

# Poskusi z žarki X

Samo Krejan

januar 2026

## 1 Uvod

Elektrone iz katode pospešimo z visoko napetostjo proti kovinski anodi. Pri trku z tarčo elektroni zaradi zaviranja v polju jeder pride do zavornega sevanja v spektru X žarkov. če imajo elektroni iz višjih stanj zadosti energije pa lahko iz notranjih lupin gradnikov tarče izbijajo elektrone. Elektroni iz višjih stanj gradnika nato zapolnejo vrzel. Takrat pride do izseva karakterističnih X žarkov, ki imajo točno določeno energijo.

### 1.1 Ionizacijska celica

Najenostavnejša ionizacijska celica je pravzaprav kar ploščni kondenzator zvezan z izvorom visoke napetosti. če v prostor med ploščama posvetimo z rentgenskimi žarki ti ionizirajo molekule zraka (preko fotoefekta, torej fotoelektroni so tisti, ki zares ionizirajo molekule zraka). Nastale ionske pare napetost na kondenzatorju usmeri k ploščam in dobimo tokovni sunek na tokokrogu. če je fotonov dovolj se sunki spovprečijo na merljiv tok. V splošnem vsi ionski pari ne dosežejo elektrod ker se jih nekaj že prej rekombinira. Pri nizkem polju v kondenzatorju je rekombinacija znatna, pri višjih pa je praktično ni več. To pomeni da s večanjem napetosti na kondenzatorju tok najprej narašča, nato pa nastopi nasičenje.

Ekspozicijska doza  $X$  je električni naboj  $\Delta Q$  enega predznaka, ki ga v zraku volumna  $\Delta V$  z maso  $\Delta m$ , na enoto mase sprosti ionizirajoče sevanje:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Hitrost ekspozicije definiramo z odvodom doze in jo izrazimo z tokom:

$$\frac{X}{t} = \frac{\Delta I}{\Delta m} = \frac{\Delta I}{\rho \Delta V}$$

### 1.2 Polariziranost žarkov X

Zarki X nastanejo zaradi interakcije pospešenih elektronov z katode z jedri v anodi. Ti pri upočasnjevanju elektromagnetno sevajo in se jim tako zmanjša hitrost pri gibanju mimo jedra. Frekvanca izsevanega žarka je določena s kinetično energijo, ki jo izgubi foton. Maksimalno frekvenco dobimo, ko se vsa kinetična energija spremeni v elektromagnetno.

$$E_k = h\nu$$

Priročna je formula z anodno napetostjo  $U$ .

Poenostavljeni gledano naboja niha v smeri osi  $y$ . Pospeševanju naboja sledi sevanje elektromagnetevega valovanja, ki ga opišemo z vektorjem jakosti električnega polja  $\vec{E}$  (ki ima smer nihajočega naboja in je pravokoten na smer razširjanja valovanja). Ker naboja niha v smeri  $y$  je tja usmerjen  $\vec{E}$ . Pravimo da je valovanje linearne polarizirano. Energijski tok valovanja, ki ga seva tak nihajoč naboja je največji v ekvatorialni ravnini, v smeri nihanja naboja pa je enak 0. Če imamo več istočasno nihajočih nabojev, katerih smeri nihanja so porazdeljene ravnini  $yz$ . V tem primeru dobimo nepolarizirano valovanje v smeri  $x$ . V smereh  $y, z$  pa je valovanje še vedno linearne polarizirano. Če nihanje ni enakovremeno porazdeljeno po ravnini, dobimo delno polarizirano svetlobo v smeri  $x$ . Če bi elektroni v anodi zavirali le v smeri svojega gibanja bi dobili linearne polarizirane žarke. V resnici se veliko elektronov odkloni od prvotne smeri že prej in so zato žarki le delno polarizirani.

Z merjenjem jakosti elastičnega sisanja valovanja lahko določimo polariziranost rentgenske svetlobe. Pri elasticno sisanem odbojnem valovanju dobimo močno sevanje v ravnini, ki je pravokotna na smer nihanja naboja, v sami smeri nihanja pa sevanja ni. V snop, ki ima smer osi  $y$  postavimo sipalec, nato pa v ravnini  $xz$  z GM števcem izmerimo kotno porazdelitev sisanega valovanja. Merimo pravzaprav le dve pravokotni komponenti  $I_x, I_z$ . Polariziranost tako definiramo kot:

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

### 1.3 Presevno slikanje predmetov

Žarki X se absorbirajo v snovi, kar lahko opišemo s preprosto enačbo za intenziteto:

$$I = I_0 \exp(-\mu d)$$

kjer je  $\mu$  absorpcijski faktor in  $d$  dolžina poti žarka v sredstvu. Ta pojav lahko izkoristimo za rentgensko slikanje.

