

Frank-Hertzov poskus

Samo Krejan

marec 2025

Uvod

Frank-Hertzov poskus je zgodovinsko izredno pomemben za kvantno mehaniko saj je leta 1914 kot prvi potrdil diskretizacijo stanj atoma.

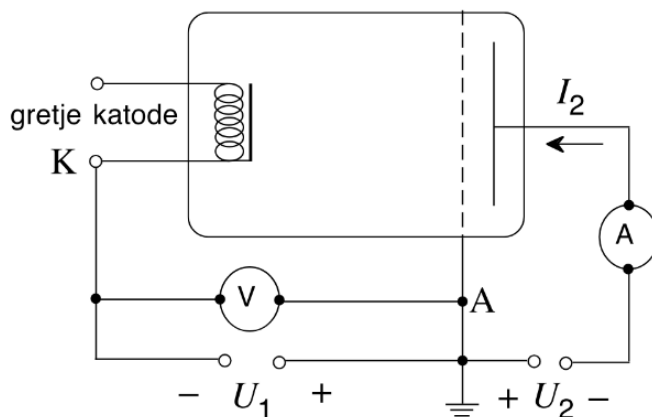
Plinska trioda vsebuje kaplico živega srebra Hg , ki ima nad sabo pri temperaturi $200^{\circ}C$ tlak približno 1 kPa . V cevi pospešujemo elektrone z napetostjo U_1 od katode proti anodni mrežici in jih nato lovimo s kolektorsko anodo, ki elektrone odbija z majhno napetostjo U_2 . Namen tega je zmanjševanje motenj ozadja. Kar merimo je tok elektronov I_2 , ki uspe premagati potencial U_2 in doseči kolektorsko anodo.

Med katodo in anodno mrežico se atomi pospešujejo, hkrati pa se trkajo v atome Hg . Trki so elastični ko je energija elektronov manjša od $\Delta E = E_1 - E_0$, kjer sta E_0 in E_1 osnovno in prvo vzbujeno stanje elektrona v zunanji lupini atoma Hg . Pri večjih energijah je možnost za neelastičen trk dovolj velika, tako da so v vmesnem prostoru med katodo in anodno mrežico l elektroni z energijo manjšo od ΔE . To sicer velja le ob dovolj veliki gostoti atomov, tako da elektroni ne morejo dobiti več energije pred trkom. Pri manjši gostoti (nižji temperaturi) ali pri višji pospeševalni napetosti dobijo elektroni več energije in lahko atome vzbudijo tudi v druga vzbujena stanja ali jih celo ionizirajo - dobimo plazmo, ki jo lahko opazimo kot svetlobo v celici. Plazma ustvari popolnoma drugačne pogoje s katerimi se v tej vaji ne ukvarjamo.

Ko spreminjamo napetost U_1 se spreminja povprečna kinetična energija elektronov, dokler ne dosežemo napetosti $U_1 = \Delta E/e_0$, kjer je e_0 osnovni naboj - naboj elektrona. Takrat pride do neelastičnih trkov in kinetična energija elektronov pade na 0. Če to napetost še naprej večamo se elektroni, ki so se umes ustavili, spet pospešijo in če pridejo spet do energije ΔE lahko vzbudijo še en atom iz osnovnega stanja. To se seveda ponavlja, če še naprej večamo napetost.

Nas zanimajo predvsem elektroni blizu anodne mrežice - te elektrone polovimo z anodnim kolektorjem če le imajo dovolj kinetične energije za premostitev potenciala U_2 in so pravilno usmerjeni.

Shema eksperimenta je prikazana na sliki 1



Slika 1: Shema Franck-Hertzovega poskusa. Vir: navodila

1 Potrebščine

- Frank - Hertzova cev v termostiranem ohišju,
- kontrolna enota za ustvarjanje žagaste napetosti (U_1), izvor izmenične napetosti za gretje katode (U_H), merjenje temperature,
- digitalni osciloskop (Siglent SDS2202X-E),
- USB ključek za shranjevanje podatkov.

