

Měření kvantových vlastností atomů: Franckův-Hertzův pokus

1 Pracovní úkoly

1. Sestavte aparaturu pro provedení Franckova-Hertzova pokusu a nechte rtuťovou trubici zahřát na zvolenou teplotu.
2. Pozorujte závislost procházejícího proudu I_A 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 rtuť. 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 rtuť. Výsledek porovnejte s původním výsledkem Francka a Hertze.

2 Pracovní pomůcky

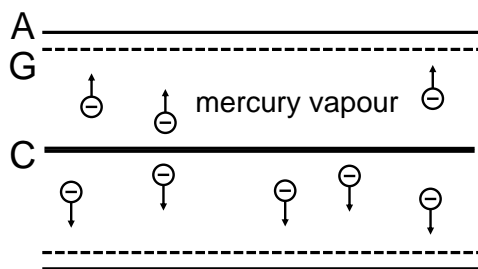
Rtuťová Franckova-Hertzova trubice, patice pro Franckovu-Hertzovu trubici s DIN konektorem, elektrická pícka, napájecí jednotka, teplotní senzor NiCr-Ni, dvoukanálový digitální osciloskop GW Instek GDS-1072B, 2× stíněný kabel BNC/4 mm, 2× voltmetr, vodiče.

3 Základní pojmy a vztahy

Slavný Franckův-Hertzův pokus byl proveden německými fyziky Jamesem Franckem a Gustavem Hertzem (synovcem Heinricha Hertze), kteří 24. dubna 1914 prezentovali své výsledky před Německou fyzikální společností. Šlo o jeden z prvních experimentů potvrzujících předpovědi kvantové mechaniky, neboť během něj bylo demonstrováno kvantování energetických hladin elektronů v atomovém obalu a existence excitovaných stavů atomů.

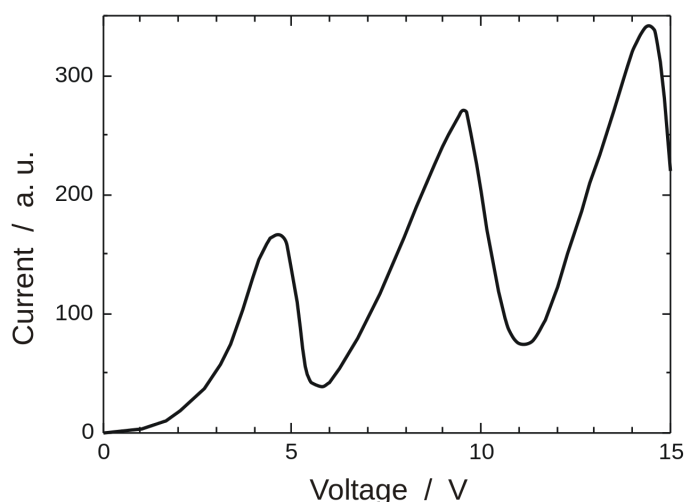
Franck a Hertz ke svému pokusu využili skleněnou vakuovou trubici se třemi válcově symetrickými elektrodami, která je schematicky znázorněna na Obr. 1. Na ose trubice byla umístěna tenká katoda C žhavená procházejícím elektrickým proudem, u vnějšího okraje se pak nacházela jemná drátěná platinová mřížka G s poloměrem přibližně 4 cm, obklopená válcovou anodou A. Urychlující mřížka G byla připojena ke kladnému napětí vůči katodě C, elektrony emitované z rozžhavené katody byly tedy k mřížce přitahovány. Naopak napětí na anodě A, která se nacházela ve vzdálenosti 1-2 mm od mřížky G, bylo zvoleno nepatrně nižší než na mřížce. Tento potenciálový rozdíl tak vytvářel brzdné napětí, díky němuž musely mít elektrony po dosažení mřížky alespoň určitou minimální kinetickou energii, aby mohly dosáhnout i sběrné anody. Franck a Hertz během svého pokusu zaznamenávali hodnoty proudu I procházejícího mezi anodou a katodou v závislosti na rozdílu napětí U mezi katodou a urychlující mřížkou.

Kromě výše zmíněných elektrod byla do Franckovy-Hertzovy trubice vložena kapka rtuť a celá trubice byla před začátkem měření zahřáta na provozní teplotu 110-115 °C. Díky tomu byl vnitřek trubice vyplněn rtuťovými parami o tlaku okolo 100 Pa (odpovídá přibližně hydrostatickému tlaku sloupce rtuť o výšce 1 mm).



