

Měření Planckovy konstanty skrze fotoefekt

Gabriel Hamrle, Lucie Boušková, Jakub Jan Růžička

Úvod

Na přelomu 19. a 20. století Heinrich Hertz poprvé pozoroval fotoemisní jev, který byl více prozkoumán o něco později jeho asistentem Phillipem Lenardem. Jedná se o efekt, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce energie světelného záření. Lenard připojil k elektrickému obvodu s mikroampérmetrem fotobuňku s anodou a katodou, která byla vyrobena z fotoemisního materiálu a osvětlována světlem o různých intenzitách a frekvencích. 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 proud.

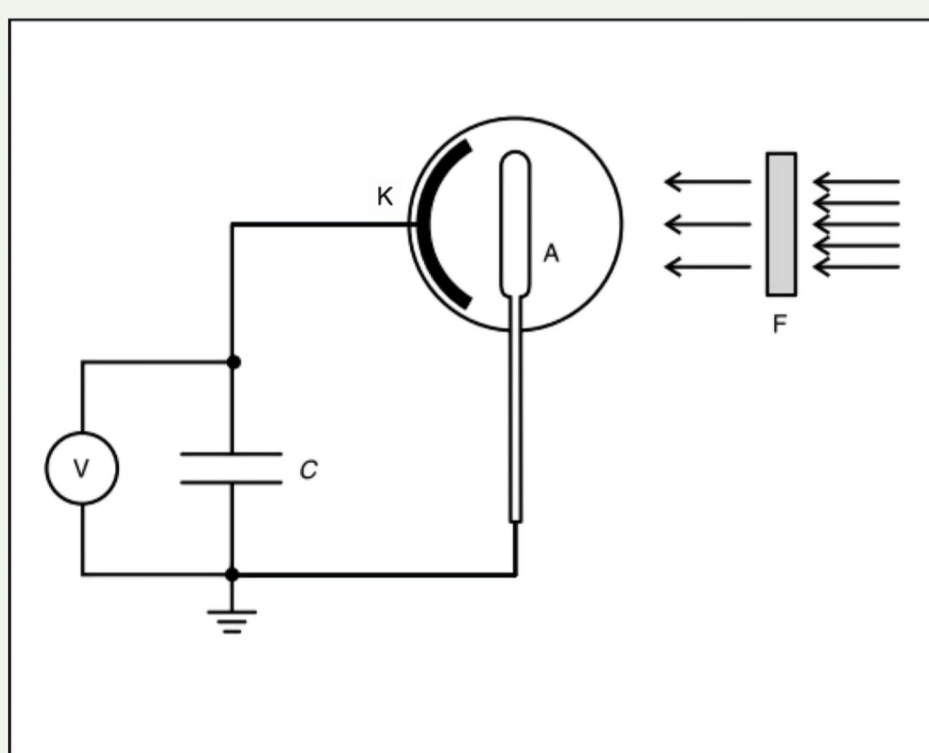
Výsledky Lenardova experimentu tedy neodpovídaly klasické teorii fotoelektrického jevu. Fyzikální podstatu tohoto efektu objasnil na začátku 20. století Albert Einstein, který využil Planckovu teorii, že světlo je kvantováno.

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.

Teorie

Pokud na materiál posvítíme světlem, stane se zajímavá věc, konkrétně fotony začnou předávat svoji energii valenčním elektronům, který se díky tomu začnou uvolňovat. Tomu se říká fotoemise, fotoelektrický jev nebo také fotoefekt. Uvolňováním elektronů můžeme vytvářet měřitelný elektrický proud a napětí. Ten také za těchto podmínek byl schopen sestavit německý fyzik Philipp Eduard Anton von Lenard.

Na Obrázku 1. lze vidět jednoduchý náčrtek jak může aparatura, která vytváří elektrický proud za pomoci fotoemise může fungovat. Konkrétně fotony dopadají na materiál, který nazýváme katodou. Uvolněné elektrony se začnou osouvat na anodu, čímž se vytváří proud, ale hlavně



Obrázek 1. Náčrtek zapojení napětí, které následně měříme fotoemisní buňky voltmetrem.

