

8. POSKUSI Z ŽARKI X

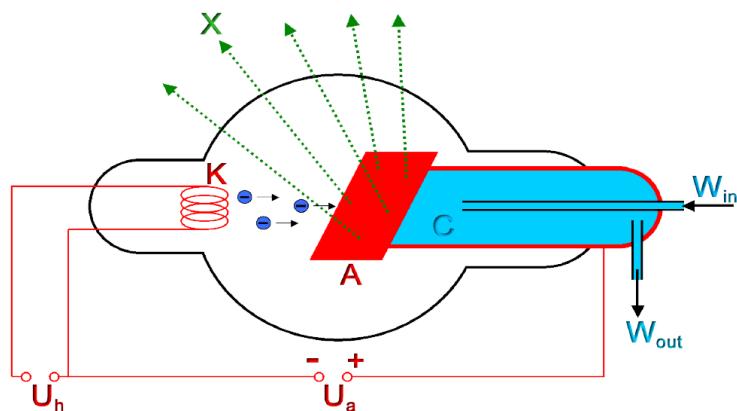
8.1 Naloga

1. Z ionizacijsko celico izmeri povprečno jakost doze v snopu žarkov X.
2. Izmeri polariziranost primarnih žarkov X.
3. Izmeri polariziranost sipanih žarkov X.

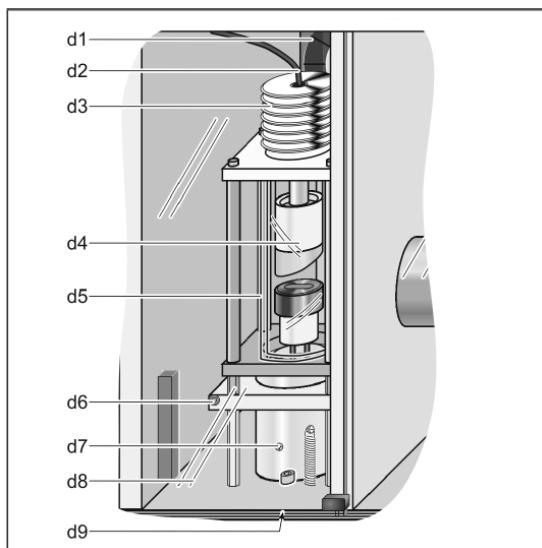
8.2 Izvor žarkov X

Elektrone, ki izhajajo iz katode, pospešimo z visoko napetostjo proti kovinski tarči. Pri trku zaradi zavirjanja elektronov v polju jeder nastanejo X žarki zavorno sevanje. Če imajo elektroni zadost energije, pa lahko iz notranjih elektronskih lupin izbjigejo elektrone. Elektroni iz višjih stanj zapolnijo vrzel, pri tem pa izsevajo karakteristične X žarke, ki imajo točno določeno energijo.

V našem primeru boste eksperimente opravljali s pomočjo rentgenske naprave Lehr und Didaktiksysteme 554811, ki vsebuje rentgensko cev z molibdenovo anodo in omogoča izpeljavo vrste različnih eksperimentov. Rentgenska cev je zaprta v cevi iz svinčevega stekla, ki absorbira večino X žarkov, ki ne letijo proti kolimatorju. Na ta način lahko med delovanjem opazujete spremembo temperature katode, če spremenjate katodni tok. Anoda je izdelana iz molibdena, na njej pa je maksimalna napetost 37 kV, ki povzroči anodni tok 1.2 mA. Za hlajenje anode skrbi ventilator. Jakost doze v bližini anode znaša 10 Sv/min, 10 cm od ohišja pa je manjša od $1 \mu\text{Sv}/\text{h}$. Zaradi varnosti je mogoče aparaturo vključiti samo, kadar so drsna vrata eksperimentalnega prostora zaprta.