## 2 Potrebščine

- Rentgenska naprava (Lehr und Didaktik Systeme 554811 ),
- ionizacijska celica,
- izvir napetosti,
- upor in voltmeter,
- 2 sipalca,
- GM števec,
- računalnik,

- fotoaparat.

### 3 Naloga

- Z inoziacijsko celico izmeri povprečno jakost doze v snopu žarkov X,
- Izmeri polariziranost primarnih žarkov X,
- Izmeri polariziranost sipalnih žarkov X,
- Slikaj čim več predmetov.

### 4 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

$$\begin{aligned} a &= (160 \pm 0.5) \text{ mm}, \\ b &= \left( \frac{83 + 137}{2} \pm 0.5 \right) \text{ mm}, \\ c &= (34 \pm 0.5) \text{ mm}. \end{aligned}$$

$U_R = 15 \text{ kV}$		$U_R = 25 \text{ kV}$		$U_R = 30 \text{ kV}$		$U_R = 35 \text{ kV}$	
$U_C [\text{V}]$	$I_C [\text{nA}]$						
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.

Za meritev polarizacije primarnih žarkov s sipanjem izmerimo intenzitete

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

$$I_{z0} = 0.25 \text{ s}^{-1}, \quad (2)$$

$$I_x = 133.2 \text{ s}^{-1}, \quad (3)$$

$$I_{x0} = 0.25 \text{ s}^{-1}, \quad (4)$$

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

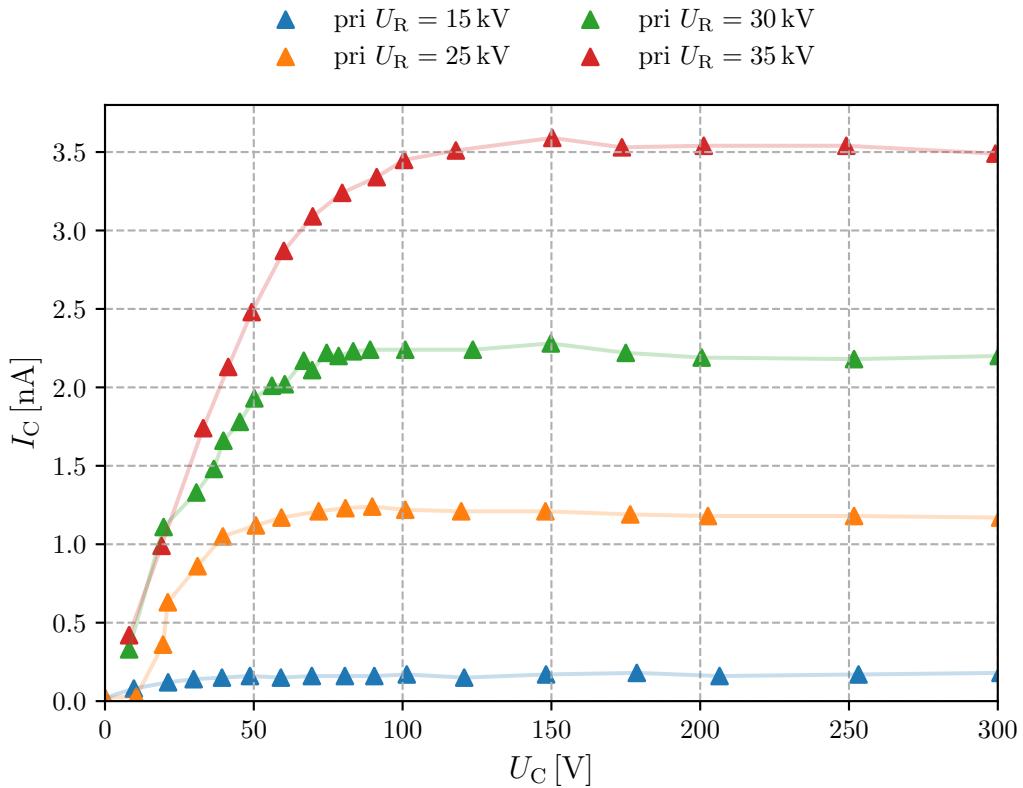
$$I_z = 0.40 \text{ s}^{-1}, \quad (5)$$