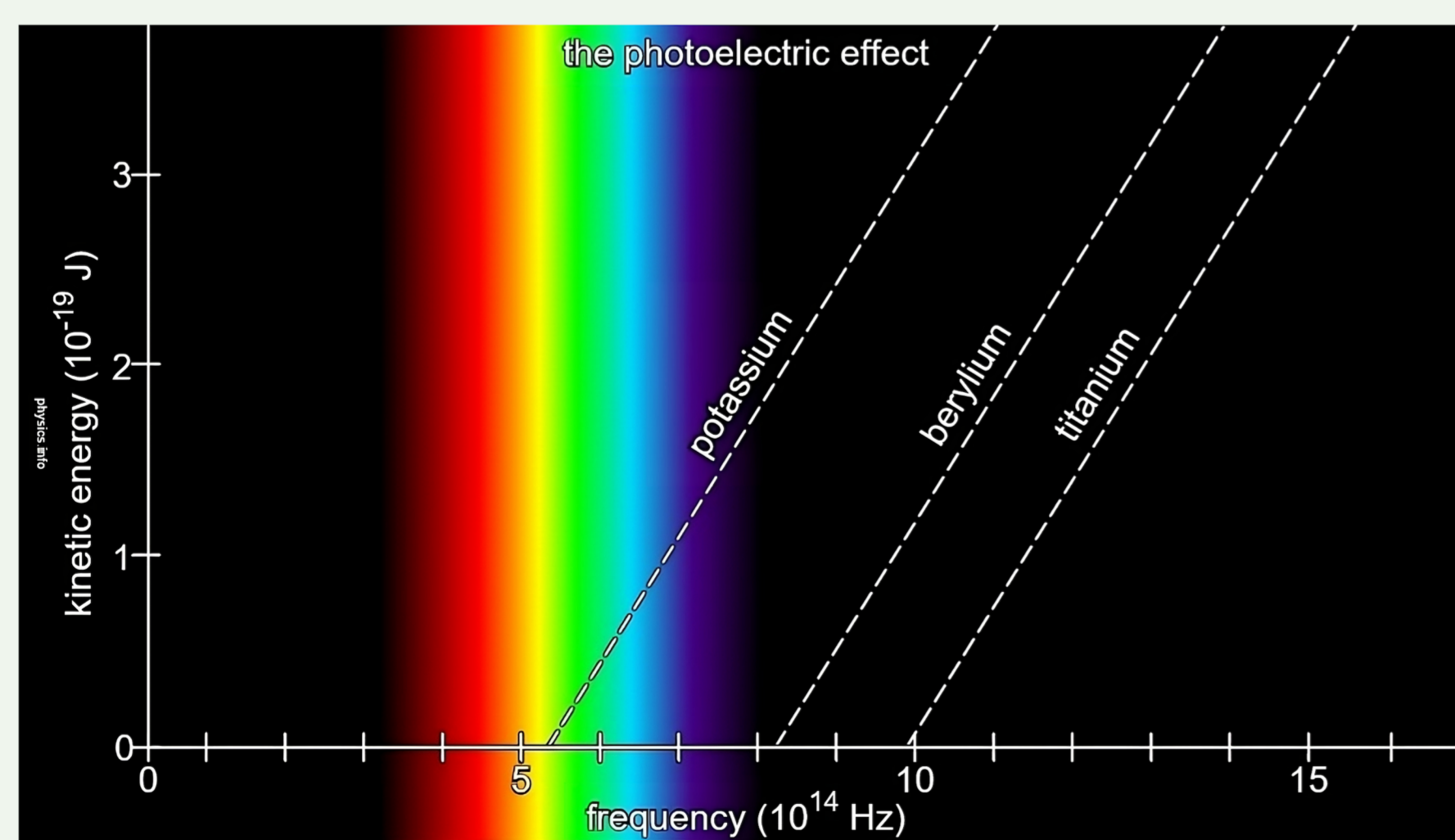
Z měření Lenarda vyšel najevo fakt, že napětí, co vzniká, je lineární úměrné frekvenci světla viz. Obrázek 2, rovnice (1) a zároveň směrnice této funkce určuje konstantu napříč všemi materiály. Tato konstanta dostala později jméno Planckova konstanta, která se vyskytuje napříč celou fyzikou i kvantovou mechanikou, kde hraje jako jedna z mála konstant důležitou roli v oboru.