Obr. 1: Schéma původní Franckovy-Hertzovy trubice (boční řez).

Z pohledu klasické fyziky by měl při zvyšování potenciálního rozdílu U mezi katodou a mřížkou procházející proud I narůstat, neboť podle tzv. Childova-Langmuirova zákona je plošná hustota J proudu procházejícího mezi elektrodami planoparalelní diody úměrná $U^{3/2}$. Franck a Hertz skutečně pozorovali v oblasti nízkých napětí ($U < 4,9$ V) očekávaný nárůst proudu, podobně jako v konvenční elektronce. Po překročení napětí $U_0 \simeq 4,9$ V však byl postupný nárůst vystřídán prudkým poklesem proudu, jak je vidět z Obr. 2. Při dalším zvyšování napětí U proud opětovně narůstal, přičemž analogický pokles proudu byl pozorován při dosažení $2U_0 \simeq 9,8$ V a dalších celočíselných násobků napětí U_0 . Zde klasická fyzika selhává, neboť s její pomocí závěry Franckova-Hertzova pozorování nejsme schopni vysvětlit.



Obr. 2: Závislost proudu I na přiloženém napětí U mezi katodou a urychlující mřížkou, kterou zaznamenali Franck a Hertz roku 1914 při teplotě přibližně 115 °C [2].

3.1 Bohrovův model atomu

Franckův-Hertzův pokus ve skutečnosti poskytl přesvědčivý důkaz ve prospěch Bohrova atomového modelu, zformulovaného dánským fyzikem Nielsem Bohrem o 6 měsíců dříve (roku 1913), ačkoliv Franck v jednom z rozhovorů na začátku 60. let 20. století připomněl, že on ani Hertz během plánování a realizace svého experimentu nebyli s Bohrovým modelem obeznámeni [3].

Přímým předchůdcem Bohrova modelu atomu byl planetární model Rutherfordův (1911), založený na představě, že lehčí elektrony obíhají kolem jádra, podobně jako planety kolem Slunce ve sluneční soustavě. Hlavním nedostatkem Rutherfordova modelu však bylo, že jakýkoliv atom v jeho pojetí by byl nutně nestabilní. Dle Larmourova vzorce z teorie klasického elektromagnetismu vyzařuje náboj pohybující se se zrychlením energii ve formě elektromagnetického záření, což by znamenalo, že obíhající elektrony by zkolabovaly do kladně nabitého jádra během zlomku sekundy (řádově za desítky pikosekund), což pochopitelně odporuje každodenní zkušenosti.

Bohr se pokusil tyto nesrovnalosti odstranit tím, že svůj model vystavěl na několika na tehdejší dobu poměrně revolučních předpokladech. Bohrov model proto bývá nazýván jako první *kvantový* model atomu a Bohr byl díky tomu schopen vysvětlit některé empiricky zjištěné vztahy, např. Rydbergův vztah popisující spektrální čáry vodíku. Bohrovy postuláty lze shrnout do tří hlavních bodů:

1. Atom se může nacházet jen v jistých kvantových stavech s pevně danou energií. Těmto stavům odpovídají stabilní elektronové orbity. Elektrony se tak pohybují kolem jádra po kružnicích v pevně daných vzdálenostech a během svého pohybu nevyzařují energii.
2. Stabilní orbity se nachází v takových vzdálenostech r od jádra, při kterých je orbitální moment hybnosti elektronu $L = m_e v r$ roven celočíselnému násobku redukované Planckovy konstanty, tj. $L = n\hbar$, kde $n = 1, 2, \dots$
3. Elektrony mohou ztratit (získat) energii přechodem do stavu s nižší (vyšší) energií za vyzáření (pohlcení) kvanta elektromagnetického záření, jehož frekvence f souvisí s energetickým rozdílem hladin ΔE jako $\Delta E = hf$, kde h je Planckova konstanta.

3.2 Nepružné srážky s atomy rtuti

S využitím Bohrovy představy o struktuře atomu lze výsledek Franckova-Hertzova pokusu vysvětlit následujícím způsobem: pomalu se pohybující elektrony (urychlené rozdílem napětí nižším než 4,9 V) interagují se rtuťovými atomy *pružnými srážkami*, při kterých atomy zůstávají v základním stavu. Vzhledem k vysokému rozdílu mezi hmotností elektronu a rtuťových atomů ($m_{\text{Hg}} \simeq 3,7 \times 10^5 m_e$) lze odraz atomů zanedbat a elektrony neztrácí v podstatě žádnou energii ani hybnost, mění se pouze směr jejich pohybu. Přítomnost rtuťových par tak v tomto případě může vést pouze k prodloužení doby, za kterou elektrony dorazí k mřížce G, nemá ale příliš vliv na jejich výslednou kinetickou energii.

