

Měření kvantových vlastností atomů: Měření Planckovy konstanty

1 Pracovní úkoly

1. Sestavte aparaturu pro stanovení Planckovy konstanty podle návodu.
2. Vykreslete závislost energií elektronů a frekvence záření do grafu. Z naměřených hodnot určete prahovou frekvenci fotokatody.
3. Z naměřených dat stanovte Planckovu konstantu a výsledek porovnejte s tabulkovou hodnotou.

2 Pracovní pomůcky

fotoelektrická buňka, vysokotlaká rtuťová lampa+zdroj napětí, irisová clona, čočka ($f = 100$ mm), interferenční filtry (578 nm, 546 nm, 436 nm, 405 nm, 365 nm), STE klíčový spínač, zesilovač elektrometru, STE kondenzátor (100 pF, 630 V), voltmetr, optická lavice, 2× optický jezdec (90 mm), 3× optický jezdec (120 mm), BNC adaptér

3 Základní pojmy a vztahy

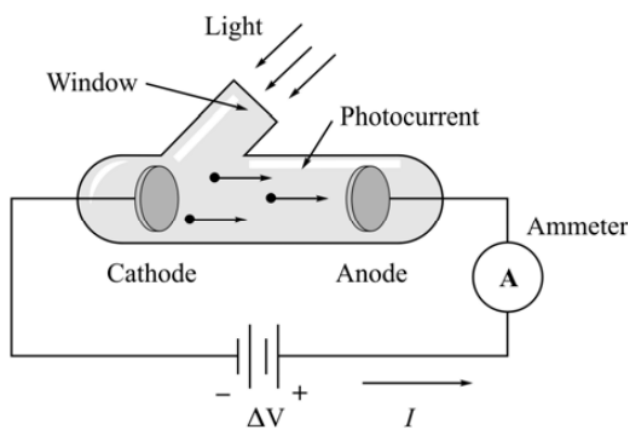
3.1 Fotoelektrický jev

Za určitých okolností je možné využít světlo k uvolnění elektronů z povrchu pevné látky. Tento proces je známý jako **fotoelektrický jev**, **fotoelektrická emise** či **fotoemise**. Materiál, který je schopen vykazovat tyto jevy, se nazývá **fotoemisivní materiál** a emitované elektrony se nazývají **fotoelektrony**.

Fotoelektrický jev poprvé pozoroval v roce 1887 Heinrich Hertz během experimentů s jiskrovým generátorem. Avšak, byl to až Philipp Lenard, asistent Hertze, který podrobněji prostudoval tento jev v roce 1900. Kvůli tomuto účelu Lenard zkonstruoval experiment, ve kterém použil dvě kovové desky, které nejprve očistil a potom umístil do vakua. Desky byly umístěny naproti sobě do vakuové skleněné trubice, kam bylo následně vpouštěno světlo takovým způsobem, aby ozařovalo pouze kovovou desku vyrobenou z fotoemisivního materiálu, která byla předmětem vyšetřování. Takováto trubice se nazývá **fotobuňka**. Lenard připojil svou fotobuňku k obvodu s napájením, které bylo možné libovolně měnit, a mikroampérmetrem, jak je znázorněno schematicky na obr. 1. Potom osvětloval fotoemisivní povrch světlem různých frekvencí a intenzit. Fotoelektrický proud generovaný tímto způsobem byl dost malý, ale dal se měřit pomocí mikroampérmetru. Tento proud odpovídal intenzitě, s jakou fotoelektrony opouštěly povrch fotoemisivního materiálu.

Nicméně všimněme si, že záporný pól zdroje napětí je připojen k desce, která není vystavována záření. Toto zapojení vytváří potenciálový rozdíl, který přitahuje fotoelektrony zpět k povrchu fotoemisivního materiálu. Když je napájecí zdroj nastaven na nízké napětí, zachycuje nejméně energetické elektrony a snižuje proud přes mikroampérmetr. Se zvyšováním napětí mezi deskami se stále více elektronů vrací zpět, až nakonec žádný z nich není schopen opustit kovový povrch a mikroampérmetr ukazuje nulovou hodnotu proudu. Potenciál, při kterém k tomu dojde, se nazývá **zastavovací potenciál** a odpovídá maximální kinetické energii fotoelektronů. To, co Lenard při zkoumání zjistil, lze shrnout do následujících bodů:

- Proud I je úměrný intenzitě světla, tzn. zvyšováním intenzity světla se zvyšuje počet fotonů v paprsku světla, a tím i počet emitovaných elektronů. Nezvyšuje se však energie, kterou každý elektron při emisi získá.