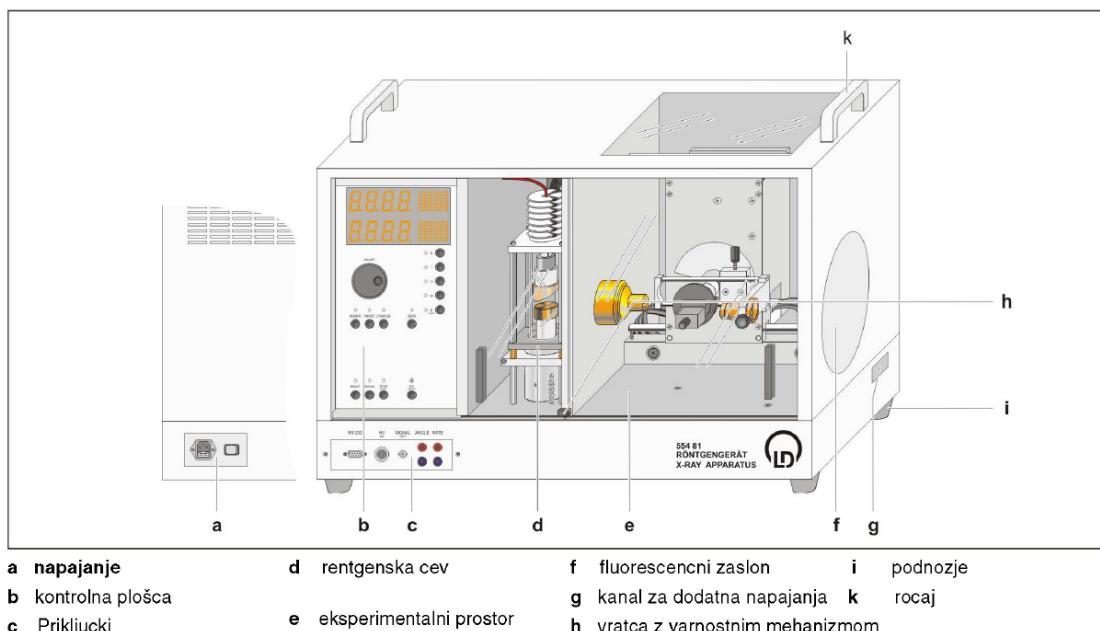


Slika 1: Shema rentgenske cevi



- d1 Ventilator
 d2 Visoko napetostni kabel
 d3 Hladilnik
 d4 Rentgenska cev
 d5 Cev iz svincevega stekla
 d6 Vijak
 d7 Podnozje
 d8 Drsna vratca iz svicevega stekla

Slika 2



- a napajanje
 b kontrolna plošča
 c Prikljucki
 d rentgenska cev
 e eksperimentalni prostor
 f fluorescencni zaslon
 g kanal za dodatna napajanja
 h vratca z varnostnim mehanizmom
 i podnozje
 j ročaj
 k rocaj

Slika 3

8.3 Ionizacijska celica

Najenostavnejša ionizacijska celica je kar ploščni kondenzator zvezan z izvorom visoke napetosti. Če v prostor med ploščama posvetimo z rentgenskimi žarki, ti na atomih zraka povzročijo (v glavnem) fotoefekt. Fotoelektroni zaradi svoje kinetične energije ionizirajo molekule. Nastale ionske pare napetost na kondenzatorju usmeri k ploščam in tako dobimo v tokokrogu tokovni sunek. Če je fotonov veliko (v našem primeru okrog $10^9/\text{s}$), se sunki povprečijo v merljiv električni tok. V splošnem vsi ionski pari ne dosežejo elektrod. Nekaj se jih prej rekombinira, odvisno od električne poljske jakosti v kondenzatorju. Pri nizkih poljskih jakostih je rekombinacija znatna, pri višjih pa je praktično ni več. To lepo vidimo pri opazovanju toka v odvisnosti od napetosti na kondenzatorju pri konstanti jakosti sevanja žarkov X. Tok najprej z višanjem napetosti narašča, nato pa nastopi nasičenje. (Pri višjih napetostih tok spet naraste, vendar je to že posledica drugih efektov).

Pojem števila fotonov pri rentgenskih napravah le redko uporablja. Vzrok je v tem, da število ionskih parov, ki jih žarki X ustvarijo v ionizacijski celici, ni odvisno samo od njihovega števila, ampak tudi od njihove energije. Namesto jakosti izvora govorijo o hitrosti ekspozicijske doze (As/kgh), ali absorbirane doze (Gr/h).

Namen te vaje je določiti ekspozicijsko dozo v snopu rentgenskih žarkov. Ekspozicijska doza X je električni naboj ΔQ enega predznaka, ki ga v zraku volumna ΔV z maso Δm , na enoto mase sprosti ionizirajoče sevanje

$$X = \Delta Q / \Delta m. \quad (1)$$

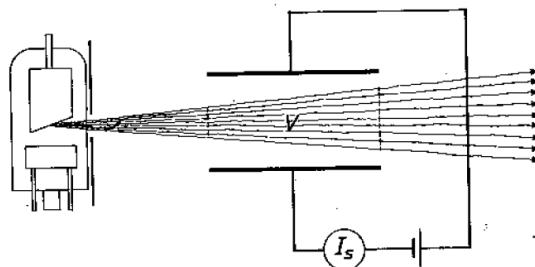
Enota za ekspozicijsko dozo je As/kg zraka. Hitrost ekspozicijske doze

$$dX/dt = \Delta I / \Delta m, \quad (2)$$

kjer ΔI pomeni tok nabitih dolcev (enota A/kg zraka). Če upoštevamo zvezo $m = \rho \Delta V$ velja:

$$dX/dt = \Delta I / \rho \Delta V. \quad (3)$$

Že omenjeni tok nasičenja v ionizacijski celici je torej merilo za hitrost ekspozicijske doze. Če znotraj celice gostota toka ni konstantna, dobimo iz meritve dozo, ki je povprečena preko obsevanega volumna celice.



Slika 4: Ionizacijska celica

8.4 Polariziranost žarkov X

Žarki X nastanejo v rentgenski cevi zaradi interakcije pospešenih elektronov z jedri v anodi. Gledano površno bi pričakovali, da se bo elektron v bližini jedra gibal po hiperboli.