$$I_{z0} = 0.35 \text{ s}^{-1}, \quad (6)$$

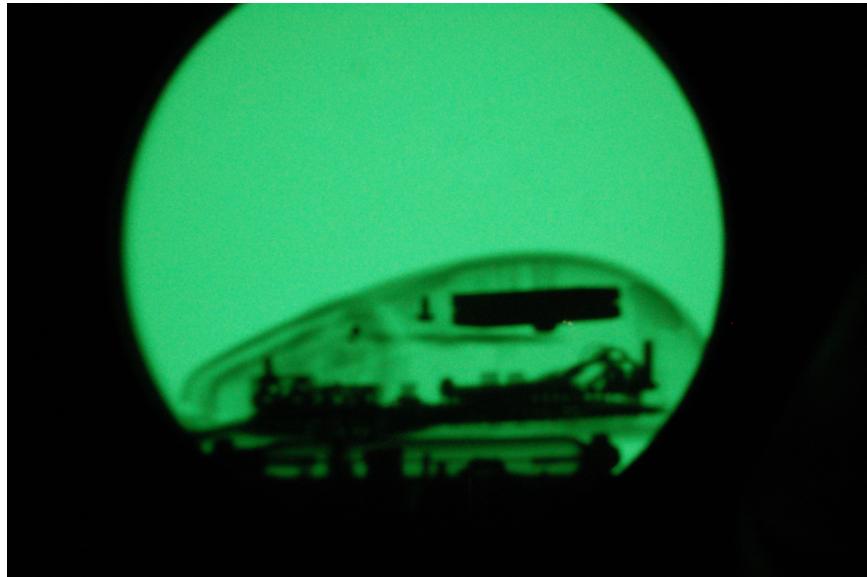
$$I_y = 0.38 \text{ s}^{-1}, \quad (7)$$

$$I_{y0} = 0.28 \text{ s}^{-1}. \quad (8)$$

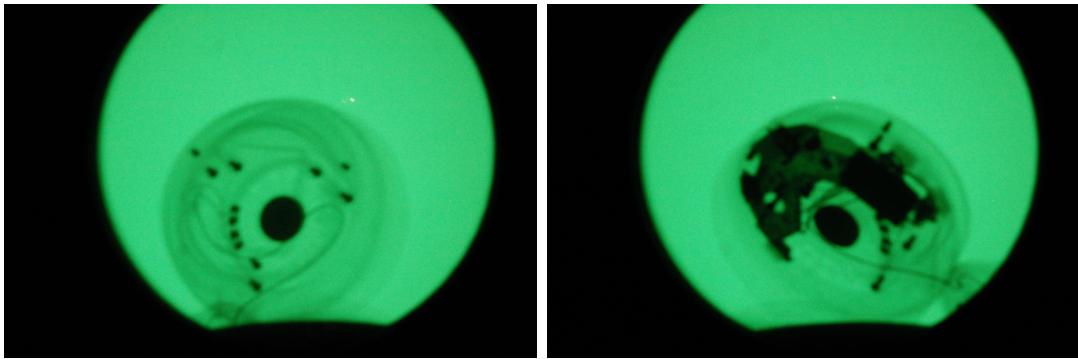
Odvisnost ionizacijskega toka od napetosti na kondenzatorju  $U_C$



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.



Slika 2: Rentgenski posnetek računalniške miške.



Slika 3: Rentgenska posnetka leve in desne slušalke.

## 4.1 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  $I_{nasicen}$  (vrednosti v tabeli 2). Hitrost doze lahko potem izračunamo z izrazom

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

kjer za  $\rho$  uporabimo gostoto zraka

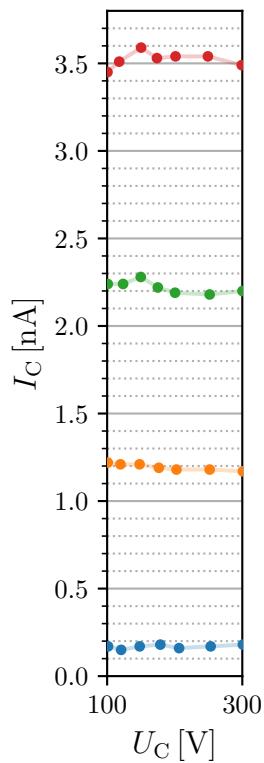
$$\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3.$$

Izračunane hitrosti doze predstavimo v tabeli 2.

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

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  $U_C$ .

Iz meritev 4 za polarizacijo primarnih žarkov lahko polarizacijo izračunamo preko

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

Za polarizacijo izračunamo vrednost

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

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

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