Hodí se zmínit, že celkové změřené napětí se nemění podle množství světla dopadajícího na katodu. To dokazuje skutečnost, že světlo je tvořeno jednotlivými částicemi, které nazýváme fotony, a jeden foton vyrazí jeden elektron. Pověšme si, že od nějaké frekvence graf končí, což se nazývá prahová frekvence a je to minimální frekvence, kterou foton musí mít aby mohl předávat svoji energii elektronům určitého materiálu.

Jelikož měřené napětí označuje energii elektronů v oblasti mezi katodou a anodou, tak se dá konstatovat vztah, že energie elektronu se shoduje s napětím naměřeného voltmetrem pro elementární náboj viz. rovnice (2).

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

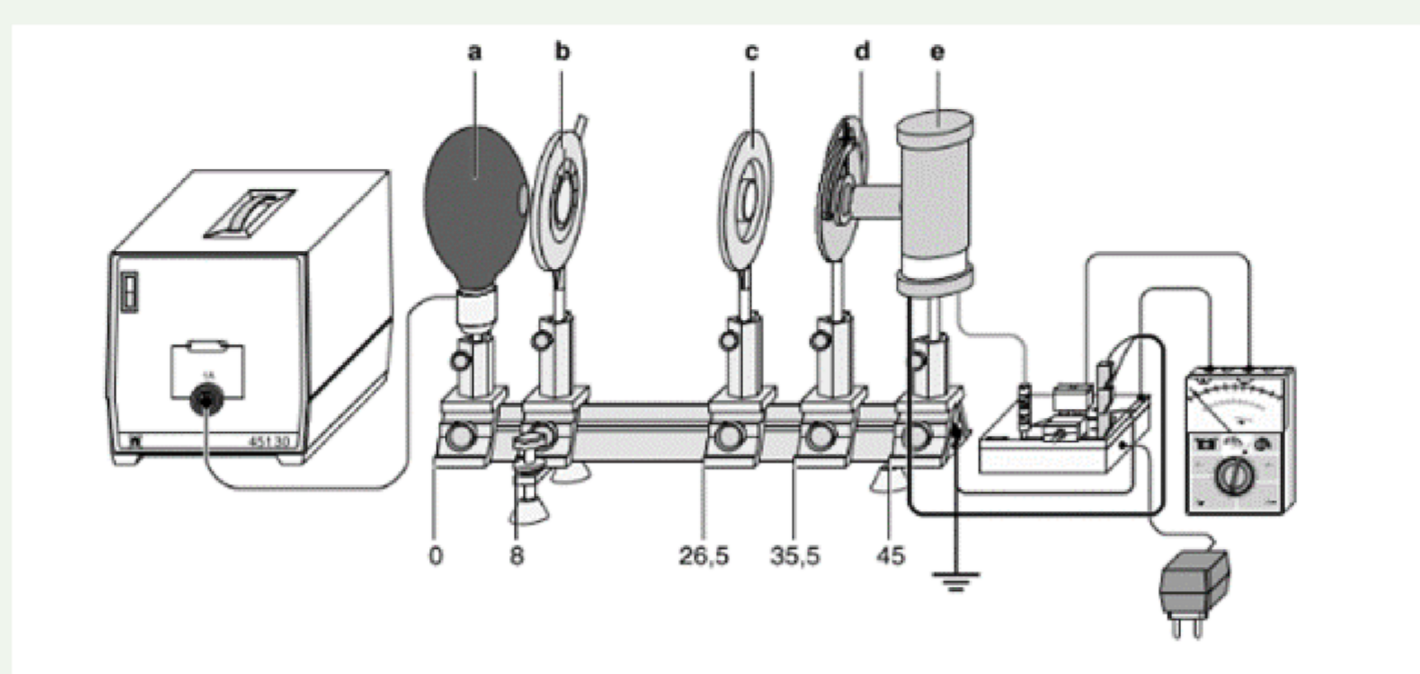
$$E_e = eV_{stop} \quad (2)$$



Obrázek 2. - Graf závislosti kinetické energie elektronu na frekvenci působícího světla. Různé materiály potřebují jinou minimální frekvenci fotonu pro emitování elektronu

