

Jméno: Simona Velichová

Datum měření: 22. 3. 2023

Číslo skupiny: 7 - středa 8:00

Doba vypracování: 15 h

Klasifikace:

## 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 Použité přístroje a pomůcky

Fotoelektrická buňka, vysokotlaková 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, 2x optický jezdec (90 mm), 3x optický jezdec (120 mm), BNC adaptér.

### 3 Teoretický úvod

Fotoelektrický jev je proces, při kterém dochází k uvolnění elektronů z povrchu pevné látky využitím světla. Materiál schopen vykazování tohoto jevu se nazývá fotoemisní materiál a emitované elektrony se nazývají fotoelektrony.

Albert Einstein popsal fotoelektrický jev pomocí vzorce dávajícího do souvislosti maximální kinetickou energii fotoelektronů  $E_e$  s frekvencí absorbovaných fotonů  $f$  a prahovou frekvencí fotoemisního materiálu  $f_0$

$$E_e = hf - hf_0 = hf - W_0, \quad (1)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta a  $W_0$  výstupní práce materiálu. Energie je tedy přímo závislá na frekvenci a vůbec nezávisí na intenzitě záření. Intenzita světla sice zvětšuje počet uvolněných elektronů, avšak nezvyšuje energii. Fotoelektrony jsou emitovány jen v případě, když frekvence světelného záření překročí prahovou frekvenci. Tato hodnota závisí na typu použitého materiálu. Maximální kinetickou energii fotoelektronů lze rovněž určit ze zastavovacího potenciálu  $V_{\text{stop}}$

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

kde  $e$  je elementární náboj.