2 Naloga

1. Opazuj odvisnost toka I_2 med anodno mrežico in anodnim kolektorjem v odvisnosti od negativne napetost U_1 na katodi. Spreminjaj temperaturo in posebej natančno opazuj in izmeri položaje vseh vrhov v merjenih odvisnostih. Skiciraj odvisnosti pri petih različnih temperaturah, ko se slike primerno razlikujejo, to je približno pri temperaturah okoli 180, 160, 140 in 120°C.
2. Natančno določi položaje vrhov $U_{1,n} = U_2 + n\Delta E/e_0$ pri posameznih temperaturah in rezultate vnesi v tabelo. Razlike napetosti med zaporednimi maksimumi ustrezajo energiji, ki jo izgubijo elektroni pri posameznem neelastičnem trku z atomom Hg . Določi $\Delta E = E_1 - E_0 = e_0\Delta U_1$, kjer sta E_1 in E_0 energiji prvega vzbujenega in osnovnega stanja elektrona v zunanji lupini Hg .

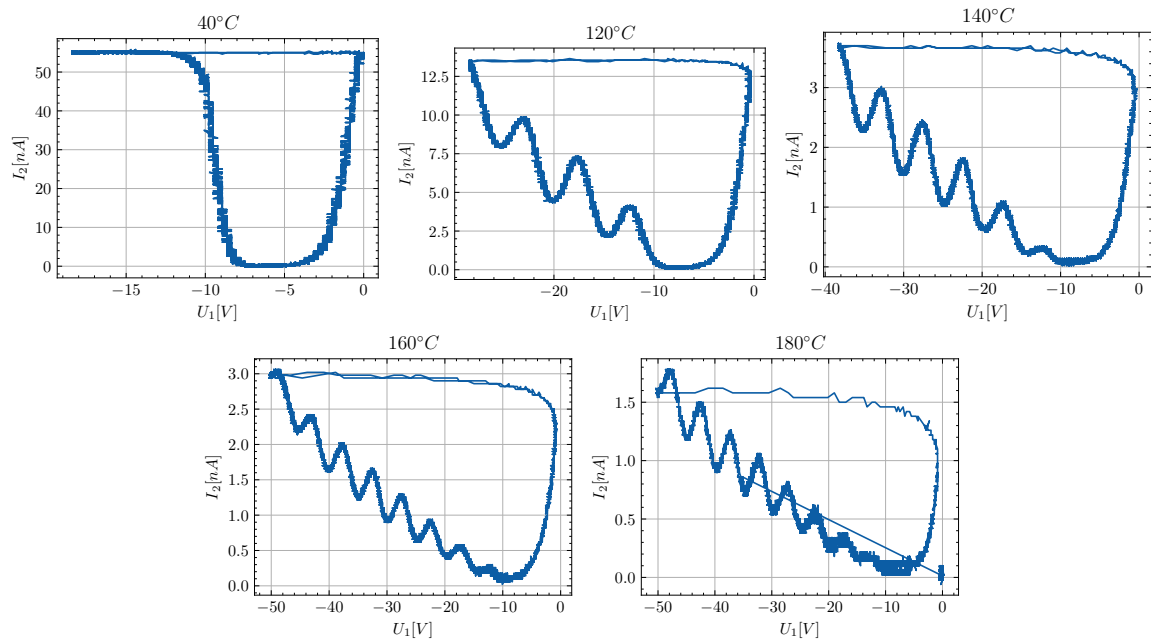
3 Rezultati in analiza

Eksperiment smo izvajali pri petih različnih temperaturah: 180°C, 160°C, 140°C, 120°C, kjer smo uporabili nastavitve predlagane v navodilih (glej 2), ter pri 40°C, kjer je bila U_1 nastavljena na 18V, saj sem imel drugače probleme s plazmo. Rezultate eksperimentov lahko prikažemo na grafih, najprej pri vsaki temperaturi posebej potem pa še vse na istem grafu (3, 4)