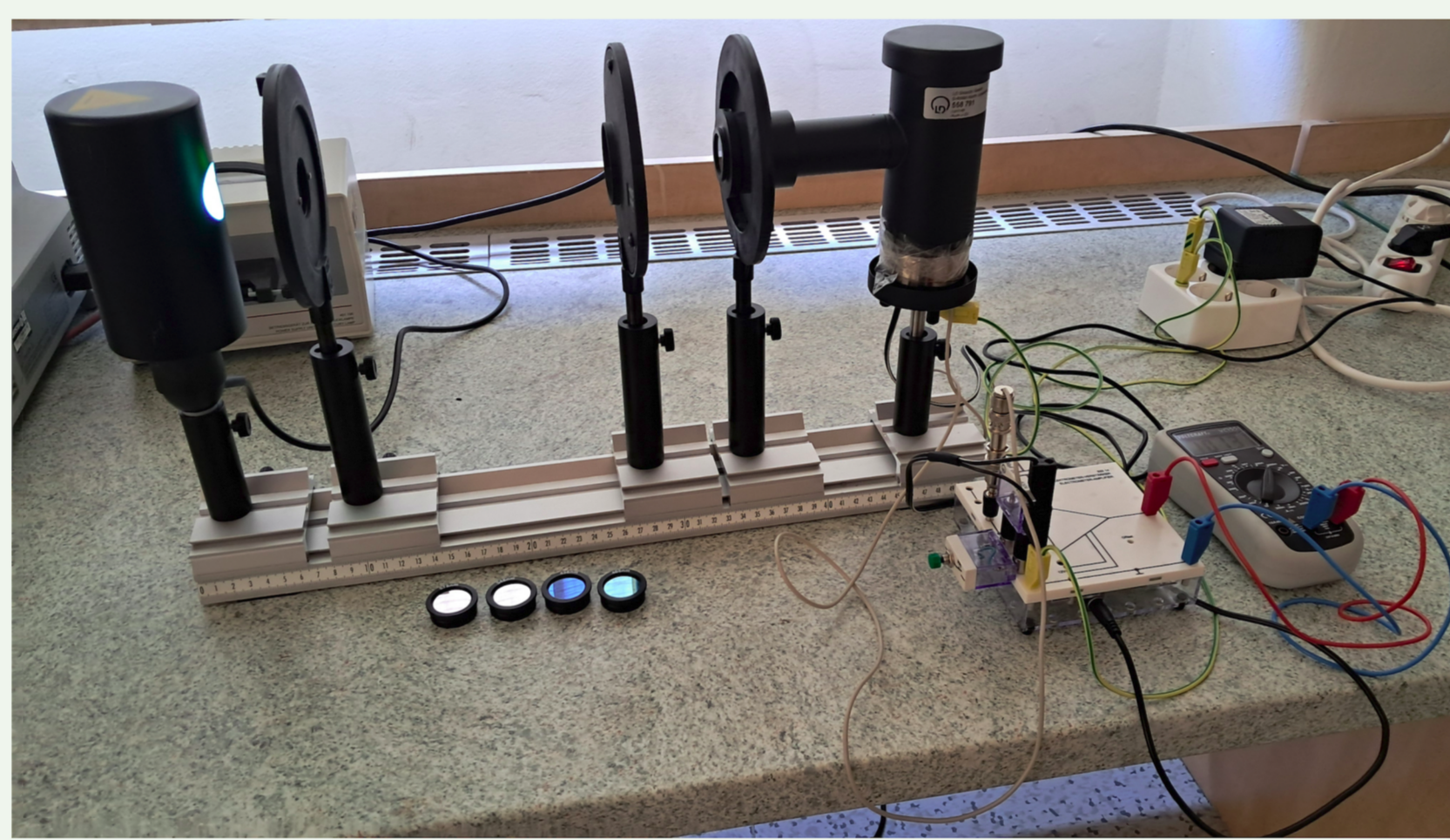
Metodika

Náš experiment se v základu moc neliší od experimentu od pana Lenarda. Námí postavená sestava se skládala z optické lavice, na kterou jsme postupně nasadili rtuťovou lampu, clonu, čočku, interferenční filtr a fotobuňku, všechny nacházející se na vlastních jezdcích umožňující volný pohyb po lavici pro přesnější koncentraci světla na katodu. Clonu používáme v soupravě, abychom mohli změřit, zda-li je skutečně množství světla a jeho intenzita irrelevantní. Čočka slouží k usměrnění rozšířeného světla z lampy. Fotobuňka byla od filtru za clonou, aby se zabránilo vstupu jiné vlnové délky kromě té určené filtrem viz. Obrázek 3. Konkrétně jsme používali filtry pro 365 nm, 405 nm, 436 nm, 546 nm a 578 nm vlnové délky světla. Volný prostor mezi filtrem a čidlem jsme zastínili černou trubici pro odstínění nefiltrovaného světla z okolí soupravy. Na fotobuňku pak ještě byl navázán zesilovač, aby napětí bylo lépe měřitelné.



Obrázek 3. Experimentální nastavení aparatury

Analýzou dat z prvního měření nám došlo, že chybné výsledky musí vznikat někde v sestavě. Po inspekci bylo zřejmé, že fotobuňku nelze posunout dostatečně vysoko na úroveň lampy a tudíž nelze pořádně zasadit trubici do filtru. Krytku jsme tedy připevnili v lepší pozici lepicí páskou viz. Obrázek 4, což umožnilo trochu přesnější výsledky.