Obr. 1: Schéma Lenardova experimentu, který se skládá z katody a anody umístěných ve fotobuňce, miliampérmetru a nastavitelného napěťového zdroje.

- Proud I lze pozorovat bez zpoždění (za méně než 0,1 s po vystavení desky zdroji světla).
- Fotoelektrony jsou emitovány pouze tehdy, když frekvence světelného záření překročí tzv. prahovou frekvenci f_0 . Hodnota f_0 závisí na typu kovu, ze kterého je katoda vyrobena.
- Pokud je potenciálový rozdíl ΔV záporný (anoda záporná vzhledem ke katodě), proud I klesá, dokud zcela neustane (při $\Delta V = -V_{\text{stop}}$). V_{stop} se nazývá zastavovací potenciál a jeho hodnota je pro světlo o dané frekvenci stejná bez ohledu na jeho intenzitu.

Výsledky tohoto ale i jiných experimentů zaměřených na fotoelektrický jev však neodpovídaly klasické teorii elektromagnetického záření. Při interakci s elektrony se světlo jednoduše nechovalo tak, jak by mělo. Oprava těchto nesouladů vyžadovala nejen jakousi náplast, ale i přebudování velké části fyziky od základů.

3.2 Einsteinovo vysvětlení

Fyzikální podstatu fotoelektrického jevu objasnil až Albert Einstein v roce 1905. Uvědomil si totiž, že světlo se chová tak, jako by se skládalo z drobných částic (původně nazývaných kvanta a později pojmenovaných fotony) a že energie každého kvanta byla úměrná frekvenci elektromagnetického záření, jehož byla součástí. Připomeňme, že Planck, který přišel s pojmem kvantovaného elektromagnetického záření jakožto způsobem řešení technického problému s idealizovanými zdroji elektromagnetického záření nazývanými černá tělesa, nevěřil, že by záření skutečně bylo rozděleno na drobná kvanta, jak naznačovala jeho matematická analýza. Celý tento koncept považoval pouze za prostředek, jak získat správné odpovědi. Einsteinovo řešení spočívalo v tom, že uznal tento Planckův model jako skutečný a rozumný popis reality. To, co vnímáme jako spojitou vlnu elektromagnetického záření, může být ve skutečnosti považováno za tok diskrétních částic.

Einstein popsal fotoelektrický jev pomocí vzorce, který dává do souvislosti maximální kinetickou energii fotoelektronů (E_e) s frekvencí absorbovaných fotonů (f) a prahovou frekvencí fotoemisivního materiálu (f_0)