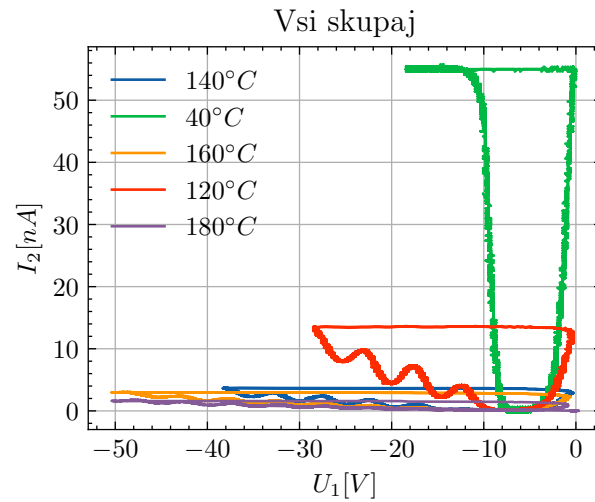
Temperatura (°C)	U_1 (V)	U_2 (V)	U_H (V)
160, 180	50	2.5	5.0
140	38	2.5	5.0
120	28	2.5	5.0

Slika 2: Priporočene nastavitve za posamezne temperature. Vir: navodila

Iz grafov se že takoj lepo vidi, da so vrhovi razmaknjeni enakomerno, kar potrjuje teorijo (to bomo pokazali še malo kasneje), predvsem pa se vidi tudi da lokacije vrhov niso odvisne od temperature - spremeni se le tok, saj se pri nižji temperaturi (nižji gostoti Hg plina) očitno poveča prepustnost elektronov.



Slika 3: Meritev pri vsaki temperaturi posebj



Slika 4: Vse meritve na istem grafu

Kar nam preostane storiti, je iz grafov kjer se to da (ne pri 40 stopinjah) odčitati ΔE , skupaj z napako, ki jo lahko ocenimo iz širine vrhov. Najprej bomo vse pozicije vrhov predstavili v tabeli 1. Bralec naj je pozoren da smo navedli absolutne vrednosti napetosti. Napako napetosti vrhov ocenimo na 0,4 V na podlagi oblike in širine vrhov.

T\U	1	2	3	4	5	6	7
120	12,5	17,6	22,9	/	/	/	/
140	12,3	17,4	22,5	27,7	32,9	/	/
160	/	17,4	22,5	27,6	32,6	37,7	43,3
180	/	/	22,5	27,5	32,4	37,5	42,8

Tabela 1: Napetost pri kateri se pojavijo vrhovi v voltih v odvisnosti od temperature v stopinjah celzija

Sedaj lahko določimo ΔE pri vsaki temperaturi posebj in nato še povprečje pri vseh temperaturah. Z upoštevanjem napak to naredimo na sledeč način:

1. izračunamo razlike sosednjih vrednosti v tabeli. Statistika nas nauči, da imajo te razlike napako $\sqrt{2} \cdot 0,4$ kjer je 0,4 napaka posamezne meritve,
2. pri vsaki temperaturi in nato še za vse skupaj izračunamo povprečje teh razlik. Napaka je tu izračunana kot $\sqrt{\frac{2}{N}} \cdot 0,4$, kjer je N število razlik ki smo jih upoštevali,
3. glede na majhno količino podatkov lahko napaki prištejemo (pitagorejsko) kar tudi največji odmik podatkov od povprečja, oziroma, ko računamo povprečje čez vse temperature, lahko za to napako upoštevamo samo 2/3 razlik, saj je teh dovolj.

To nas privede do tabele s poslednjimi rezultati 2:

T [°C]	ΔE [eV]	σ_E [eV]
120	5,2	0,5
140	5,2	0,3
160	5,2	0,7
180	5,1	0,5
vsi	5,1	0,2

Tabela 2: Tabela rezultatov eksperimenta

Rezultati meritve so torej kar natančni, a očitno smo bili malo preveč optimistični pri določitvi napake posameznega vrha. Literatura namreč navaja vrednost: $\Delta E = 4,66$ eV. Seveda je možno da se je pripetila tudi kakšna sistematična napaka, predvsem mogoče pri odčitavanju vrhov, saj so sami grafi precej grobi in je zato delo s kakršnim koli računalniškim orodjem zahtevno, delo *na uč* pa seveda nenatančno.