Obrázek 4. - Sestavená aparatura z dostupných součástek

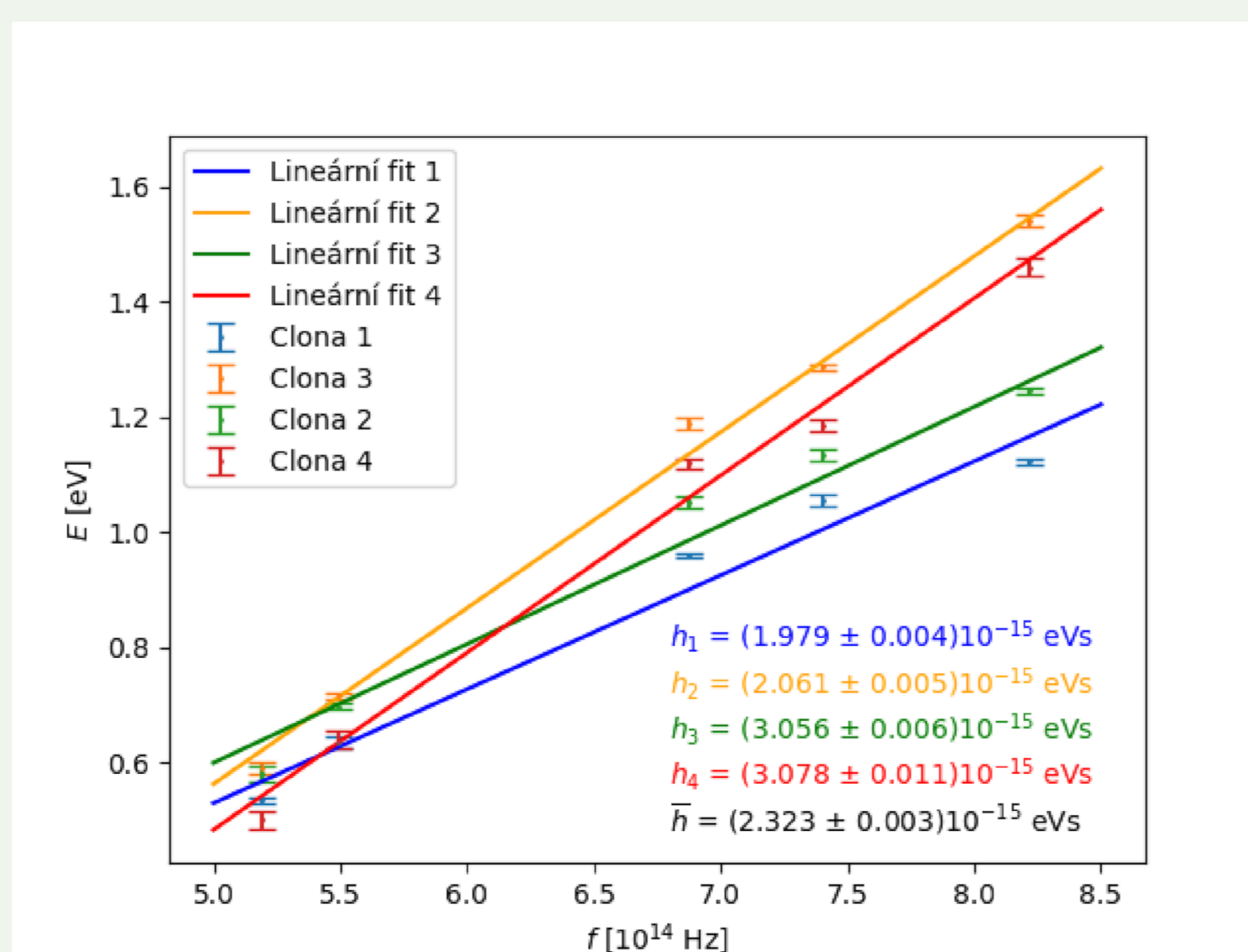
Vypracování

Naměřená data jsme zpracovávali v programovacím jazyce Python s knihovnou SciPy a Matplotlib, jednotlivými naměřenými body jsme prokládali přímkou, jejíž směrnice určuje naměřenou Planckovu konstantu.