Ko bi se jedru približeval, bi se njegova hitrost večala, ko pa bi se oddaljeval, bi se spet manjšala. Ker pa pospeševani ali upočasnjevani naboј seva elektromagnetno energijo, se mu med gibanjem mimo jedra hitrost zmanjša. Količina izsevane energije je odvisna od sile med elektronom in jedrom in od tega, kako dolgo ta sila deluje vse pa je odvisno od tega, kako daleč od jedra se elektron giblje. Frekvenca izsevanega elektromagnetnega valovanja ν je določena s kinetično energijo ΔE_k , ki jo izgubi elektron:

$$\Delta E_k = h\nu, \quad (4)$$

kjer je h Planckova konstanta. Maksimalno frekvenco dobimo takrat, ko se vsa elektro-nova kinetična energija spremeni v elektromagnetno

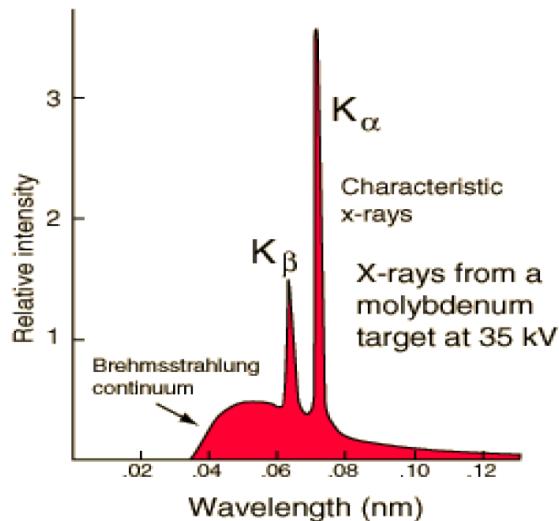
$$h\nu = E_k. \quad (5)$$

Priročna je formula za izračun ustrezne valovne dolžine

$$\lambda_{min}[\text{nm}] = 1240/U[\text{V}], \quad (6)$$

kjer je U anodna napetost. Velja si zapomniti, da je pri napetosti 12,4 kV minimalna valovna dolžina 0,1 nm.

Celotni spekter žarkov X, ki bi jih dobili iz rentgenske cevi, v kateri bi elektrone pospeševali z istosmerno napetostjo 35 kV na anodo iz molibdena kaže slika.



Slika 5: Spekter izsevane svetlobe.

Poleg zveznega dela spektra opazimo na sliki tudi diskretne črte. Pospešeni elektroni namreč iz atomov v tarči izbjijojo elektrone. Ko sosednji elektroni skačejo na prazna mesta, sevajo karakteristične žarke X, ki se v spektru pojavijo kot diskretne črte. Ker je vezalna energija elektronov v lupini K za volfram $E_K = -69,5$ keV, v lupini L pa $E_{L1} = -12,1$ keV, $E_{L2} = -11,5$ keV in $E_{L3} = -10,2$ keV, lahko v našem primeru, ko imamo elektrone pospešene na 35 keV, ti izbjijojo iz atoma le elektrone v lupini L in črte v spektru na sliki ustrezajo prehodom manj vezanih elektronov v to lupino.

Oglejmo si še poenostavljeni sliko nastanka zavornega sevanja. Pomagali si bomo kar s klasičnim modelom nihajočega naboja, čeprav bi morali uporabiti metode kvantne mehanike.

Naj naboј niha v smeri osi Y: $Y = A \sin \omega t$ pospeškom $a_z = -A\omega^2 \sin \omega t$. Pospeševanje naboja sledi sevanje elektromagnetnega valovanja, ki ga opišemo z vektorjem jakosti

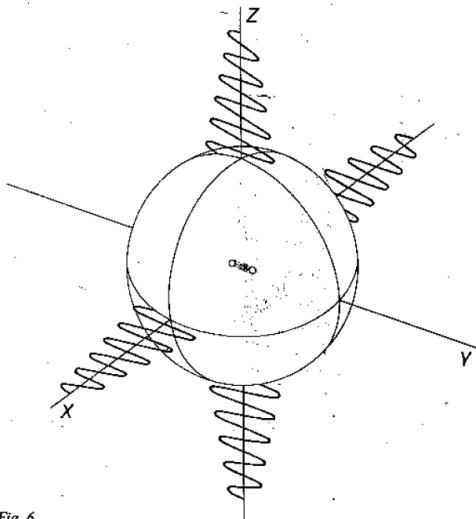


Fig. 6

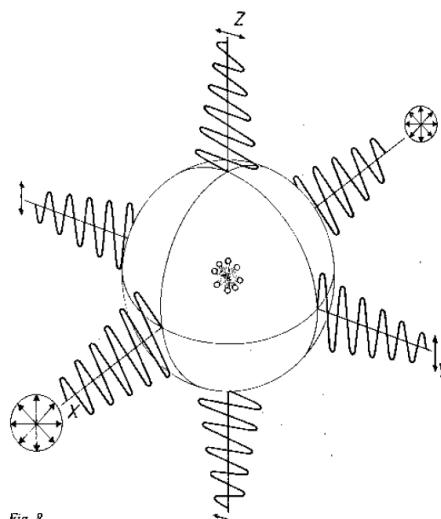


Fig. 8

Slika 6: Model nihajočega naboja. Levo: naboj niha v smeri osi Y. Desno: več nabojev, smeri nihanja so enakomerno porazdeljene v ravnini Y-Z.