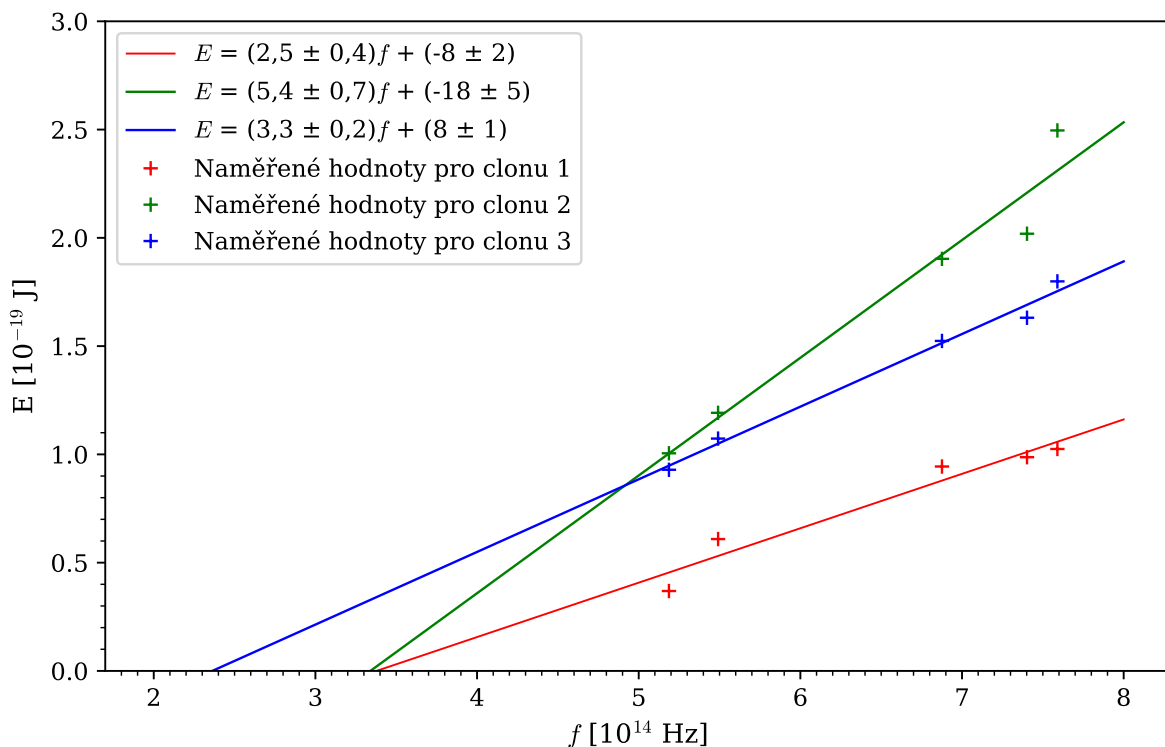
## 4 Postup měření

Postupujeme podle instrukcí v [1]. Začneme sestavením aparatury pro stanovení Planckovy konstanty podle Obr. 3 a Obr. 4. Na okraj optické lavice připevníme rtuťovou lampu a zapneme ji. Dále připevníme ve vhodných vzdálenostech irisovou clonu, čočku a fotoelektrickou buňku. Před přikrytím fotobuňky stínícím krytem nastavíme clonu a čočku tak, aby se paprsek dopadající na katodu nedotýkal vedoucích drátků. Po splnění této podmínky lavici uzemníme a elektrometrický zesilovač zapojíme do zdroje. Do nástavce umístíme žlutý interferenční filtr (578 nm) a přidržíme klíčový spínač, dokud napětí na připojeném voltmetru neklesne na hodnotu 0 V. Jakmile se tak stane, spínač uvolníme a čekáme přibližně minutu než se napětí ustálí na hodnotu zastavovacího potenciálu  $V_{\text{stop}}$ . Takto postupujeme i pro ostatní interferenční filtry: zelený (546 nm), modrý (436 nm), fialový (405 nm), a UV (365 nm). Měření opakujeme pro 2-3 různé nastavení clony.

## 5 Vypracování

Vybraná aparatura pro stanovení Planckovy konstanty byla úspěšně sestavena. Naměřené hodnoty zastavovacího potenciálu pro tři různá nastavení clony jsou k nahlédnutí v Tab. 1. Z těchto hodnot byla vypočtena maximální kinetická energie fotoelektronů pomocí vzorce (2).

Vykreslená závislost maximální kinetické energie elektronů na frekvenci záření je na Obr. 1. Naměřené hodnoty byly proloženy lineární funkcí  $E(f) = a \cdot f + b$ . Prahová frekvence materiálu odpovídá průsečíku křivky s vodorovnou osou, a váženým průměrem byla stanovena na  $f_0 = (2,6 \pm 0,7) \cdot 10^{14}$  Hz. Planckova konstanta koresponduje se směrnicí proložené křivky a váženým průměrem byla stanovena na  $h = (3 \pm 1) \cdot 10^{-34}$  J·s. Výsledné hodnoty prahové frekvence fotokatody i Planckovy konstanty byly stanoveny pomocí hodnot zaznamenaných v Tab. 2.



Obr. 1: Graf závislosti energie elektronů na frekvenci záření. Naměřené hodnoty jsou pro tři různá nastavení clony a nafitované lineární funkcí  $E(f) = a \cdot f + b$ . Chyby energie jsou ve všech případech rovny  $0,003 \cdot 10^{-19}$  J. a v měřítku grafu zanedbatelné.

$\lambda$ [nm]	578	546	436	405	395
$V_1$ [mV]	230	380	589	616	640
$V_2$ [mV]	627	744	1188	1260	1558
$V_3$ [mV]	580	670	951	1018	1123

Tab. 1: Tabulka naměřených hodnot zastavovacího potenciálu  $V_i$ , kde index  $i = \{1, 2, 3\}$  značí nastavení clony, pro pět různých interferenčních filtrů vlnové délky  $\lambda$ . Chyba zastavovacího potenciálu je vždy 2 mV.

Nastavení clony	1	2	3
$f_0$ [ $10^{14}$ Hz]	$3,4 \pm 0,3$	$3,4 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,4$
$h$ [ $10^{-34}$ J · s]	$2,5 \pm 0,4$	$5,4 \pm 0,7$	$3,4 \pm 0,2$

Tab. 2: Tabulka mezních frekvencí  $f_0$  a Planckových konstant  $h$  stanovených z grafu na Obr. 1.

## 6 Diskuze

Z naměřených hodnot jsme určily jak prahovou frekvenci katody  $f_0$ , tak Planckovu konstantu, a to konkrétně pomocí grafického zpracování. Vzhledem k tomu, že prahová frekvence odpovídá průsečíku křivky s vodorovnou osou po proložení dat lineární funkcí, byla výsledná hodnota stanovena standardním postupem pomocí váženého průměru na  $f_0 = (2,6 \pm 0,7) \cdot 10^{14}$  Hz a nachází se v očekávaném řádu. V porovnání s hodnotami v tabulkách [5] se naše hodnota s žádnou neshoduje ani v rámci chyby. Nejbližše uvedená hodnota je sodíku, avšak nedomníváme se, že se bude v našem případě jednat o tento materiál. Odchyly mohly vzniknout nevhodným nastavením clony, či nepřesným odečítáním hodnot z voltmetru v momentě, kdy hodnota oscilovala v určitém intervalu. V Tab. 2 vidíme, že frekvence pro první dvě nastavení clony vychází stejně a u třetího se liší. Toto je velmi pozoruhodný výsledek, vzhledem k tomu, že při prvním nastavení propouštěla clona nejméně světla, což se pravděpodobně projevilo i na výsledku příslušné Planckovy konstanty.

