

Číslo úlohy: 11

Skupina: 4

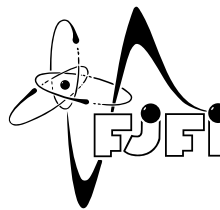
Kruh: Středa 15:30

Jméno: Denis Krapivin

Datum měření: 20.4.2022

Kolega: Kseniia Politskovaia

Klasifikace:



# Část I - 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 Pomůcky

Fotoelektrická buňka v pouzdře, vysokotlaká rtuťová lamp a zdroj napětí, irisová clona, spojná čočka ( $f = 100$  mm), interferenční filtry (578 nm, 546 nm, 436 nm, 405 nm, 365 nm), držák na interferenční filtr, STE klíčový spínač, zesilovač elektrometru s adaptérem, STE kondenzátor (100 pF, 630 V), digitální multimetr, kabely, optická lavice, 2× optický jezdec (90 mm), 3× optický jezdec (120 mm), BNC adaptér, 2× clamping plug.

## 3 Teoretický úvod

Za určitých okolností je možné využít světlo k uvolnění elektronů z povrchu pevné látky. Tento proces je známý jako fotoelektrický jev a lze ho pozorovat například v Lenardově experimentu (Obr. 1 v návodu [1]). Je patrné, že když je napájecí zdroj nastaven na nízké napětí  $\Delta U$ , zachycuje nejméně energetické elektrony a snižuje proud přes mikroampérmetr. Potenciál  $U_{\text{stop}}$ , při kterém dojde k zastavování proudu odpovídá maximální kinetické energii fotoelektronů  $E_e$ :

$$E_e = eU_{\text{stop}}, \quad (1)$$

kde  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C [4] je náboj elektronu.

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  $f_0$ :

$$E_e = h(f - f_0), \quad (2)$$

kde  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js [5] je Planckova konstanta.

Pro elektromagnetické vlnění, jakým světlo je, lze spočítat frekvenci  $f$  pro vlnu s vlnovou délkou  $\lambda$  jako:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (3)$$

kde  $c = 2,998 \cdot 10^8$  ms<sup>-1</sup> [6] je rychlost světla ve vakuu.

## 4 Postup měření

Nejdřív umístíme na jeden konec optické lavice vysokotlakovou rtuťovou lampu a zapneme zdroj napětí, ke kterému je lampu připojena. Poté na optickou lavici umístíme podle Obr. 4 v návodu [1] irisovou clonu, spojnou čočku, držák na interferenční filtr a fotobuňku s krytem. Odstraníme kryt z fotobuňky a si snažíme experimentální aparaturu nastavit tak, aby světlo z lampy produkovalo ostrý světelný bod uprostřed černého povlaku fotobuňky a nedopadalo na elektrody a kontakty. Pak vrátíme kryt na fotobuňku a pomocí Obr. 5 v návodu [1] zapojíme elektrometrický zesilovač s kondenzátorem a multimetr pro měření mezního napětí.

Vložíme do držáku první interferenční filtr a přidržetím klíčového spínače vybíjíme kondenzátor dokud multimetr neukáže hodnotu 0 V. Uvolníme spínač a po ustálení napětí odečteme hodnotu z multimetru. Měření provádíme pro 5 různých filtrů. Poté změním otvor clony a opakujeme měření pro tytéž filtry.

## 5 Vypracování

Naměřené hodnoty mezního napětí  $U$  pro ozáření fotobuňky světlem o vlnové délce  $\lambda$  a vypočtené podle (1) hodnoty energií elektronů  $E$  jsou v Tab. 1. Frekvence absorbovaných fotonů  $f$  je vypočtena podle (3) a zaokrouhlена na setiny. Chyba měření napětí  $\sigma_U = 0,01$  V je chybou měřicího přístroje, chyba měření energií elektronů  $\sigma_E = 0,02 \cdot 10^{-19}$  J je vypočtena jako chyba nepřímého měření [3].

$\lambda$ [nm]	$f$ [ $10^{14}$ Hz]	$U$ [ $10^{14}$ V]	$E$ [ $10^{-19}$ J]
578	5,19	0,54	0,87
		0,65	1,04
546	5,49	0,70	1,12
		0,78	1,25
436	6,88	1,10	1,76
		1,30	2,08
405	7,40	1,15	1,84
		1,44	2,31
365	8,21	1,49	2,39
		1,78	2,85

Tab. 1: Naměřené hodnoty mezního napětí  $U$  s chybou  $\sigma_U = 0,01$  V pro ozáření fotobuňky světlem o vlnové délce  $\lambda$  frekvencí  $f$  a vypočtené hodnoty energií elektronů  $E$  s příslušnou chybou  $\sigma_E = 0,02 \cdot 10^{-19}$  J.

