

Měření Planckovy konstanty skrze fotoemisní jev

Jakub Jan Růžička¹, Gabriel Hamrle², Lucie Boušková³

¹Gymnázium Jana Keplera, Praha; xruzja02@gjk.cz

²Gymnázium Jana Keplera, Praha; xhamga01@gjk.cz

³České reálné gymnázium, s. r. o., České Budějovice;
lucie.bouskova13@post.cz

Ing. Josef Bobek; ČVUT FJFI

Abstrakt

Cílem našeho miniprojektu bylo experimentálně zjistit Planckovu konstantu, jednu z nejdůležitějších fundamentálních konstant ve fyzice a kvantové mechanice. Na základě experimentu s využitím fotoemisního jevu nám vyšla konstanta celkem přesně. V práci jsme také ukázali, co znamená takzvaná prahová frekvence určující materiál katody, jež je též přímo úměrná změřené energii emitovaného elektronu.

1 Úvod

Na přelomu 19. a 20. století Heinrich Hertz poprvé pozoroval fotoemisní jev, který byl více prozkoumán o něco později jeho asistentem Phillipem Lenardem. Lenard připojil k elektrickému obvodu s mikroampérmetrem fotobuňku s anodou a katodou, která byla vyrobena z fotoemisního materiálu. Následně osvětloval fotoemisní povrch světlem o různých intenzitách a frekvencích. Vzniklý fotoelektrický proud byl dostatečně malý, aby jej bylo možné změřit mikroampérmetrem. Záporný pól zdroje napětí připojil k desce, která nebyla vystavena záření. Zvyšováním napětí došlo k jevu, kdy rozdíl potenciálů byl příliš velký a elektrony se vracely zpět, tedy obvodem netekl žádný proud. Naopak když bylo napětí nízké, tak proud byl zkreslen mikroampérmetrem.

Výsledky Lenardova experimentu tedy neodpovídaly klasické teorii fotoelektrického jevu. Fyzikální podstatu tohoto efektu objasnil na začátku 20. století Albert Einstein, který využil Planckovu teorii, že světlo je kvantováno (skládá se z malých nerozdělitelných částí, později známé jako fotony).

Max Planck k této teorii došel při vysvětlování a měření záření absolutně černého tělesa. Jak Planckova, tak Einsteinova teorie o kvantování světla byly v souladu a staly se základem kvantové mechaniky.

V Einsteinově vysvětlení je energie fotoelektronů E_e lineárně úměrná frekvenci fotonů f dopadajících na materiál

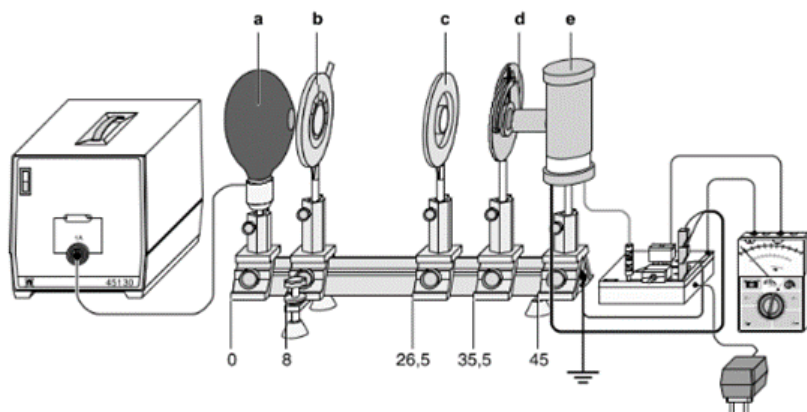
$$E_e = hf - hf_0 \quad (1)$$

kde Planckova konstanta h určuje sklon funkce a fotoelektrický jev má minimální prahovou frekvenci f_0 , která závisí na materiálu katody.