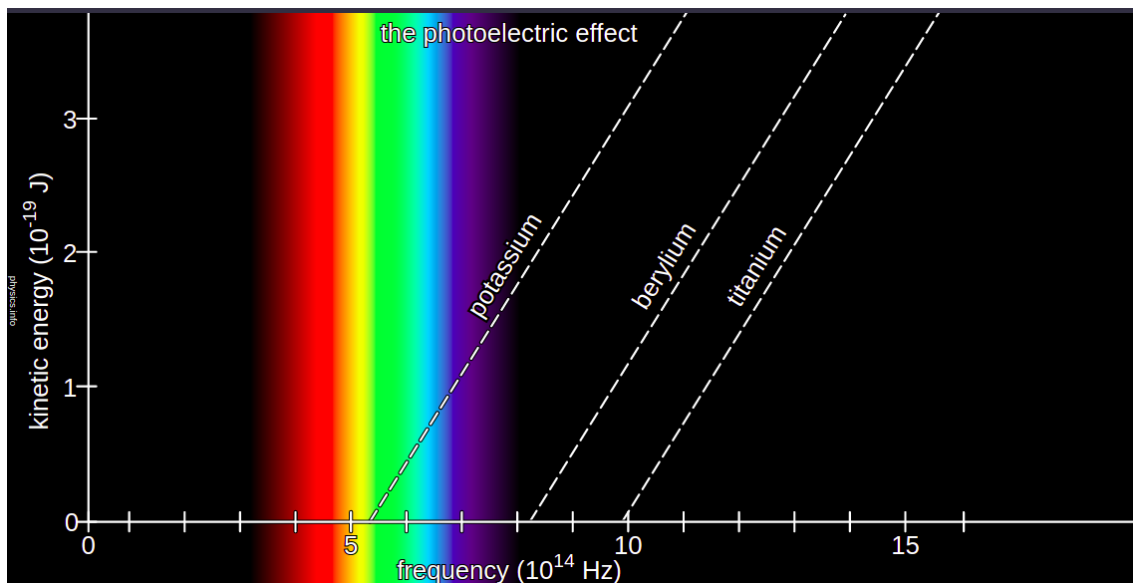
$$E_e = hf - hf_0, \quad (1)$$

kde ($hf_0 = W_0$) nazýváme také jako výstupní práci daného materiálu. Maximální kinetickou energii fotoelektronů lze také určit z hodnoty potenciálu V_{stop}

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

Podstata tohoto jevu je rovněž znázorněna na obr. 2. Zde energie elektronů narůstá nad prahovou hodnotou s frekvencí jednoduchým lineárním způsobem. Všechny tři křivky mají stejný sklon

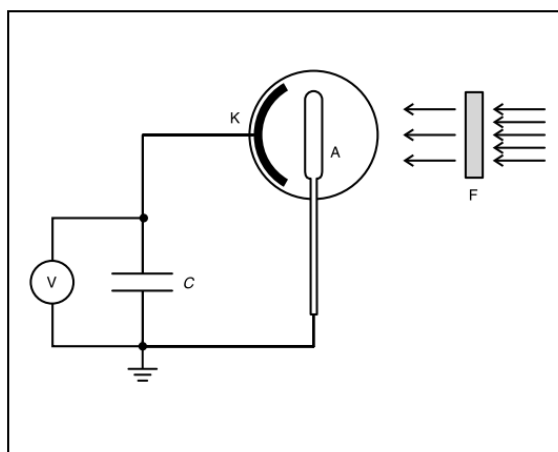
(směrnice odpovídá Planckově konstantě), což ukazuje, že vztah mezi energií a frekvencí je analogický pro všechny materiály. Pod prahovou frekvencí k fotoemisii nedochází. Každá křivka má jiný průsečík s vodorovnou osou, což ukazuje, že prahová frekvence je funkcí materiálu.



Obr. 2: Energie elektronů v závislosti na prahové frekvenci materiálu.

4 Postup měření

Schematické znázornění experimentu pro měření Planckovy konstanty pomocí fotoelektrického jevu je znázorněno na obr. 3. Monochromatické světlo (produkované filtrem vlnové délky F) dopadá na katodu K fotobuňky. Stimulované fotoelektrony putují na anodu A a nabíjejí kondenzátor C až na mezní napětí V_{stop} .



Obr. 3: Schematické znázornění experimentu pro měření Planckovy konstanty pomocí fotoelektrického jevu [1].

4.1 Nastavení optické lavice

Vysokotlaká rtuťová lampa dosáhne plné intenzity po zhruba deseti minutách zahřívání. Před zahájením experimentu tedy zapněte vysokotlakou rtuťovou lampu, abyste mohli začít měřit,

jakmile sestavíte experimentální aparaturu. Při sestavování aparatury podle obr. 4 postupujte následovně:

1. Namontujte vysokotlakou rtuťovou lampu na označené místo pomocí optického jezdce ($H = 90 \text{ mm}$), připojte ji k elektrické síti a poté ji zapněte.
2. Namontujte fotobuňku na označené místo pomocí optického jezdce ($H = 90 \text{ mm}$); sejměte kryt a vyrovnejte fotobuňku tak, aby potažený černý povrch směřoval k rtuťové lampě.
3. Namontujte clonu na optickou lavici ve vyznačené poloze pomocí optického jezdce ($H = 120 \text{ mm}$).
4. Namontujte čočku do označené polohy pomocí optického jezdce ($H = 120 \text{ mm}$) a upravte její výšku tak, aby střed čočky byl ve stejné výšce jako střed clony.