Planckova konstanta odpovídá směrnici lineárního fitu, a její hodnoty jsou taktéž zaznamenány v Tab. 2. Váženým průměrem byla stanovena na  $h = (3 \pm 1) \cdot 10^{-34}$  J·s a v porovnání s tabulkovou hodnotou  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s [6] se sice neshoduje číselně ani v rámci chyby, avšak nachází se v požadovaném řádu. Domníváme se, že konečná hodnota Planckovy konstanty stanovená naším experimentem bude velmi záviset na vhodném nastavení clony, jelikož při druhém nastavení (takovém, kdy clona propouštěla nejvíce světla aniž by se paprsek dotkl drátků) jsme v rámci chyby se nejvíce přiblížili tabulkové hodnotě.

## 7 Závěr

Seznámily jsme se měřením prahové frekvence materiálu a Planckovy konstanty. Sestavily jsme aparaturu podle instrukcí a vykreslily závislost energie fotoelektronů na frekvenci záření do grafu. Z naměřených hodnot jsme určily prahovou frekvenci fotokatody na  $f_0 = (2,6 \pm 0,7) \cdot 10^{14}$  Hz a Planckovu konstantu na  $h = (3 \pm 1) \cdot 10^{-34}$  J·s.

# Frankův-Hertzův pokus

## 8 Pracovní úkoly

1. Sestavte aparaturu pro provedení Frankova-Hertzova pokusu a nechte rtuťovou trubici zahřát na zvolenou teplotu.
2. Pozorujte závislost procházejícího proudu  $I_A$  na urychlujícím napětí  $U_2$  (Frankovu-Hertzovu křivku) na digitálním osciloskopu. Nalezněte optimální hodnoty parametrů  $U_1$  a  $U_3$  a diskutujte jejich vliv na podobu Frankovy-Hertzovy křivky.
3. Za pomoci dodatečných voltmetrů proměřte Frankovu-Hertzovu křivku pro napětí  $U_2$  v rozmezí od 0 do 30 V a sestavte její graf. Naměřte alespoň 80 hodnot.
4. V okolí maxim a minim Frankovy-Hertzovy křivky proložte naměřená data polynomy druhého stupně a určete souřadnice extrémů. Postupnou metodou vypočtete excitační energii atomu rtuť. Výsledek porovnejte s tabulkovou hodnotou.
5. Využijte výslednou excitační energii a hodnotu Planckovy konstanty  $h$  získanou v předchozí podúloze a s jejich pomocí spočítejte, jakou vlnovou délku by měl foton vyzářený při deexcitaci atomů rtuť. Výsledek porovnejte s původním výsledkem Francka a Hertze.

## 9 Použité přístroje a pomůcky

Rtuťová Frankova-Hertzova trubice, patice pro Frankovu-Hertzovu trubici s DIN konektorem, elektrická píčka, napájecí jednotka, teplotní senzor NiCr-Ni, dvoukanálový digitální osciloskop GW Instek GDS-1072B, 2x stíněný kabel BNC/4 mm, 2x voltmetr, vodiče.

## 10 Teoretický úvod

Frankův-Hertzův pokus demonstroval kvantování energetických hladin elektronů v atomovém obalu a existenci excitovaných stavů atomů. Jeho závěry podporovaly Bohrov model atomu, čímž přispěly k rozvoji předpovědi kvantové mechaniky. Princip pokusu byl následující: z nažhavené katody vystupují elektrony a jsou unášeny elektrickým polem ke kladně nabitě mřížce. Napětí na anodě bylo zvoleno nižší než na mřížce, čímž vznikl potenciální rozdíl vytvářející brzdné napětí, díky němuž musely mít elektrony po dosažení mřížky alespoň nějakou minimální kinetickou energii, aby dosáhli sběrné anody. Během experimentu se zaznamenávaly hodnoty proudu procházejícího mezi anodou a katodou v závislosti na rozdílu napětí mezi katodou a urychlující mřížkou. Do skleněné vakuové trubice byla zároveň vložena kapka rtuť, jenž byla před začátkem měření zahřáta na teplotu přibližně 115°C, čímž byl vnitřek trubice naplněn rtuťovými parami.

Dle klasické fyziky by měl při zvyšování potenciálního rozdílu mezi katodou a mřížkou procházející proud neustále narůstat. Avšak po dosažení určité hodnoty napětí ( $U_0 \approx 4,9$  V) byl vzrůst nahrazen prudkým poklesem proudu, přičemž při dalším zvyšování napětí proud opět narůstal, dokud nebyl pozorován podobný pokles proudu (při hodnotě  $2U_0 \approx 9,8$  V). Tento jev není možné vysvětlit pomocí klasické fyziky.