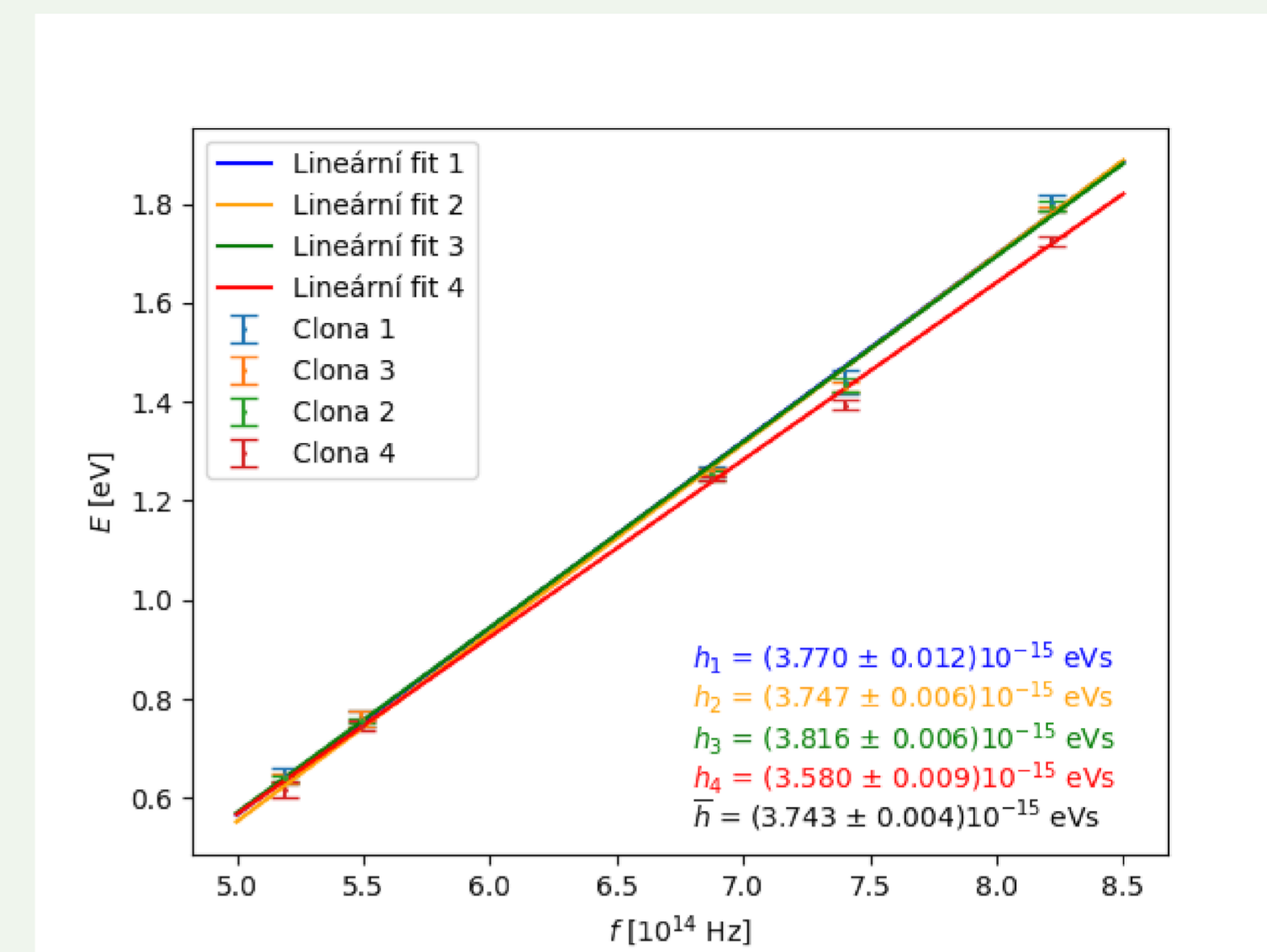
V grafech na Obrázku 5. a 6. je E maximální kinetická energie elektronu, kterou spočítáme pomocí rovnice (2). Na Obrázku 5. lze vidět černě vyznačenou váženou průměrnou hodnotu Planckovy konstanty se standardními odchylkami, kterou lze porovnat s reálnou hodnotou v rovnici (3).