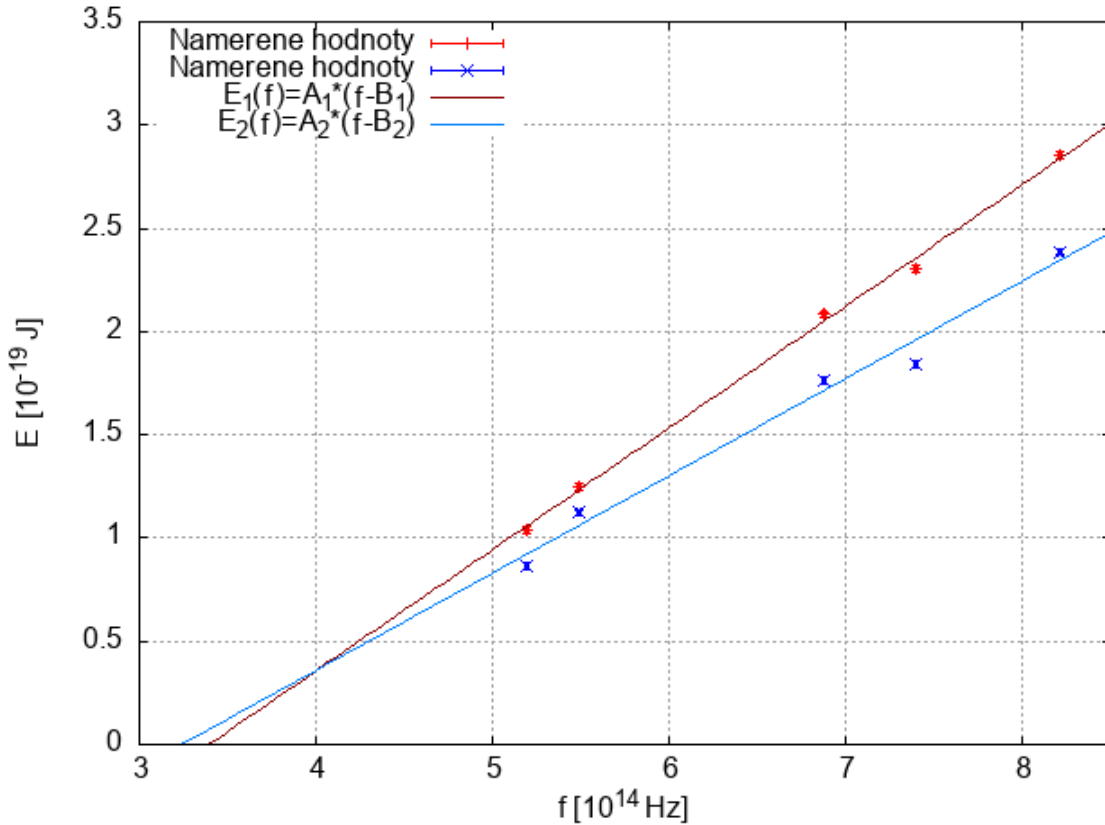
Vypočtené hodnoty energií elektronů  $E$  v závislosti na frekvenci absorbovaných fotonů  $f$  pro dva měření s různými intenzitami dopadajícího světla a proložení dat funkcemi ve tvaru (2) je na Obr. 1.

Proložením dat jsou určeny hodnoty prahové frekvencí pro oba dva měření  $B_1 = (3,4 \pm 0,1) \cdot 10^{14}$  Hz a  $B_2 = (3,2 \pm 0,3) \cdot 10^{14}$  Hz. Výsledná hodnota prahové frekvencí fotoemisivního materiálu  $f_0$  je vypočtena podle vzorce pro vážený průměr, chyba je stanovena jako chyba váženého průměru [3]:

$$f_0 = (3,4 \pm 0,3) \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$

Proložením dat jsou stanoveny hodnoty Planckovy konstanty pro oba dva měření  $A_1 = (5,87 \pm 0,15) \cdot 10^{-34}$  J s a  $A_2 = (4,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-34}$  J s. Výsledná hodnota Planckovy konstanty  $h$  je vypočtena podle vzorce pro vážený průměr, chyba je stanovena jako chyba váženého průměru:

$$h = (5,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-34} \text{ J s.}$$