Pomocí právě Bohrovy představy o atomu lze výsledek Frankova-Hertzova pokusu objasnit. Pomalu se pohybující elektrony interagují s atomy rtuť pružnými srážkami, při kterých atomy zůstávají v základním stavu. Vlivem rozdílu v hmotnostech elektronu a atomu lze odraz atomů zanedbat a elektrony při tom neztrácí žádnou energii ani hybnost, pouze se změní směr jejich pohybu. Při dosažení hodnoty  $U_0 \approx 4,9$  V ale elektrony průchodem trubicí získávají kinetickou energii  $T = E_{\text{ex}} = eU_0$  dostatečnou k excitaci atomu rtuť. V této situaci interagují s atomy nepružnými srážkami, ve kterých předají atomu takovou část své kinetické energie, která odpovídá excitační energii rtuť. Část elektronů tak ztratí kinetickou energii potřebnou k dosažení sběrné anody, což se projeví poklesem proudu. Při

následném zvyšování napětí stále dochází k nepružným srážkám, ale zkracuje se dráha, po jejímž uražení získají elektrony dostatek energie k excitaci rtuti, tudíž jsou po srážce nadále urychlovány a celkový proud narůstá. K opětovnému snížení dojde až po překročení  $2U_0 \approx 9,8 \text{ V}$ , kde elektrony podstoupí dvě nepružné srážky. V grafickém zpracování tak lze pozorovat ekvidistantní minima a maxima, přičemž jejich vzdálenost odpovídá excitační energii rtuti.

Pro frekvenci fotonů emitovaných excitovaným materiálem  $f$  platí

$$f = \frac{E_{\text{ex}}}{h}, \quad (3)$$

kde  $E_{\text{ex}}$  je excitační energie a  $h$  je Planckova konstanta.

## 11 Postup měření

Postupujeme podle instrukcí v [2]. Využíváme aparaturu vyobrazenou na Obr. 5. Elektrickou píčku připojíme ke konektorům na zadní straně napájecí jednotky. Do otvoru zasuneme teplotní senzor připevněný na laboratorní stojan a zapneme zdroj pícky. Zdroj nastavíme tak, aby konečná se konečná teplota nacházela v intervalu mezi  $170^\circ\text{C}$  a  $180^\circ\text{C}$ . Poté ke zdroji připojíme oscilátor, na kterém budeme po vhodném nastavení pozorovat křivku závislosti proudu  $I_A$  na napětí  $U_2$  a upravujeme hodnoty parametrů  $U_1$  a  $U_3$ , dokud nebude mít křivka požadovaný tvar.

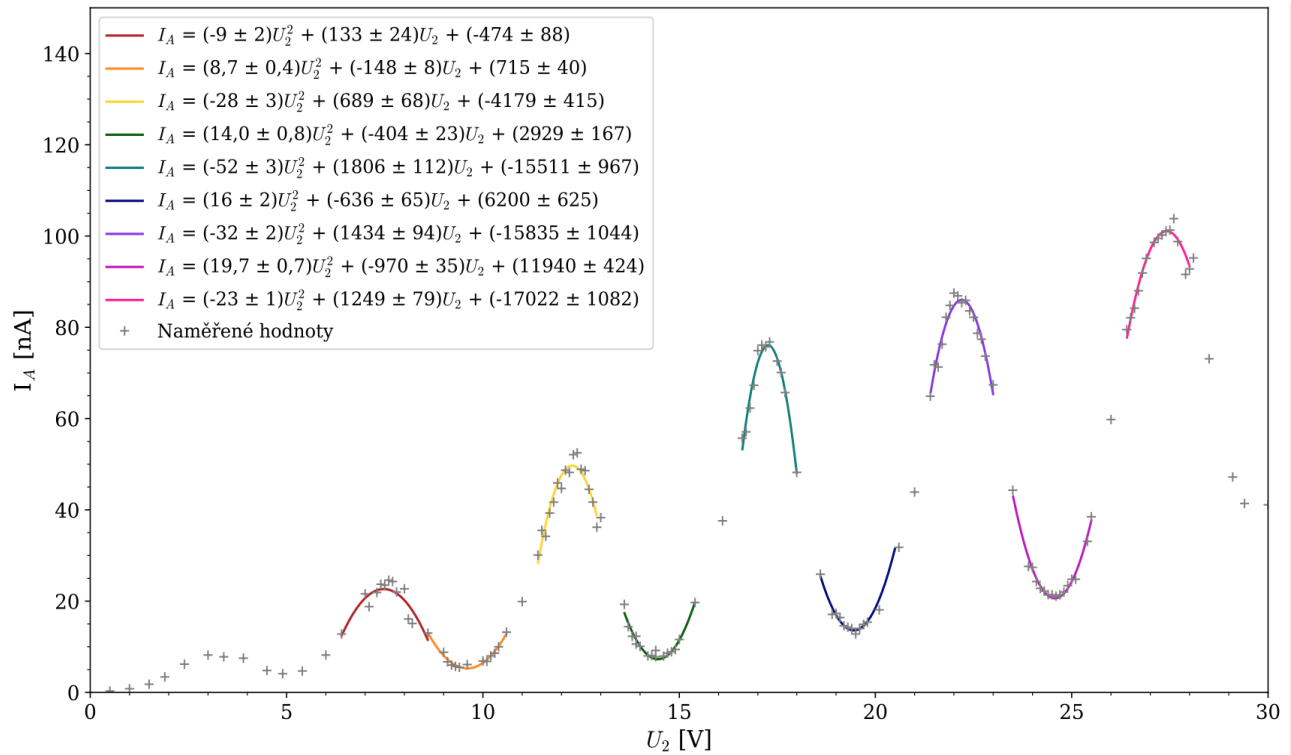
Následně odpojíme oscilátor a k výstupům  $U_2$  a  $U_A$  připojíme dva voltmetry, přičemž pro různá napětí  $U_2$  měříme napětí  $U_A$  pro více než 80 hodnot. Pro převod mezi napětím  $U_A$  a proudem  $I_A$  uvádí výrobce vztah přímé úměrnosti  $U_A [\text{V}] = I_A [\text{nA}]$ .