2 Experimentální postup

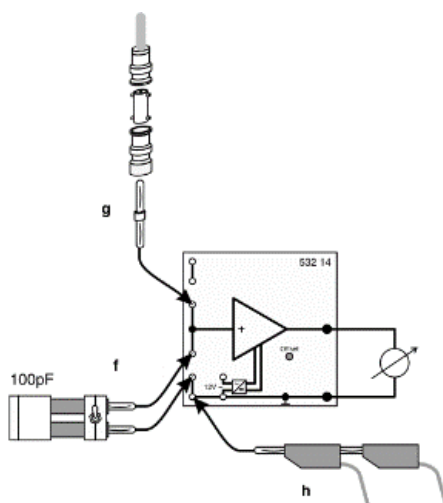
2.1 Pracovní pomůcky

Při měření jsme využili fotoelektrickou buňku, vysokotlakou rtuťovou lampu, zdroj napětí, irisovou clonu, čočku ($f = 100 \text{ mm}$), optickou lavici, 2 optické jezdece (90 mm), 3 optické jezdece (120 mm), a interferenční filtry (578 nm, 546 nm, 436 nm, 405 nm, 365 nm). Teoretické sestavení můžete vidět na Obrázku 1. Námí sestavenou aparaturu lze vidět na Obrázku 3.

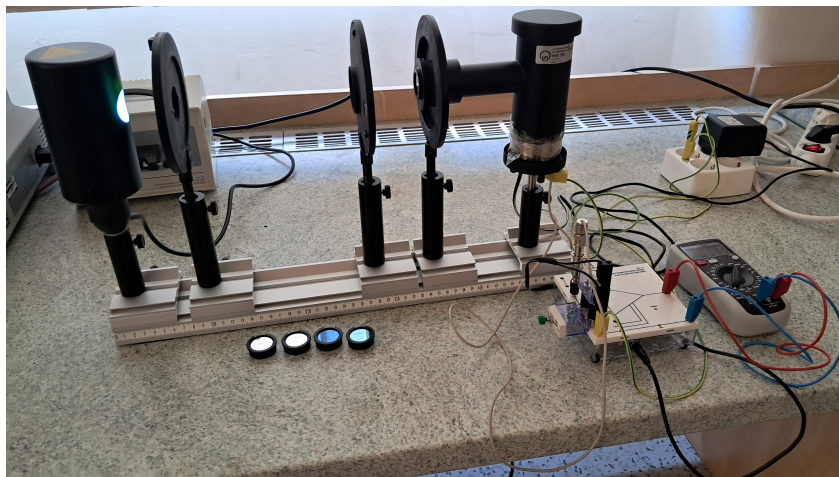


Obrázek 1: Aparatura pro měření Planckovy konstanty: (a) rtuťová lampu, (b) clona, (c) čočka, (d) interferenční filtr, (e) fotobuňka, (f) kondenzátor, (g) připojení optické lavice k obvodu, (h) uzemnění.[1]

Na zesílení a odečet signálu jsme využili STE klíčový spínač, zesilovač elektrometru, STE kondenzátor (100 pF, 630 V), voltmetr, BNC adaptér. Obvod zesilovače lze vidět na Obrázku 2.



Obrázek 2: Obvod zesilovače pro měření mezního napětí. [1]



Obrázek 3: Aparatura pro měření Planckovy konstanty.

2.2 Měření

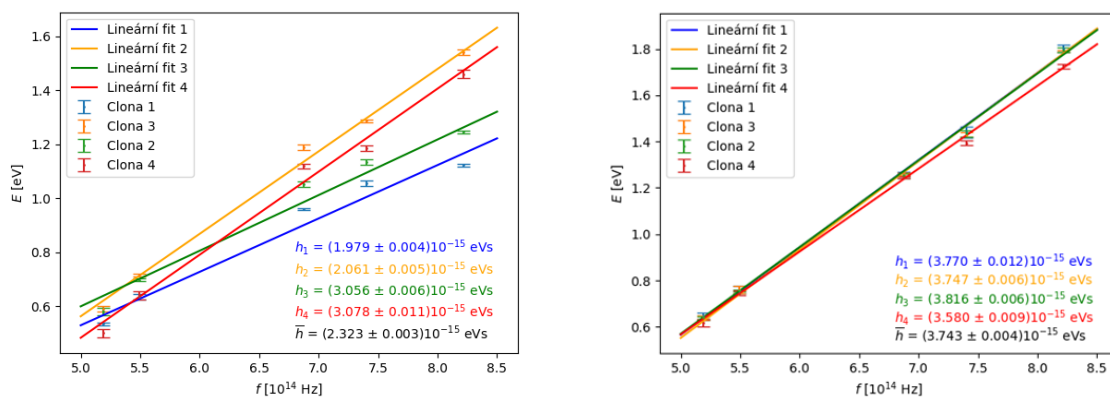
Planckovu konstantu jsme měřili na optické lavici, kterou jsme měli připojenou k obvodu se zesilovačem elektrometru pro měření mezního napětí V_{stop} . Mezní napětí je spojeno s maximální kinetickou energií elektronu