Obr. 1: Vypočtené hodnoty energií elektronů  $E$  v závislosti na frekvenci absorbovaných fotonů  $f$  pro dva měření s různými intenzitami dopadajícího světla. Proložení závislostí funkcemi ve tvaru  $E_i(f)$  s koeficienty  $A_1 = (0,587 \pm 0,015) \cdot 10^{-33}$  Js ,  $B_1 = (3,4 \pm 0,1) \cdot 10^{14}$  Hz,  $A_2 = (0,47 \pm 0,04) \cdot 10^{-33}$  Js,  $B_2 = (3,2 \pm 0,3) \cdot 10^{14}$  Hz.

## 6 Diskuze

Naměřená hodnota Planckovy konstanty  $h = (5,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-34}$  Js má malou relativitou chybu cca 5%, ovšem naměřená hodnota neodpovídá v rámci  $3\sigma$  tabulkové hodnotě  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js, tím pádem hodnoty nemůžeme považovat za shodné. Veličiny ovšem se odlišují od sebe pouze na cca 16%, což by mohlo ukazovat, že problém je ve nesprávném určování chyby měření, nebo v nevhodném nastavování hodnot vstupních konstant při proložení extrémů (při zvolení těchto konstant je velmi složité správně uhádnout nutnou hodnotu, občas pro různé hodnoty konstant nám vyházeli různé, ale stejně přesné hodnoty)

Výslednou hodnotu jsme spočetli jako vážený průměr ze dvou hodnot  $h_1 = (5,87 \pm 0,15) \cdot 10^{-34}$  Js a  $h_2 = (4,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-34}$  Js pro dva různých filtry. Druhá z nich je ale leží v rámci  $3\sigma$ . Pravděpodobně chyby obou měření příliš malé a bychom museli do chyby započítat i nějakou statistickou chybu. V návodu [1] je zmíněno, že příliš malý průměr otvoru clony by mohl ovlivnit měření, což se určitě mohlo stát v našem případě.

Naměřené hodnoty prahové frekvence pro oba dva měření  $f_1 = (3,4 \pm 0,1) \cdot 10^{14}$  Hz a  $f_2 = (3,2 \pm 0,3) \cdot 10^{14}$  Hz mají relativně malé chyby (cca 3% a 9%) a dobře se shoduje v rámci  $2\sigma \leq 3\sigma$ , tím pádem hodnoty můžeme považovat za shodné.

## 7 Závěr

Seznámili jsme se s metodou měření Planckovy konstanty pomocí měření maximální kinetické energií fotoelektronů v závislosti na vlnové délce světla.

Závislost energií elektronů a frekvence záření jsme vykreslili do grafu na Obr. 1. Z naměřených hodnot jsme určili prahovou frekvenci fotokatody na  $f_0 = (3,4 \pm 0,3) \cdot 10^{14}$  Hz a Planckovu konstantu na  $h = (5,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-34}$  J s.

## Část II - Franckův-Hertzův pokus

### 8 Pracovní úkoly

1. Sestavte aparaturu pro provedení Franckova-Hertzova pokusu a nechte rtuťovou trubici zahřát na zvolenou teplotu.
2. Pozorujte závislost procházejícího proudu  $I$  na urychlujícím napětí  $U_2$  (Franckovu-Hertzovu křivku) na digitálním osciloskopu. Nalezněte optimální hodnoty parametrů  $U_1$  a  $U_3$  a diskutujte jejich vliv na podobu Franckovy-Hertzovy křivky.
3. Za pomoci dodatečných voltmetrů proměřte Franckovu-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 Franckovy-Hertzovy křivky proložte naměřená data polynomy druhého stupně a určete souřadnice extrémů. Postupnou metodou vypočtete excitační energii atomu rtuti. Výsledek porovnejte s tabulkovou hodnotou.
5. Využijte výslednou excitační energii a hodnotu Planckovy konstanty  $h$  získanou v úloze 11a a s jejich pomocí spočtete, jakou vlnovou délku by měl foton vyzářený při deexcitaci atomů rtuti. Výsledek porovnejte s původním výsledkem Francka a Hertze.