## 12 Vypracování

Aparatura pro provedení Franckova-Hertzova pokusu byla úspěšně sestavena a rtuťová trubice zahřáta na zvolenou teplotu  $\theta = (172 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Při pozorování závislosti procházejícího proudu  $I_A$  na urychlujícím napětí  $U_2$  na digitálním osciloskopu byly optimální parametry nalezeny na  $U_1 = (4,76 \pm 0,01) \text{ V}$  a  $U_3 = (1,81 \pm 0,01) \text{ V}$ . Fotografie křivky pozorované na osciloskopu po optimalizaci parametrů  $U_1$  a  $U_3$  pro Frankův-Hertzův pokus je na Obr. 6.

Graficky zpracovaná Frankova-Hertzova křivka pro napětí  $U_2$  v rozmezí od 0 V do 30 V s proměřenými okolními maxim a minim je na Obr. 2. Lokální extrémy této křivky byly fitovány kvadratickou funkcí typu  $I_A(U_2) = a \cdot U_2^2 + b \cdot U_2 + c$ , přičemž vypočtené parametry jsou vypsány v legendě grafu. Určené souřadnice lokálních extrémů jsou k nahlédnutí v Tab. 3. Excitační energie byla postupnou metodou vypočtena pro maxima na  $E_{\text{ex}} = (5 \pm 1) \text{ eV}$  a pro minima  $E_{\text{ex}} = (5,8 \pm 0,3) \text{ eV}$ . Váženým průměrem byla z něčto hodnot následně určena excitační energie atomu rtuti na  $E_{\text{ex}} = (5,7 \pm 0,7) \text{ eV}$ .

Nalezené hodnoty excitační energie atomu rtuti a Planckovy konstanty v předešlé úloze byly následně využity pro výpočet vlnové délky fotonu vyzářeného při deexcitaci atomů rtuti za pomoci vzorce (3), a sice  $\lambda = (97 \pm 27) \text{ nm}$ .



Obr. 2: Naměřená Frakova-Hertzova křivka. Graf závislosti procházejícího proudu  $I_A$  na urychlujícím napětí  $U_2$  a příslušné fity lokálních extrémů kvadratickými funkcí typu  $I_A(U_2) = a \cdot U_2^2 + b \cdot U_2 + c$ . Výsledné parametry jsou vypsané v legendě grafu.

$U_2$ [V]	$I_A$ [nA]
$7 \pm 2$	$21,6 \pm 0,1$
$8,5 \pm 0,6$	$44,7 \pm 0,1$
$12 \pm 2$	$74,9 \pm 0,1$
$14 \pm 1$	$87,5 \pm 0,1$
$17 \pm 1$	$98,6 \pm 0,1$
$20 \pm 3$	$9,6 \pm 0,1$
$22 \pm 2$	$10,1 \pm 0,1$
$21 \pm 2$	$10,1 \pm 0,1$
$25 \pm 1$	$18,1 \pm 0,1$
$27 \pm 2$	$24,8 \pm 0,1$

Tab. 3: Tabulka se souřadnicemi naměřených maxim a minim Frankovy-Hertzovy křivky vykreslené na Obr.