Světlo z rtuťové lampy by nyní mělo produkovat ostrý světelný bod na černém povlaku (citlivé oblasti) fotobuňky. Světlo by nemělo dopadat na kovový kroužek ani na část černě potažené oblasti, ke které jsou připojeny kontakty. Okrajové zóny by také neměly být osvětleny. Chcete-li toho docílit, proveďte následující postup a pro dosažení optimálního obrazu jej opakujte tak často, jak to bude nutné:

1. Změňte výšku clony a čočky tak, aby světelná skvrna dopadala na černou zónu fotobuňky; ujistěte se, že střed čočky je vždy na stejné úrovni se středem clony. Možná budete muset upravit výšku a sklon fotobuňky (pomocí šroubů pod základnou).
2. Pomocí clony upravte velikost světelného bodu tak, aby osvětloval největší možnou oblast černé zóny fotobuňky, aniž by byly osvětleny vnější zóny, kovový kroužek nebo kontakty na černém povlaku.
3. Podle potřeby zaostřete světelný bod pohybem objektivu podél optické lavice.

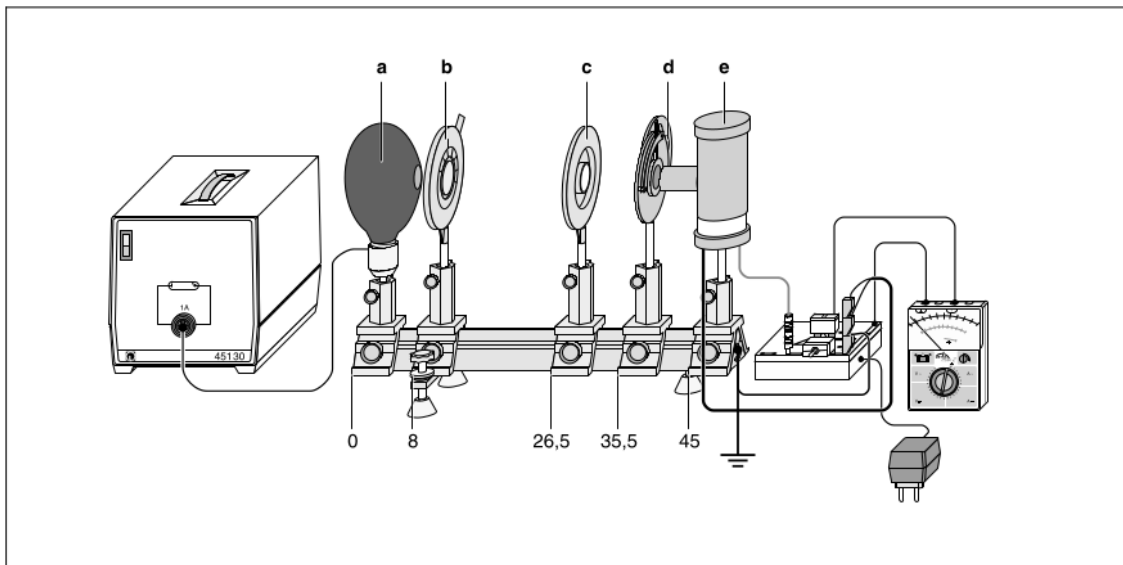
Když se vám zdá, že máte dostatečně ostrý světelný bod a jsou splněny všechny podmínky zmíněné výše, proveďte následující kroky:

1. Umístěte kryt na fotobuňku.
2. Umístěte filtr s clonou přímo před fotobuňku pomocí optického jezdce ($H = 120 \text{ mm}$) a propojte clonu filtru s krytem fotobuňky, aby se zabránilo rozptýlenému světlu v přístupu k fotobuňce.