### 9 Pomůcky

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

### 10 Teoretický úvod

Z pohledu klasické fyziky by měl v Franckově-Hertzově pokusu [2] při zvyšování potenciálního rozdílu mezi katodou a mřížkou procházející proud lineárně stoupat, ale ve skutečnosti to lze pozorovat pouze v oblasti nízkých napětí ( $U \leq 4,9$  V), po překročení napětí  $U = 4,9$  V však lze pozorovat prudký pokles proudu, při dalším zvyšování napětí proud opětovně narůstá, přičemž analogický pokles nastává při dosažení  $U = 9,8$  V a dalších celočíselných násobků napětí.

Teto výsledky lze vysvětlit s využitím Bohrovy představy o struktuře atomu: pomalu se pohybující elektrony interagují s atomy rtuti pružnými srážkami, při dosažení napětí  $U = 4,9$  V však elektrony průchodem skrz trubici získají energii dostatečnou k tomu, aby excitovaly atom rtuti a předají atomu takovou část své energie, která odpovídá excitační energii rtuti  $E_e$ . Pást elektronů tak ztratí kinetickou energii, což se projeví poklesem proudu.

Při deexcitaci atomu elektron přechází do stavu s nižší energií se vyzařuje kvant elektromagnetického záření, jehož frekvence  $f$  souvisí s energetickým rozdílem hladin  $\Delta E$  jako  $\Delta E = hf$ , kde  $h$  je Planckova konstanta. Tím pádem lze spočítat vlnovou délku  $\lambda$  fotonu vyzářeného při deexcitaci atomů rtuti:

$$\lambda = \frac{hc}{E_e}, \quad (4)$$

kde  $c = 2,998 \cdot 10^8$  ms<sup>-1</sup> [6] je rychlost světla ve vakuu.

## 11 Postup měření

Uspořádání Franckova-Hertzova experimentu lze najít na Obr. 4 v návodu [2].

Nejdřív zapneme napájecí jednotku, ke kterému je připojena elektrická pícka a zvolíme režim „RESET“. Zkontrolujeme, že teplota je nastavena v rozmezí 170-180° C, samotné měření začneme po 10 minutách po rozsvícení LED indikátoru Hg zelenou barvou.

Podle návodu [2] připojíme k napájecí jednotce osciloskop, otočným přepínačem zvolíme režim pro měření s osciloskopem. Podle postupu [2] snažíme si optimalizovat parametry  $U_1$  a  $U_3$  otočením příslušných knoflíků tak, aby tvar křivky na obrazovce osciloskopu co nejlíp odpovídal Franckově-Hertzově křivce na Obr. 2 v návodu [2]. Vyfotím vhodnou křivku a zaznamenáme příslušné hodnoty parametrů  $U_1$  a  $U_3$ .

Pro manuálně měření křivky nejdřív nastavíme na napájecí jednotce režim „RESET“, vypneme a odpojíme osciloskop, poté k připojíme multimetry a zvolíme pro každý rozsahy stupnic 20 V. Následně zvolíme režim „MAN“, nastavíme napětí  $U_2 = 0,5$  V a odečteme na stupnici druhého multimetru hodnotu napětí  $U_A \approx I_A$ . Měření provádíme na intervalu od 0 do 30 V s krokem 0,5 V, pak v blízkosti maxim a minim Franckovy-Hertzovy křivky naměříme pomocné body.

## 12 Vypracování

Franckova-Hertzova křivka na digitálním osciloskopu GW Instek GDS-1072B pro nastavené hodnoty parametrů  $U_1 = 4,6$  V a  $U_3 = 0,67$  V je zobrazena na Obr. 2.