električnega polja \vec{E} (ki ima smer nihajočega naboja in je pravokoten na smer razširjanja valovanja) in vektorjem magnetne poljske gostote \vec{B} (ki je pravokoten na \vec{E} in na smer razširjanja). Ker naboj niha v smeri osi Y, ima vektor \vec{E} vedno isto smer. Pravimo, da je valovanje linearно polarizirano (v smeri osi Y). Energijski tok valovanja, ki ga seva tak nihajoč naboj, je v različnih smereh prostora različen. Največji je v ekvatorialni ravnini, v smeri nihanja naboja pa je enak 0.

Imejmo več istočasno nihajočih nabojev, katerih smeri nihanja so enakomerno porazdeljene v ravnini Y-Z. V tem primeru dobimo v smeri X nepolarizirano valovanje, v smereh Y in Z pa je valovanje še vedno linearно polarizirano (slika Fig.8). Če smeri nihanja nabojev v ravnini YZ niso enakomerno porazdeljene, dobimo v smeri X delno polarizirano svetlobo.

Če bi se elektroni v anodi zavirali samo v smeri svojega prvotnega gibanja (naj bo to smer Y), bi dobili linearно polarizirane žarke X, ki se širijo v ravnini XZ. V resnici se veliko elektronov odkloni od prvotne smeri gibanja že prej, predno se zavorno sipljejo, zaradi česar so žarki X v ravnini XZ le delno polarizirani.

8.5 Koherentno sisanje žarkov X

Pri interakciji žarkov X z elektroni se energija (frekvenca) fotonov ne spremeni, če so elektroni vezani (elastično sisanje, koherentno sisanje) in zmanjša, če so elektroni prosti oz. slabo vezani (neelastično sisanje Comptonov efekt).

Nas zanima predvsem elastično sisanje, ker z njim določamo polarizacijo žarkov X. Ponazorimo si ga lahko s klasično teorijo sevanja, po kateri vektor električne poljske jakosti vpadnega valovanja s frekvenco vzbudi elektron k nihanju, pri tem pridobljeno energijo pa elektron vrne z izsevanjem valovanja iste frekvence. To valovanje se širi v prostor tako, kot je to značilno za nihajoč naboj. Na ta način se jakost vpadnega snopa zmanjša. Pri elastičnem sisanju vzbujeni elektroni nihajo tako kot vektor \vec{E} vpadnega valovanja, tj. v ravnini, ki je pravokotna na smer razširjanja. Če valovanje ni polarizirano, so vse smeri nihanja v tej ravnini enakomerno zastopane, če je delno polarizirano, so nekatere smeri priviligrirane, če pa je linearно polarizirano, vsi elektroni nihajo v isto smer.

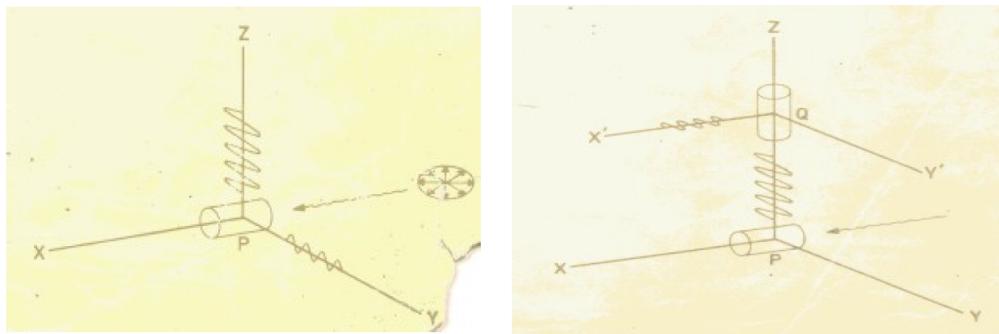
Po prejšnji obravnavi polarizacije valovanja, ki izhaja iz nihajočega naboja, takoj sledi, da je elastično sipano valovanje, ki se širi v ravnini pravokotno na smer prvotnega žarka, linearne polarizirano. Gostota energijskega toka, ki ga seva nihajoči naboje se spreminja kot $\sin^2 \theta$, kjer je θ kot med smerjo nihanja dipola in smerjo valovanja. Močno sevanje torej dobimo v ravnini, ki je pravokotna na smer nihanja naboja, v sami smeri nihanja pa sevanja ni.