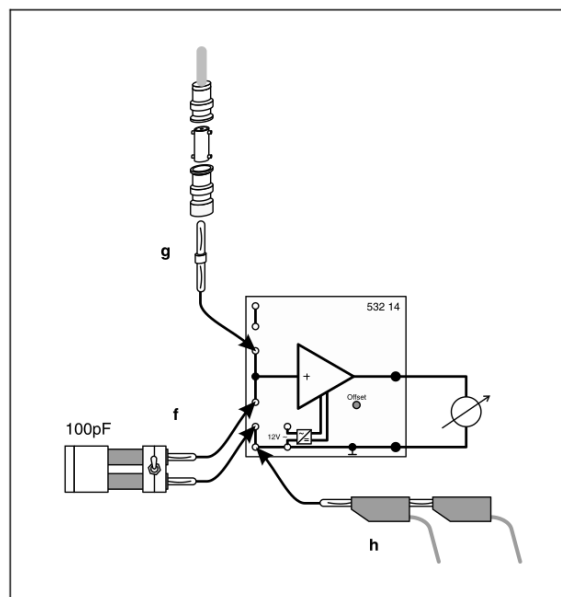
4.2 Elektrometrický zesilovač

Fotoelektrony dopadající na kovový prstenec fotobuňky nabíjí kondenzátor a generují mezní napětí V_{stop} potřebné pro stanovení kinetické energie. Elektrometrický zesilovač (obr. 5) se používá k měření napětí na kondenzátoru. Pro jeho zapojení postupujte následovně:

1. Připojte dva konektory (f) na zesilovací desku a na ně připojte kondenzátor 100 pF a klíčový spínač.
2. Spojte spojovací konektor (g), adaptér BNC/4mm a přímý BNC a připojte je k šedému kabelu fotobuňky.
3. Připojte oba černé kabely (h) fotobuňky k uzemnění na zesilovači elektrometru.
4. Připojte multimetr k výstupu zesilovače elektrometru.
5. Připojte zesilovač elektrometru k elektrické síti pomocí 12 V zásuvné napájecí jednotky.
6. Připojte optickou lavici (případně fotobuňku) k uzemnění elektrického zesilovače elektroměru a tuto svorku připojte k vnějšímu uzemnění elektrické sítě.



Obr. 4: Experimentální nastavení na optické lavici s pozicemi v cm, které se skládá z vysokotlaké rtuťové lampy (a), clony (b), čočky (c), interferenčního filtru (d) a fotobuňky (e) [1].



Obr. 5: Obvod zesilovače elektrometru pro měření mezního napětí V_{stop} [1].

4.3 Provedení experimentu

1. Zapněte multimetr a nastavte přepínač rozsahu na 1 V DC (pokud se používá tento typ voltmetru).
2. Umístěte interferenční filtr pro žluté světlo ($\lambda_{\text{Hg}} = 578 \text{ nm}$) do dráhy paprsku.
3. Vybíjejte kondenzátor přidržetím klíového spínače, dokud multimetr nukáže hodnotu 0 V.
4. Spusťte měření uvolněním klíového spínače; počkejte asi 30 s až 1 minutu, dokud se kondenzátor nenabije na mezní napětí V_{stop} . Zapište si naměřenou hodnotu pro V_{stop} .
5. Dejte interferenční filtr pro zelené světlo ($\lambda_{\text{Hg}} = 546 \text{ nm}$) do dráhy paprsku a měření opakujte.

6. Rozšiřte rozsah měření na 3 V (pokud se používá tento typ voltmetru) a opakujte měření s modrými ($\lambda_{\text{Hg}} = 436 \text{ nm}$), fialovými ($\lambda_{\text{Hg}} = 405 \text{ nm}$) a UV ($\lambda_{\text{Hg}} = 395 \text{ nm}$) interferenčními filtry.
7. Změňte intenzitu dopadajícího světla na fotobuňku pomocí clony filtru a změřte mezní napětí V_{stop} pro každé nastavení.

5 Poznámky

- Nevystavujte oči přímému záření z lampy.
- Po určitém čase, lampa může dosáhnout cca 200°C .
- Napětí na kondenzátoru může být ovlivněno indukčními efekty. Pohybujte touto částí během experimentu co nejméně.
- Místnost nemusíte zatemňovat. Nemá to žádný vliv na výsledky měření.
- Pokud je clona příliš zavřená, může to ovlivnit rovnoměrné osvětlení světelného bodu na katodě.
- Na samotné měření napětí se používá multimetr. Pokud se rozhodnete v experimentu použít klasický digitální multimetr, tak můžete ignorovat bod 1 a první polovinu bodu 6 v postupu Provedení experimentu. Pokud ale použijete analogový multimetr, který byl součástí původní sady, tak tyto body nemůžete vynechat.

6 Otázky

1. Co je fotoelektrický jev?
2. Jak závisí energie uvolněných elektronů na frekvenci a intenzitě záření?
3. Co je to prahová frekvence materiálu?

Reference

- [1] Leybold: *Determining Planck's constant - Selection of wavelengths using interference filters on the optical bench*. Dostupné online z: https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P6/P6143_e.pdf [cit. 3.3.2021].