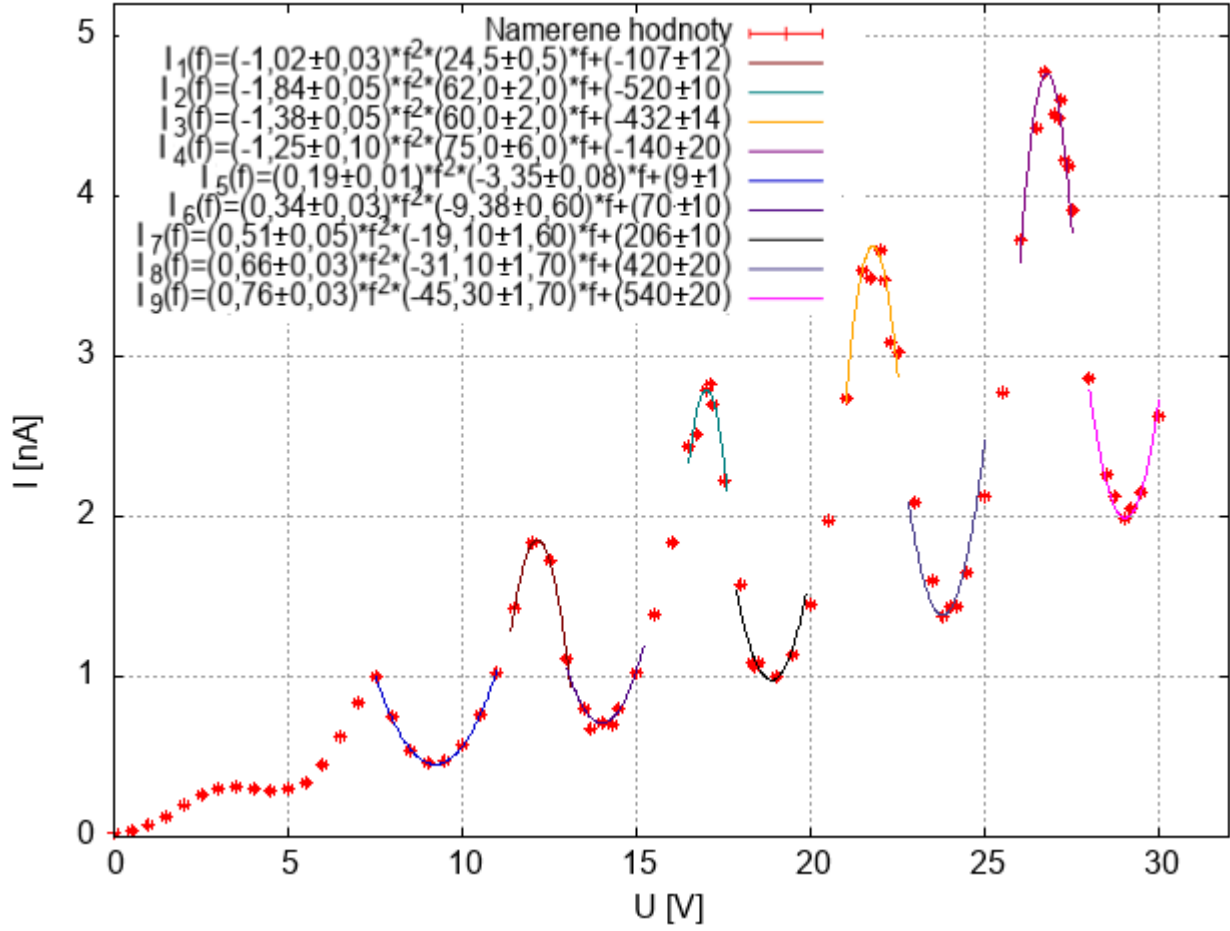


Obr. 2: Franckova-Hertzova křivka na digitálním osciloskopu GW Instek GDS-1072B. Závislost procházejícího proudu  $I$  na urychlujícím napětí  $U_2$  pro hodnoty parametrů  $U_1 = 4,6$  V a  $U_3 = 0,67$  V.

Naměřené hodnoty proudu  $I$  v závislosti na urychlujícím napětí  $U$  a proložení okolí extrémů polynomy druhého stupně ve tvaru  $I(U) = AU^2 + BU + C$ , kde A,B,C jsou konstanty je na Obr. 3.

Proložení naměřených dat jsou stanoveny hodnoty konstant A,B,C, ze kterých pak jsou určeny souřadnice lokálních extrémů Franckově-Hertzově křivky. Vypočtené hodnoty napětí  $U_{\max}$  a  $U_{\min}$  ve kterých Franckova-Hertzova křivka nabývá lokální maxima resp. minima jsou v Tab. 2.

Vypočtené postupnou metodou [7] hodnoty excitační energie atomu rtuti ze vzdálenosti mezi maximy  $E_{\max}$  a minimy  $E_{\min}$  jsou:



Obr. 3: Naměřené hodnoty proudu  $I$  v závislosti na urychlujícím napětí  $U$  a proložení okolí extrémů funkcemi ve tvaru  $I(U) = AU^2 + BU + C$ , kde A,B,C jsou konstanty.