Průměr clony se postupně zmenšoval od Clony 1 (nejvyšší intenzita světla) do Clony 4 (nejnižší intenzita světla). Podle teorie by na velikosti průměru clony neměla energie ani frekvence záviset, ale oba grafy ukázaly opak nepodložený ani teorií, ani výpočty.

$$h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \quad (3)$$



Obrázek 5. - Graficky znázorněné výsledky prvního měření



Obrázek 6. - Graficky znázorněné výsledky druhého měření

Pokud jsme z měření dokázali určit lineární funkci podle rovnice (1), není těžké dopočítat minimální energii fotonů pro předání elektronů W , viz rovnice (4). Výsledek lze vidět v rovnici (5).

$$W = -hf_0 \quad (4)$$

$$W = (1,3065 \pm 0,0025) \text{ eV} \quad (5)$$

Povšimněme si, že reálná směrodatná odchylka je velmi nízká vůči reálným hodnotám. To lze vysvětlit tím, že odchylka je chyba měření voltmetru, který ovšem nezapočítává ostatní systémové chyby. Mezi hlavní z chyb lze zmínit drát navázaný na katodu, na který také svítilo světlo, čímž jsme vyvolali fotoemisi na jiný materiál, než ze kterého byla vzrobena katoda. Další nepřesnosti mohly vznikat kvůli stárí plynu ve fotovoltaičce. Zároveň také mohl nastat problém u zesilovače, ale to nelze dobře určit.



Obrázek 7. - Fotovoltaička s fotoemisním drátkem uprostřed katody.

Závěr

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 odstíněnou aparaturu, či zbavit se drátu na katodě, na kterém působila nechtěná fotoemise.

Zdroje

2. LEYBOLD. Determining Planck's Constant - Selection of Wavelengths Using Interference Filters on the Optical Bench. 2021. [online] 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], Dostupné online z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Planckova_konstanta [cit. 18.6.2024].



Autoři: Gabriel Hamrle, Gymnázium Jana Keplera; Lucie Boušková, České reálné gymnázium, s. r. o., České Budějovice; Jakub Jan Růžička, Gymnázium Jana Keplera

Poděkování: Děkujeme našemu garantovi miniprojektu Ing. Josefu Bobkovi, organizátoru Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. a celému týmu akce Týden vědy

Kontakty: Gabriel Hamrle: xhamga01@gjk.cz; Lucie Boušková: lucie.bouskova13@post.cz; Jakub Jan Růžička, xruzja02gjk.cz [2024]