Iz gornjega sledi, da je kotna porazdelitev elastično sisanega valovanja odvisna od polariziranosti vpadnega valovanja. Če je npr. dano valovanje, ki se giblje v smeri osi Y, polarizirano v smeri osi Z, v tej smeri ni sisanega valovanja. Pri delno polariziranem vpadnem valovanju je jakost sisanega valovanja v smeri osi Z manjša kot v smeri osi X. Le pri elastičnem sisanju nepolariziranega valovanja je jakost v smeri osi X ista kot v smeri osi Z.

Z merjenjem jakosti elastično sisanega valovanja lahko določimo polariziranost rentgenske svetlobe. V snop, ki ima npr. smer osi Y postavimo sipalec, nato pa v ravnini XZ z nekim števcem za ionizirajoče sevanje (npr. GeigerMullerjevim) izmerimo kotno porazdelitev sisanega valovanja. Dobljena porazdelitev je krog, če valovanje ni polarizirano in elipsa, če je polarizacija delna. V praksi navadno ne merimo celotne porazdelitve, ampak le vrednosti I_x in I_z , polariziranost pa definiramo z izrazom

$$\eta = \frac{I_z - I_x}{I_z + I_x}. \quad (7)$$

Polariziranost je $\eta = 0$, če je $I_x = I_z$ in $\eta \neq 0$, če je $I_x \neq I_z$.



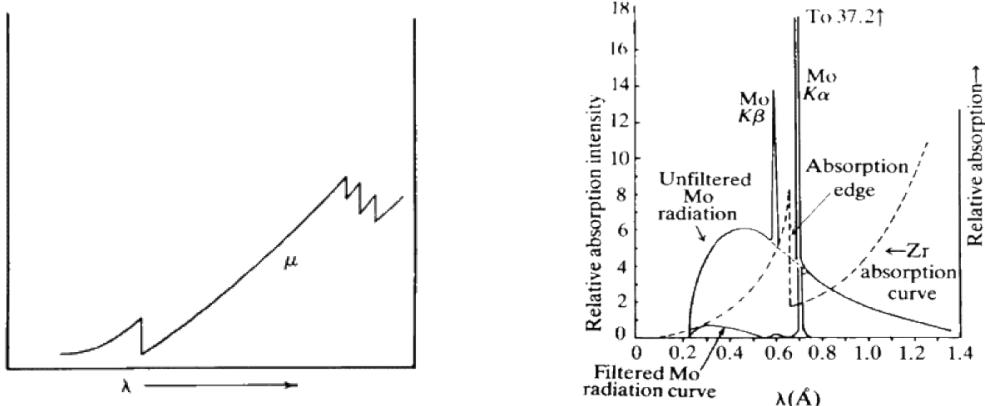
Slika 7: Meritev polariziranosti: primarnih žarkov X (levo) in sianih žarkov X (desno)

8.6 Presevno slikanje predmetov

Očitno je, da se X žarki absorbirajo v snovi, kar lahko opišemo z enostavno enačbo. Intenziteta I z globino d eksponentno pojema:

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

kjer je μ linearni absorpcijski koeficient in d dolžina poti X žarka v sredstvu. Vrednost absorpcijskega koeficiente narašča z atomskim številom elementa absorberja. Če narišemo μ kot funkcijo valovne dolžine X žarkov za katerikoli element, opazimo, da so gladki deli naraščanja absorbcije prekinjeni z ostrimi padci absorpcijski robovi, ki ustrezajo prehodom med elektronskimi stanji. Zanimiv efekt dobimo, če X žarke, ki jih dobimo iz molibdenove anode, pošljemo skozi cirkonijev filter, ki ima absorpcijski rob med K_α in K_β črtama molibdena, torej bo črta K_β dosti bolj absorbirana kot K_α (glej sliko 8).

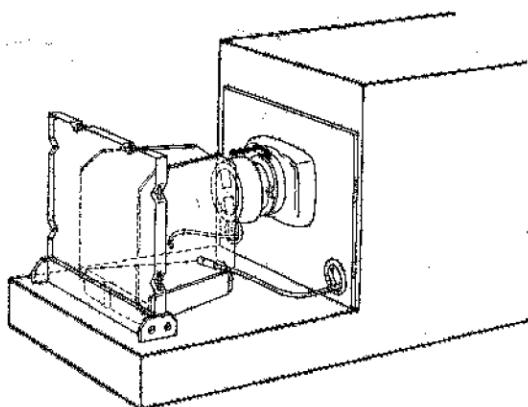


Slika 8: Absorpcija X-žarkov

Pri večini preiskav z X žarki potrebujejo žarke z eno energijo. Z uporabo filtra lahko tako relativno enostavno in najceneje dobimo monokromatske X žarke.