$U_{\max}$ [V]	$U_{\min}$ [V]
$12,7 \pm 0,6$	$9,1 \pm 0,3$
$16,8 \pm 0,7$	$13,6 \pm 1,3$
$22,0 \pm 1,0$	$19,0 \pm 3,0$
$27,1 \pm 1,8$	$25,0 \pm 2,0$
—	$28,4 \pm 1,2$

Tab. 2: Vypočtené hodnoty napětí  $U_{\max}$  a  $U_{\min}$  ve kterých Franckova-Hertzova křivka nabývá lokální maxima resp. minima.

$$E_{\max} = (5,0 \pm 0,3) \text{ eV} \quad E_{\min} = (4,9 \pm 0,5) \text{ eV}.$$

Výsledná hodnota excitační energií  $E_e$  je nalezena jako vážený průměr. Chyba je vypočtena jako chyba váženého průměru[3]:

$$E_e = (5,0 \pm 0,4) \text{ eV}.$$

Využitím výsledné excitační energií  $E_e$  a vypočtené hodnoty Planckovy konstanty  $h = (5,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  je spočtena podle (4) vlnová délka fotonu  $\lambda$  vyzářeného při deexcitaci atomů rtuti:

$$\lambda = (209 \pm 8) \text{ nm},$$

kde chyba je nalezena jako chyba nepřímého měření.

## 13 Diskuze

Při pozorování Franckove-Hertzove křivky na osciloskopu a nastavování různých hodnot parametrů  $U_1$  a  $U_3$  jsme zjistili, že parametr  $U_1$  mění sklon křivky, změnou parametru  $U_3$  lze dosáhnout zvýraznění extrémů křivky.

Při výpočtu excitační energie atomu postupnou metodou je zanedbaná statistická chyba, která kvůli malému počtu extrémů byla radové menší než chyba systematická.

Vypočtena hodnota excitační energie atomu rtuti  $E_e = (5,0 \pm 0,4) \text{ eV}$  má relativitou chybu cca 8% a se shoduje v rámci  $\sigma \leq 3\sigma$  s tabulkovou hodnotou  $E_t = 4,8865 \text{ eV}$  [2], tím pádem hodnoty můžeme považovat za shodné.

Nalezená hodnota vlnové délky fotonu vyzářeného při deexcitaci atomů rtuti  $\lambda = (209 \pm 8) \text{ nm}$  s relativitou chybou cca 4% se neshodují v rámci  $3\sigma$  s tabulkovou hodnotou  $\lambda_t = 254 \text{ nm}$  [2], což pravděpodobně způsobeno nepřesným nalezením hodnoty Planckovy konstanty.

## 14 Závěr

Seznámili jsme se s Franckovým-Hertzovým pokusem.

Při pozorování Franckovu-Hertzovu křivku na digitálním osciloskopu Obr. 2 jsme našli optimální hodnoty parametrů  $U_1 = 4,6 \text{ V}$  a  $U_3 = 0,67 \text{ V}$  a poté jsme pomocí multimetru proměřili křivku manuálně a sestavili její graf Obr. 3.

Stanovili jsme postupnou metodou excitační energii atomu rtuti na  $E_e = (5,0 \pm 0,3) \text{ eV}$  a vlnovou délku fotonu vyzářeného při deexcitaci atomů rtuti na  $\lambda = (209 \pm 8) \text{ nm}$ .

## Literatura

- [1] Kolektiv praktika, *Měření Planckovy konstanty*, [online, cit.23.4.2022] - [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/435643/mod\\_resource/content/1/11a\\_Planck\\_210408.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/435643/mod_resource/content/1/11a_Planck_210408.pdf)
- [2] Kolektiv praktika, *Franckův-Hertzův pokus*, [online, cit.23.4.2022] - [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/435642/mod\\_resource/content/1/11b\\_Franck-Hertz\\_210408.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/435642/mod_resource/content/1/11b_Franck-Hertz_210408.pdf)
- [3] Petr Chaloupka, *Základy fyzikálních měření*, prezentace [online, cit.23.4.2022] - <https://people.fjfi.cvut.cz/chalopet/ZFM/ZFM.pdf>
- [4] WolframAlpha, *Charge of electron*, [online, cit.23.4.2022] - <https://www.wolframalpha.com/input?i=electron+charge>
- [5] WolframAlpha, *Planck constant*, [online, cit.23.4.2022] - <https://www.wolframalpha.com/input?i=Planck+constant>
- [6] WolframAlpha, *Speed of light*, [online, cit.23.4.2022] - <https://www.wolframalpha.com/input?i=speed+of+light>
- [7] Kolektiv autorů, *Úvod do fyzikálních měření*, [online, cit.23.4.2022] - <http://space.fkdesign.cz/TUL-Uvod-do-fyzikalnich-mereni.pdf>