem predstavila rentgensko svetlobo, njen nastanek in njene interakcije s snovjo. Osredotočila sem se predvsem na njeno uporabo v medicini. Izmerila sem intenziteto prepuščene rentgenske svetlobe skozi vzorca aluminija in bakra. Ugotovila sem, da se v obeh primerih intenziteta rentgenske svetlobe z debelino snovi manjša in da se masni absorpcijski koeficient z manjšanjem energije povečuje. To pomeni, da je potrebno pri slikanju preiskovancev z rentgensko svetlobo paziti, da se ekspozicijske vrednosti (napetost ter produkt jakosti električnega toka in ekspozicijskega časa) prilagajajo glede na zgradbo preiskovanca, saj pri otrocih niso potrebne tako velike vrednosti kot pri odraslih, če želimo dobiti dobro rentgensko sliko. Kakšne ekspozicijske vrednosti bo izbral radiološki inženir pri slikanju preiskovanca je odvisno tudi od tega, kaj želi radiolog videti na rentgenski sliki (skelet, mehka tkiva). To sem predstavila in razložila s pomočjo rentgenskih slik organskega vzorca (riba orada) pri različnih ekspozicijskih vrednostih. Predlagam, da se teme radioaktivnost, radioaktivno sevanje in rentgenska svetloba vrnejo v kurikulum za osnovne šole, saj se vsi slej ko prej s temi temami srečamo v vsakdanjem življenju. Teme se lahko predstavijo tako pri rednem pouku kot na naravoslovnem dnevu. V okviru naravoslovnega dneva se lahko organizira obisk Infocentra o jedrskih tehnologijah in radioaktivnih odpadkih na Reaktorskem centru v Brinjah ali Kliničnega inštituta za radiologijo v Univerzitetnem kliničnem centru Ljubljana. Ob tej priliki lahko učenci spoznajo tudi poklice povezane z zgoraj omenjenimi temami: jedrski fizik, radiološki inženir, radiolog ...

9. Literatura

- [1] *The Database on Nuclear Power Reactors*. Dostopno na: <https://www.iaea.org/pris/>, ogled: 2.8.2016.
- [2] ARAO: *Raopis, Časopis agencije za radioaktivne odpadke, Vse o sevanju, kar ne veste, pa bi želeli*. ARAO, Ljubljana 2006, številka 14.
- [3] *Radiation in Everyday Life*. Dostopno na: <https://www.iaea.org/Publications/Factsheets/English/radlife>, ogled: 9.8.2016.
- [4] V. Jevtič, M. Šurlan, J. Matela: *Diagnostična in intervencijska radiologija: Splošni del*. Založba Pivec, Maribor 2014.
- [5] J. Strnad: *Fizika: Tretji del, Posebna teorija relativnosti, Kvantna fizika, Atomi*. Državna založba Slovenije, Ljubljana 1988.
- [6] B. Golli: *Delčne lastnosti valovanja – verzija 12.11.2014*. Dostopno na: <http://www.pef.uni-lj.si/bojang/>, ogled: 15.5.2016.
- [7] P. Wingate: *Osnove fizike*. Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 1993.
- [8] IAEA: *Radiation, People and the Environment*. IAEA, Austria, 2004.
- [9] B. Golli: *Atomi, Molekule, Jedra – verzija 12.11.2014*. Dostopno na: <http://www.pef.uni-lj.si/bojang/>, ogled: 15.5.2016.
- [10] *Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih*. Uradni list RS, št. 49/04.
- [11] *Nuclear Radiation and Health Effects*. Dostopno na: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/nuclear-radiation-and-health-effects.aspx>, ogled: 9.8.2016.
- [12] *Sevanje radioaktivnih snovi*. Dostopno na: <http://www.arao.si/vprasanja-in-odgovori/sevanje-radioaktivnih-snovi>, ogled: 8.8.2016.
- [13] *Machlett FDX 1-2 Rotating Anode Tube (ca.1960s)*. Dostopno na: <https://www.ornl.gov/ptp/collection/xraytubescoolidge/rotatinganode1.htm>, ogled: 17.7.2016.
- [14] M. Medič: *Radiološka tehnologija 1: Učbenik za študente radiološke tehnologije*. Univerza v Ljubljani, Zdravstvena fakulteta, Ljubljana 2013.

- [15] *X-Ray Mass Attenuation Coefficients for aluminium*. Dostopno na:
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z13.html>, ogledano:
27.6.2016.
- [16] *X-Ray Mass Attenuation Coefficients for copper*. Dostopno na:
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z29.html>, ogledano:
27.6.2016.
- [17] P. Šter: *Dispozicija k magistrski nalogi*. Ljubljana, 2016.