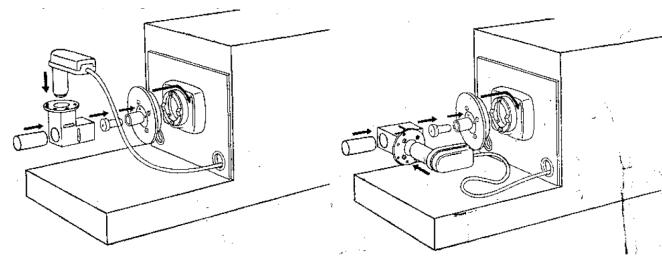
8.7 Navodila za delo

1. S pomočjo priloženih navodil se seznani z delovanjem rentgenske aparature
2. Na fosforecenčnem zaslolu si oglej slike različnih predmetov (tiskano vezje, biološki vzorci, denarnica). Z digitalnim fotoaparatom posnemi slike. Slike si oglej enkrat z, drugič pa brez cirkonijevega filtra.
3. Ionizacijsko celico sestavi po sliki, ki je vaji priložena. Za nekaj vrednosti napetosti na rentgenski cevi izmeri odvisnost toka od napetosti na ionizacijski celici. V poročilu odvisnosti prikaži na grafu. Nariši tudi hitrost ekspozicijske doze v odvisnosti od anodne napetosti na rentgenski cevi.



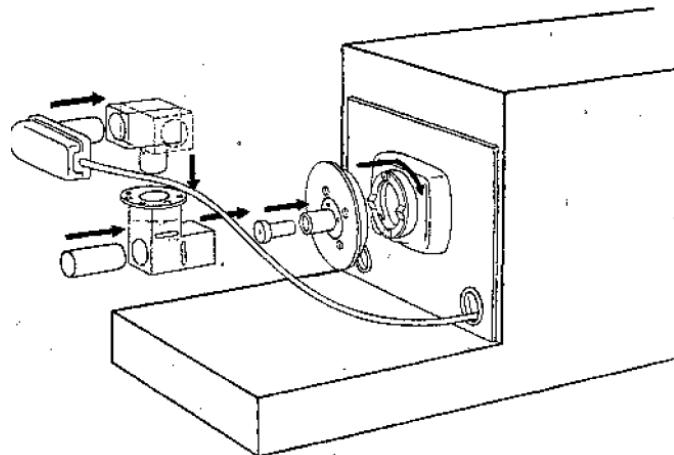
Slika 9: Ionizacijska celica

4. Meritev polariziranosti: Sipalec iz plastične mase izpostaviš kolimiranemu snopu žarkov X in v ravni pravokotno na smer vpadnega valovanja izmeriš z GM števcem jakost sipanega valovanja v dveh pravokotnih smereh.
5. Namen meritve polariziranosti elastično sipanega valovanja je preveriti prejšnjo trditev, da je elastično sipano valovanje v ravni pravotni na smer vpadnega valovanja linearno polarizirano. Rabiš torej dva sipalca. Prvega vstaviš v vpadni snop, na drugega pa naj pada elastično sipano valovanje, katerega polariziranost nato izmeriš tako, kot si



Slika 10: Enkratno sisanje

to napravil za primarni snop pri prejšnji nalogi. Ker pri tej nalogi niti primarno niti sekundarno valovanje nista dobro kolimirana, dobljeni rezultat ni zanesljiv. Namesto dobimo $\eta = 0.5$.



Slika 11: Dvakratno sisanje

$U_R = 15 \text{ kV}$		$U_R = 25 \text{ kV}$		$U_R = 30 \text{ kV}$		$U_R = 35 \text{ kV}$	
$U_C [\text{V}]$	$I_C [\text{nA}]$						
0.0	0.02	0.0	0.02	8.1	0.33	8.1	0.42
9.7	0.08	10.5	0.03	19.7	1.11	19.0	0.99
21.2	0.12	19.5	0.36	30.7	1.33	33.0	1.74
29.8	0.14	21.1	0.63	36.6	1.48	41.4	2.13
39.3	0.15	31.1	0.86	39.8	1.66	49.3	2.48
48.7	0.16	39.6	1.05	45.3	1.78	60.1	2.87
59.1	0.15	50.7	1.12	50.2	1.93	69.8	3.09
69.5	0.16	59.3	1.17	56.1	2.01	79.7	3.24
80.6	0.16	71.8	1.17	60.4	2.02	91.3	3.34
90.5	0.16	80.8	1.18	66.8	2.11	100.5	3.45
101.4	0.17	89.8	1.18	69.6	2.17	117.9	3.49
120.7	0.15	100.9	1.19	74.5	2.18	150.3	3.51
148.2	0.17	119.7	1.21	78.5	2.19	173.7	3.53
178.7	0.18	148.0	1.21	83.4	2.2	201.2	3.54
206.5	0.16	176.5	1.21	89.1	2.2	249.1	3.54
253.2	0.17	202.6	1.22	100.9	2.22	299.2	3.59
300.9	0.18	251.7	1.23	123.6	2.22		
		300.8	1.24	149.8	2.23		
				175.0	2.24		
				200.5	2.24		
				251.7	2.24		
				300.3	2.28		

Tabela 1: Meritve ionizacijskega toka v odvisnosti od napetosti na kondenzatorju.

8.8 Meritve

Za napetosti na rentgenski cevi 15 kv, 25 kv, 30 kv in 30 kv pri toku 1 mA izmerimo odvisnosti ionizacijskega toka od napetosti na kondenzatorju $I_C(U_C)$. Meritve so zapisane v tabeli 1 in grafično prikazane na 1.