## 13 Diskuze

Na digitálním osciloskopu byly optimální parametry nalezeny na  $U_1 = (4,76 \pm 0,01)$  V a  $U_1 = (1,81 \pm 0,01)$  V. Tyto parametry mají zásadní vliv na tvar pozorované Frankovy-Hertzovy křivky, a to konkrétně takto:  $U_1$  mění nárůst křivky, tedy zda je graf strmý nebo plochý, a  $U_3$  mění viditelnost maxim a minim křivky. Pro  $U_2$  v rozmezí 0 V až 30 V jsme naměřily 153 hodnot, což je skoro dvojnásobek nejmenšího požadovaného množství. Proměřovaly jsme především okolí nalezených maxim a minim, a proto se nám úspěšně podařilo určit jejich souřadnice. Tyto

hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 3. Vidíme, že chyby x-ových souřadnic minim mají tendenci být menší oproti chybám maxim. Tento faktor přispěl i k výsledné odchylce excitační energie atomu rtuti, která byla postupnou metodou vypočtena pro maxima na  $E_{\text{ex}} = (5 \pm 1)$  eV a pro minima  $E_{\text{ex}} = (5,8 \pm 0,3)$  eV. V porovnání s tabulkovou hodnotou  $E_{\text{ex}} = 4,9$  eV [2], se hodnota pro maxima shoduje s tabulkovou, kdežto pro minima nikoli, ačkoli se v případě minim jedná o přesnější hodnotu. Výsledná hodnota excitační energie atomu rtuti  $E_{\text{ex}} = (5,7 \pm 0,7)$  eV určena s těchto dvou hodnot váženým průměrem se s tabulkovou v rámci chyby neshoduje, avšak tabulková hodnota byla uvedena bez chyby, tudíž bychom mohli hodnotu prohlásit za odpovídající předpokladům.

Na závěr jsme využily nalezenou hodnotu excitační energie atomu rtuti a Planckovy konstanty v předchozí úloze pro výpočet vlnové délky fotonu vyzářeného při deexcitaci atomů a sice  $\lambda = (97 \pm 27)$  nm. V [2] je tato hodnota uvedena jako 254 nm, tudíž se hodnoty neshodují ani v rámci chyby. K tomuto výstupu jistě přispěly jak nepřesnosti při měření obou úloh, tak vypočtené chyby standardním postupem statistického zpracování měření, ačkoli se obě použité hodnoty nacházejí v požadovaném řádu.

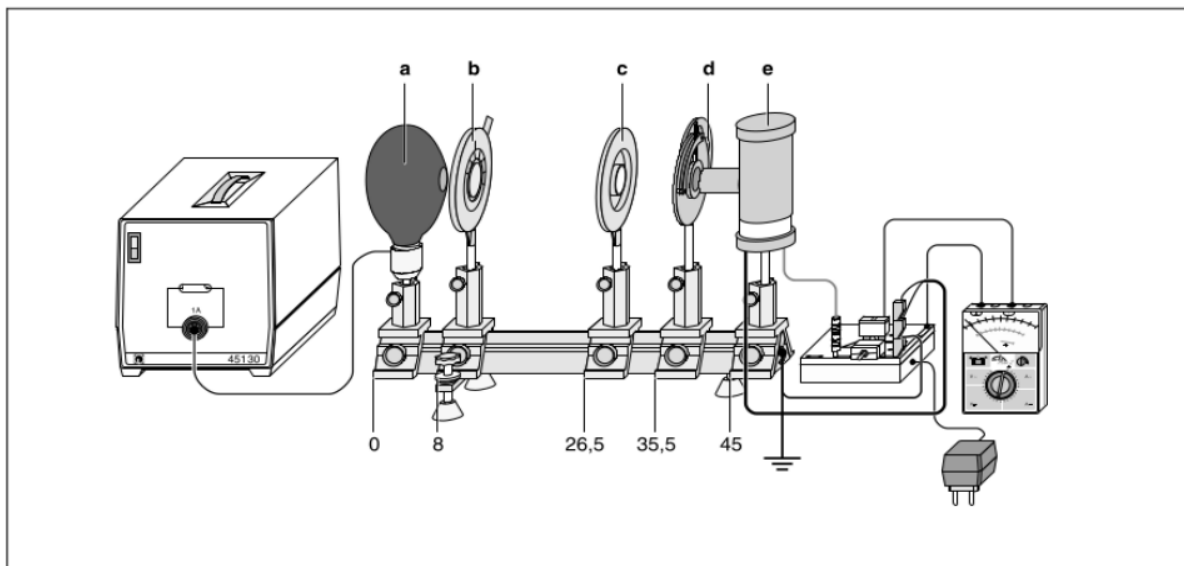
## 14 Závěr

Seznámily jsme se s Franckovým-Hertzovým pokusem a zkoumaly kvantové vlastnosti atomu. Úspěšně jsme sestavily aparaturu a splnily podmínky pro provedení měření. Pozorovaly jsme Franckovu-Hertzovu křivku na digitálním osciloskopu a našly optimální hodnoty parametrů  $U_1$  a  $U_2$ . Dále jsme tuto křivku proměřily především v okolí zjištěných maxim a minim a vykreslily její graf. Díky tomu jsme určily souřadnice lokálních extrémů a postupnou metodou stanovily excitační energii rtuti na  $E_{\text{ex}} = (5,7 \pm 0,7)$  eV. Tento výsledek společně s výslednou Planckovou konstantou měřenou v předchozí úloze jsme vypočetly vlnovou délku fotonu vyzářeného při deexcitaci atomu rtuti na  $\lambda = (97 \pm 27)$  nm.