Při dosažení $U = U_0 \simeq 4,9$ V však elektrony průchodem skrz trubici získají kinetickou energii $T = eU_0 \simeq 4,9$ eV dostatečnou k tomu, aby *excitovaly atom rtuti*. V takovém případě elektrony interagují s atomy *nepružnými srážkami*, ve kterých předají atomu takovou část své kinetické energie T , která odpovídá excitační energii rtuti E_{ex} . Část elektronů tak ztratí kinetickou energii potřebnou k dosažení anody A, což se projeví poklesem měřeného proudu I . Excitační oblast se v tuto chvíli nachází těsně před mřížkou G.

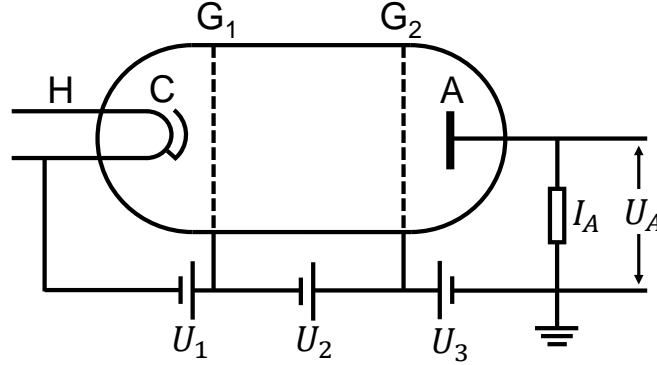
Při dalším zvyšování rozdílu napětí U nadále dochází k nepružným srážkám, nicméně zkracuje se dráha, po jejímž uražení získají elektrony dostatek energie k excitaci rtuti. Po srážce jsou dále urychlovány na zbytek své dráhy, a celkový proud tak znovu narůstá. K opětovnému snížení dochází až po překročení $U = 2U_0$, kdy mají elektrony dostatek energie k tomu, aby během své dráhy podstoupily dvě nepružné srážky. V grafu na Obr. 2 tak lze pozorovat *ekvidistantní minima a maxima, jejichž vzdálenost odpovídá excitační energii rtuti*.

Rtuťové atomy krátce po své excitaci pochopitelně deexcitují do základního stavu, což se podle 3. Bohrova postulátu projeví vyzářením kvanta elektromagnetického záření (fotonu) o frekvenci $f = E_{\text{ex}}/h$. U rtuti tato frekvence odpovídá vlnové délce 254 nm, jde tedy o fotony v ultrafialové části spektra. Franck a Hertz skutečně pozorovali emisi světla o dané vlnové délce (zaznamenali vlnovou délku 2536 Å [4]), což popsali ve svém druhém článku v květnu 1914, kde připisují autorství vztahu mezi energií a vlnovou délkou záření $E = hf$ německému fyzikovi Johannesu Starkovi. Franck a Hertz za svůj významný přínos k objasnění zákonů popisujících srážky mezi atomy a elektrony obdrželi roku 1925 Nobelovu cenu za fyziku.

4 Popis měření

Schéma Franckovy-Hertzovy rtuťové trubice, kterou budeme používat při měření, je ukázáno na Obr. 3. Na rozdíl od původní trubice zde nejsou elektrody cylindricky symetrické. Před katodou C, která je žhavena vláknem H, se nachází dvě planparalelní kovové mřížky G_1 a G_2 . Emitované elektrony jsou urychlovány směrem k mřížce G_1 rozdílem potenciálů U_1 rovným několika jednotkám voltů. Mřížka G_1 se nazývá kontrolní a proud emitovaných elektronů je díky ní v čase konstantní. Hlavní potenciálový rozdíl U_2 je nastaven mezi kontrolní mřížkou G_1 a urychlující mřížkou G_2 .

Proud elektronů emitovaných z katody lze zvětšit zvýšením napětí U_1 , na hodnotě U_2 však prakticky nezávisí. Potenciál na anodě A je znovu nastaven na nižší hodnotu než potenciál mřížky G_2 , což má za následek vznik *brzdného napětí* U_3 . Anodový proud I_A budeme měřit pomocí úbytku napětí U_A na rezistoru se známým odporem.