Izmerimo še, da ima ionizacijska celica (kondenzator) dimenzijs

$$a = (160 \pm 0.5) \text{ mm},$$

$$b = \left(\frac{83 + 137}{2} \pm 0.5 \right) \text{ mm},$$

$$c = (34 \pm 0.5) \text{ mm}.$$

Za meritve¹ polarizacije primarnih žarkov s sipanjem izmerimo intenzitete

$$I_z = 115 \text{ s}^{-1}, \quad (8.1)$$

$$I_{z0} = 0.25 \text{ s}^{-1}, \quad (8.2)$$

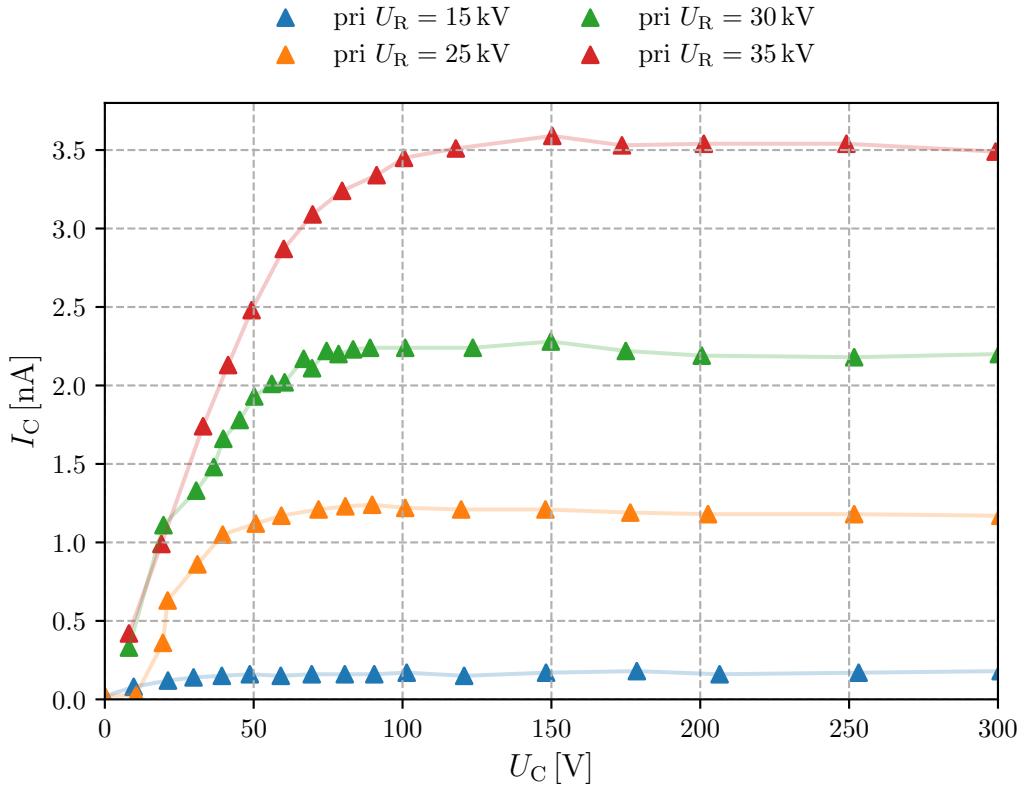
$$I_x = 133.2 \text{ s}^{-1}, \quad (8.3)$$

$$I_{x0} = 0.25 \text{ s}^{-1}, \quad (8.4)$$

pri čemer so intenzitete z indeksi 0 ozadja, ki jih kasneje od pripadajoče meritve odštejemo. Za meritve polarizacije že sipanih žarkov pa

¹Meritve polarizacije nisem izvajal sam, saj je GM števec pri vaji trenutno pokvarjen. Uporabil sem meritve iz prejšnjih let. Avtor teh meritev ni zapisal napak samih meritev, le simboleni izračun napake in napako končnega rezultata, torej te meritve nimajo napak.

Odvisnost ionizacijskega toka od napetosti na kondenzatorju U_C



Slika 1: Izmerjene vrednosti toka I_C med ploščama kondenzatorja za različne napetosti na kondenzatorju. Odvisnost je izmerjena za 4 različne napetosti na rentgenski cevi; tok na rentgenski cevi pa je konstanten, sicer 1 mA. Črte, ki povezujejo meritve, so zgolj z a boljšo preglednost.