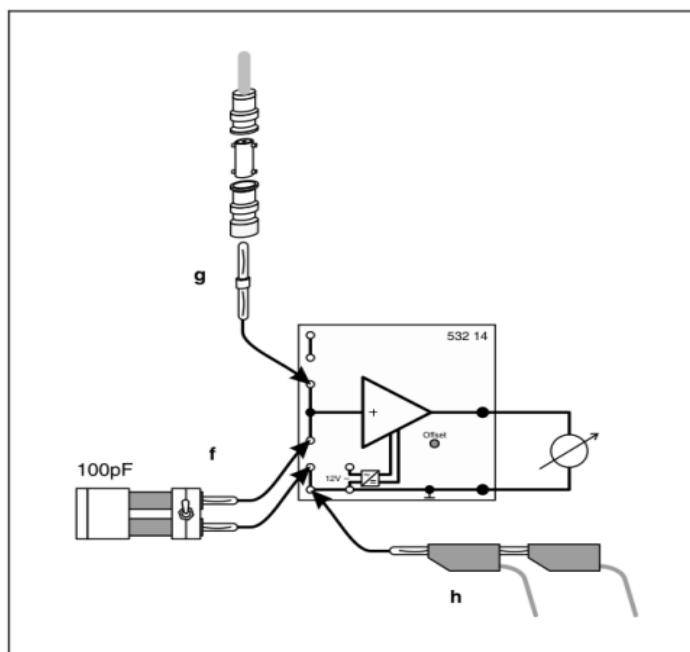
## Literatura

- [1] Kolektiv KF. Měření kvantových vlastností atomu: Měření Planckovy konstanty [online]. In: . s. 6 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/543870/mod\\_resource/content/1/11a\\_Planck\\_210408.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/543870/mod_resource/content/1/11a_Planck_210408.pdf)
- [2] Kolektiv KF. Měření kvantových vlastností atomu: Frankův-Hertzův pokus [online]. In: . s. 9 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/543869/mod\\_resource/content/1/11b\\_Franck-Hertz\\_210408.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/543869/mod_resource/content/1/11b_Franck-Hertz_210408.pdf)
- [3] Leybold: Determining Planck's constant - Selection of wavelengths using interference filters on the optical bench. Dostupné z: [https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P6/P6143\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P6/P6143_e.pdf) [cit. 3-24-2023].
- [4] Leybold: Franck-Hertz experiment with mercury - Recording with the oscilloscope. Dostupné online z: [https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P6/P6241\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P6/P6241_e.pdf) [cit. 3-24-2023].
- [5] Threshold Frequency. SaveMyExams [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.savemyexams.co.uk/a-level/physics/cie/22/revision-notes/22-quantum-physics/22-1-the-photoelectric-effect/22-1-4-threshold-frequency/>
- [6] Základní fyzikální konstanty. Základní fyzikální konstanty [online]. [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.labo.cz/mft/zkonst.htm>