$$E_e = eV_{\text{stop}}, \quad (2)$$

kde e je elementární náboj. Měřili jsme velikosti mezního napětí V_{stop} v závislosti na vlnové délce světla λ , které dopadalo do fotobuňky přes jednotlivé interferenční filtry. Měření jsme opakovali pro čtyři různé polohy clony, které odpovídají různým intenzitám světla. Celkové měření jsme zopakovali.

3 Experimentální výsledky

Naměřená data jsme zpracovávali v programovacím jazyce Python s knihovnou SciPy, jednotlivými naměřenými body jsme fittovali přímku, jejíž směrnice určuje naměřenou Planckovu konstantu. V grafech na Obrázku 4 je E maximální kinetická energie elektronu, kterou spočítáme pomocí rovnice 2. Při prvním měření nám vážená průměrná hodnota se standardními odchylkami Planckovy konstanty vyšla $h = (2,323 \pm 0,003) \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$. Při druhém měření po zlepšení aparatury měla Planckova konstanta hodnotu $h = (3,743 \pm 0,004) \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$. Průměr clony se postupně zmenšoval od Clony 1 (nejvyšší intenzita světla) do Clony 4 (nejnižší intenzita světla).



Obrázek 4: Maximální kinetická energie elektronů E v závislosti na frekvenci f a otevření clony (intenzitě světla). První měření Planckovy konstanty (vlevo). Druhé měření Planckovy konstanty (vpravo.)

4 Závěr a diskuse

Naměřili a ověřili jsme Planckovu konstantu pomocí fotoelektrického jevu. Sestavili jsme aparaturu, která usměrňuje paprsek ze silného světelného zdroje na úzký světelný svazek. Části aparatury jsou pohyblivé, což mohlo zapříčinit nepřesnosti v měření. Při druhém měření jsme zvětšili plochu katody, na kterou dopadal světelný paprsek. Rozdíly aparatury byly patrné ve výsledcích měření, kdy provedené úpravy zajistily hodnoty přibližující se k reálné hodnotě Planckovy konstanty. Pro ještě přesnější měření bychom mohli použít laserový paprsek nebo lépe odstíněnou aparaturu. Námí změřená Planckova konstanta v prvním měření činila $h = (2,323 \pm 0,003) \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$, druhé měření $h = (3,743 \pm 0,004) \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ se blíží reálné hodnotě Planckovy konstanty $h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$. Z měření se také dá určit hodnota $b = -W_0 = (1,3065 \pm 0,0025) \text{ eV}$, která určuje energii potřebnou k vyražení elektronu z valenční vrstvy.

Poděkování

Rádi bychom poděkovali našemu garantovi miniprojektu Ing. Josefu Bobkovi, Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. a celému týmu akce Týden vědy.

Odkazy

1. KF, K. *Návod: Úloha 11 - Měření kvantových vlastností atomů: Měření Planckovy konstanty*. 2021.
2. LEYBOLD. *Determining Planck's Constant - Selection of Wavelengths Using Interference Filters on the Optical Bench*. 2021. Dostupné online z: https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P6/P6143_e.pdf [cit. 18.6.2024].
3. WIKIPEDIE. *Planckova konstanta*. 2024. [online] https://cs.wikipedia.org/wiki/Planckova_konstanta [cit. 18.6.2024].