$$I_z = 0.40 \text{ s}^{-1}, \quad (8.5)$$

$$I_{z0} = 0.35 \text{ s}^{-1}, \quad (8.6)$$

$$I_y = 0.38 \text{ s}^{-1}, \quad (8.7)$$

$$I_{y0} = 0.28 \text{ s}^{-1}. \quad (8.8)$$

8.9 Račun

Za volumen ionizacijske celice iz meritev izračunamo

$$V = 600 (1 \pm 0.02) \text{ mm}^3.$$

Iz meritev na sliki 1, posebej na sliki 4 izračunamo nasičene ionizacijske tokove $I_{\text{nasičen}}$ (vrednosti v tabeli 2). Hitrost doze lahko potem izračunamo z izrazom

$$\dot{X} = \frac{I_{\text{nasičen}}}{\rho V},$$

kjer za ρ uporabimo gostoto zraka

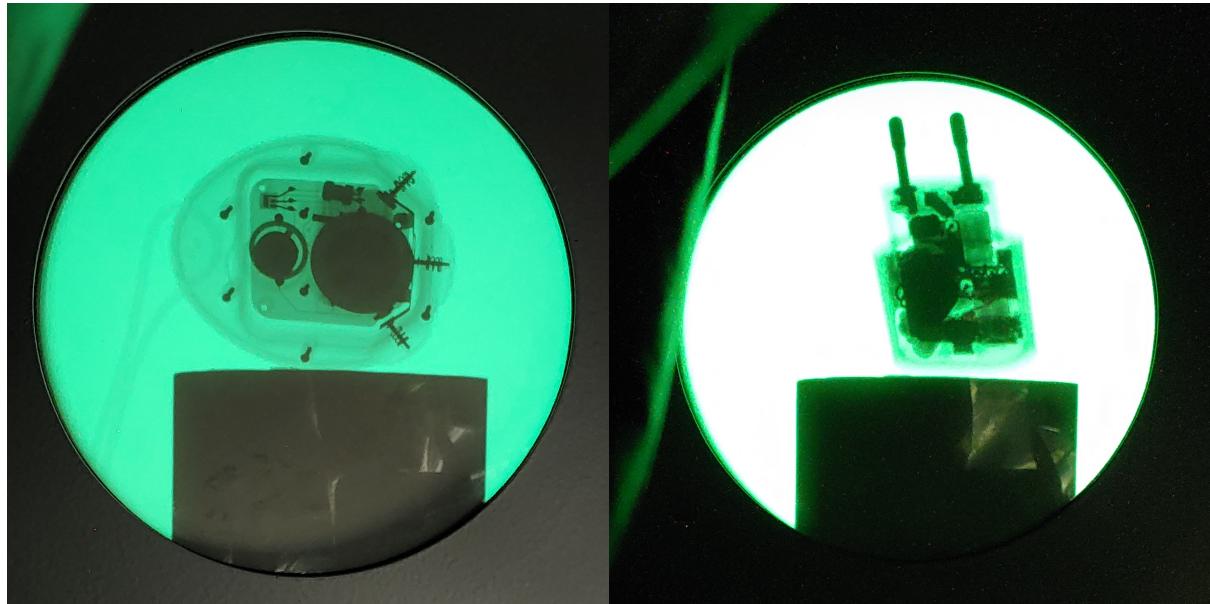
$$\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3.$$

Izračunane hitrosti doze predstavimo v tabeli 2.

Iz meritev 8.4 za polarizacijo primarnih žarkov lahko polarizacijo izračunamo preko



Slika 2: Rentgenski posnetek dispenzera za razkužilo.

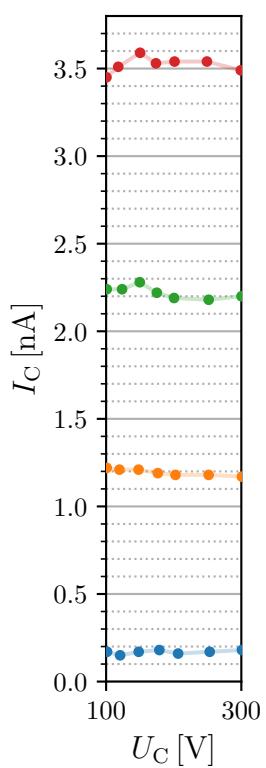


Slika 3: Rentgenska posnetka štoparice in polnilca za telefon.

U_R [kV]	$I_{\text{nasičen}}$ [nA]	\dot{X} [mAs/kg h]
15	0.17 ± 0.01	0.83 ± 0.07
25	1.20 ± 0.02	6.0 ± 0.2
30	2.23 ± 0.03	11.1 ± 0.4
35	3.52 ± 0.04	17.6 ± 0.6

Tabela 2: Iz napetostnega intervala $U_C \in [100, 300]$ izračunane vrednosti zasičenega toka I_C . Primerjamo jih lahko s prikazom meritev na sliki 4.

Za razbiranje
zasičenega I_C



Slika 4: Prikaz meritev iz 1, iz katere lažje razberemo zasičen tok U_C .

$$\eta = \frac{I_z - I_x}{I_z + I_x}.$$

Za polarizacijo izračunamo² vrednost

$$\eta = 0.07 \pm 0.01.$$

Polarizacijo že sipanih žarkov izračunamo podobno, le da tokrat gledamo ravnino xy namesto ravnine xz . Izračunamo³ polarizacijo

$$\eta = 0.33 \pm 0.15.$$

²Glej opombo 1.

³Glej opombo 1