## Příloha

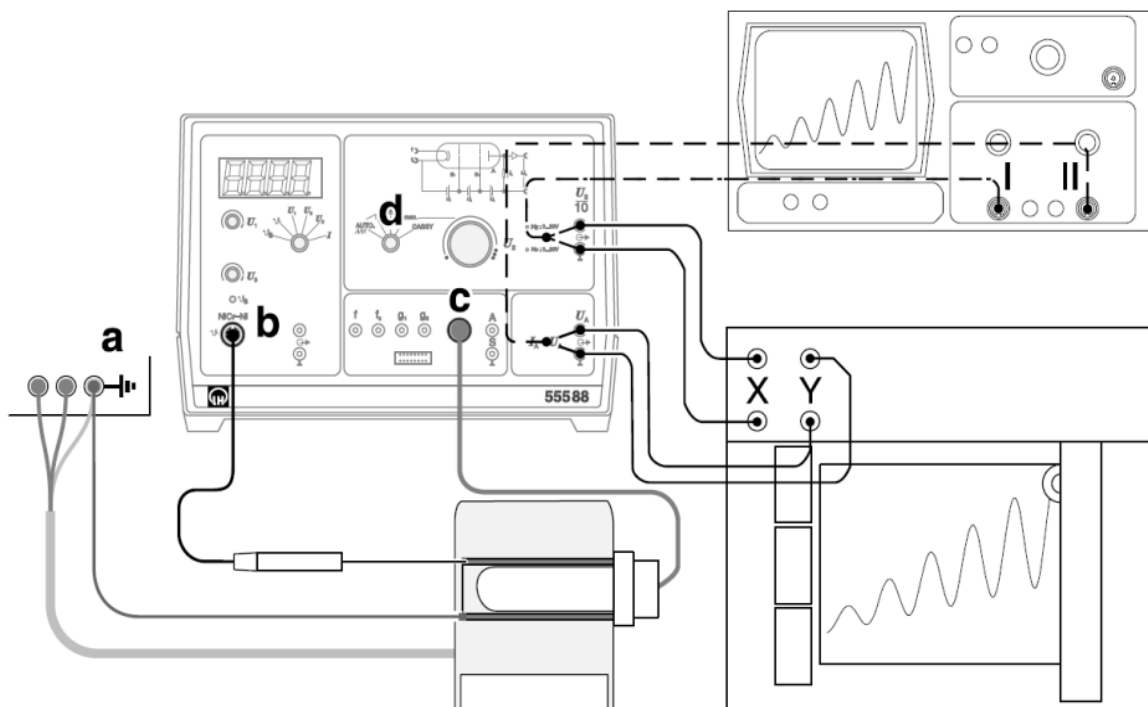


Obr. 3: Experimentální nastavení na optické lavici s pozicemi v cm, které se skládá z vysokotlakové rtuťové lampy (a), clony (b), čočky (c), interferenčního filtru (d) a fotobuňky (e). Převzato z [3].

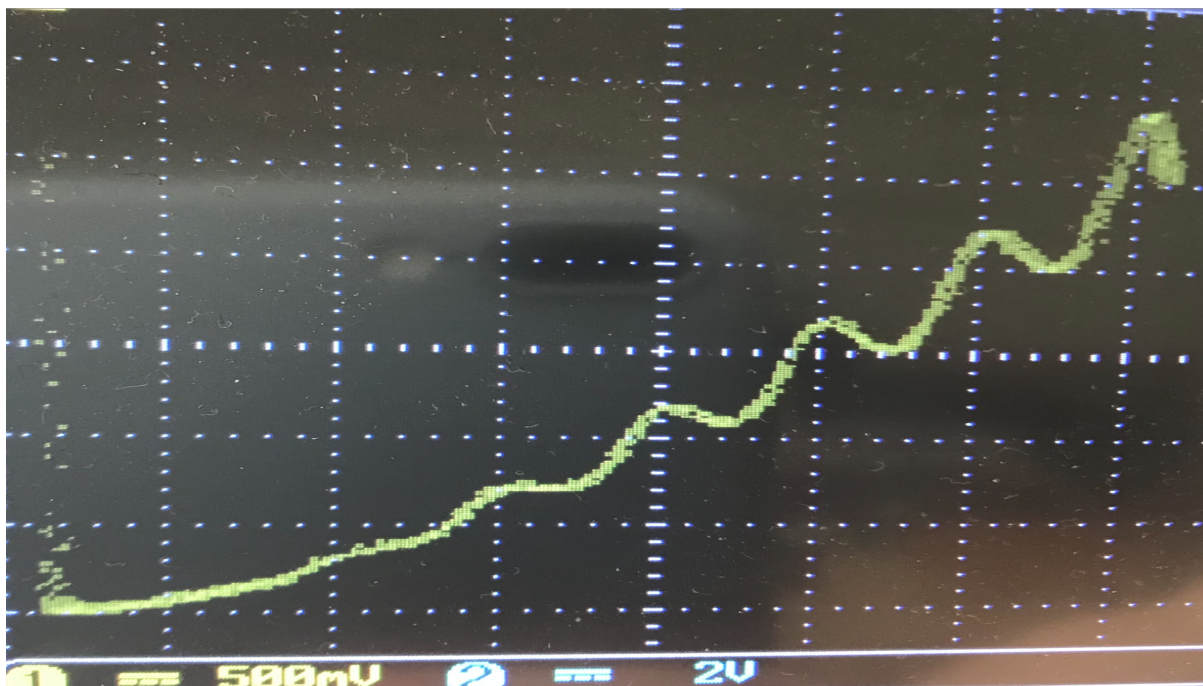


Obr. 4: Obvod zesilovače elektrometru pro měření mezního napětí  $V_{stop}$ . Převzato z [3]





Obr. 5: Uspořádání Franckova-Hertzova experimentu. Místo souřadnicového zapisovače XY využíváme zapojení s voltmetry. Převzato z [4]



Obr. 6: Fotografie křivky pozorované na osciloskopu po optimalizaci parametrů  $U_1$  a  $U_3$  pro Frankův-Hertzův pokus. Z archivu autorky.