Obr. 3: Schéma Franckovy-Hertzovy trubice [1]. Do trubice je vložena kapka rtuti o hmotnosti přibližně 5 g (na obrázku není zobrazena).

Je důležité si uvědomit, že část energie elektronů se při opuštění žhavené katody musí spotřebovat na tzv. *výstupní práci* katody W_C , kterou zavádíme již v Einsteinově rovnici pro fotoefekt. Elektron sesbíraný na anodě naopak získá energii odpovídající výstupní práci anody W_A . Jelikož obě koncové elektrody jsou vyrobeny z odlišných materiálů, *rozdíl kontaktních potenciálů* $\Phi_A - \Phi_C$ bude obecně nenulový a efektivní rozdíl napětí mezi katodou a anodou je tudíž dán jako

$$U_{\text{eff}} = U_1 + U_2 - U_3 + \Phi_A - \Phi_C. \quad (1)$$

Elektron tedy bude schopen dosáhnout anody A, pokud energie ΔE , kterou ztratí v důsledku nepružných srážek s atomy rtuti, bude splňovat nerovnost

$$\Delta E < e(U_1 + U_2 - U_3) + \Delta W, \quad (2)$$

kde e je elementární náboj a $\Delta W = e(\Phi_A - \Phi_C)$.

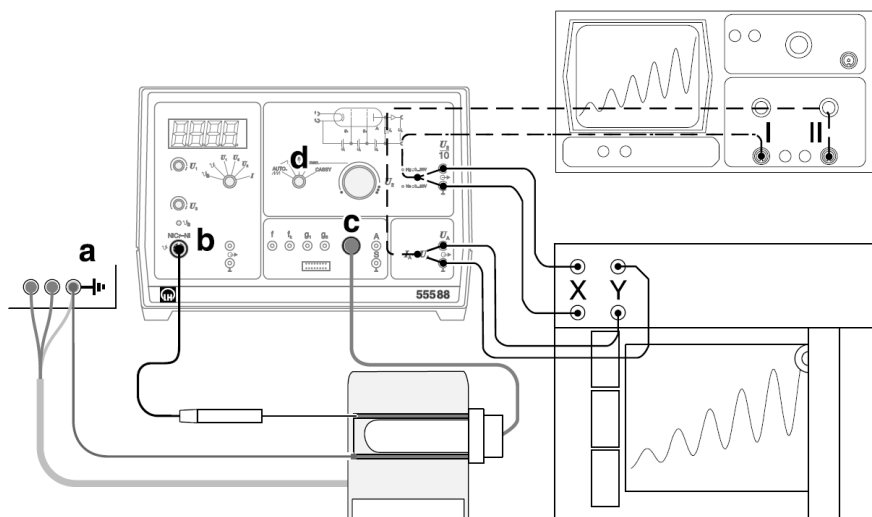
Před začátkem měření závislosti proudu I_A na napětí U_2 určíme optimální hodnoty U_1 a U_3 , které během měření ponecháme konstantní. Tyto členy spolu s kontaktními potenciály proto vytváří konstantní posun napětí, v jehož důsledku napětí U_2 při dosažení prvního vrcholu proudu I_A nebude obecně odpovídat excitační energii rtuti E_{ex} . Budeme-li však E_{ex} určovat ze vzdálenosti maxim/minim závislosti $I_A(U_2)$, nebude pro nás toto posunutí důležité.

Dříve, než přejdete k provedení experimentu, pečlivě se seznamte s bezpečnostními poznámkami v sekci 5. Rtuť obsažená ve Franckově-Hertzově trubici se řadí mezi vysoce toxické prvky a pokud by došlo k rozbití trubice, je nutno se vyvarovat vdechnutí rtuťových výparů!

4.1 Sestavení experimentu

Uspořádání Franckova-Hertzova experimentu lze najít na Obr. 4.

1. Než začnete sestavovat experiment, ujistěte se, že napájecí jednotka je vypnutá. Hlavní vypínač naleznete na zadní straně. Franckova-Hertzova trubice se zapojenou patičkou by měla být zasunuta v měděném válci uvnitř elektrické píčky. Trubicu z píčky nevysouvejte.
2. Připojte elektrickou píčku ke 4 mm konektorům na zadní straně napájecí jednotky (a). Dodatečně připojte do uzemněné 4 mm zdířky žlutý konektor na konci měděného proužku, který je propojený s měděným válcem uvnitř píčky a slouží k odstínění aparatury.
3. Hrot NiCr-Ni teplotního senzoru uchyceného k laboratornímu stojanu vsuňte do otvoru v měděném válci uvnitř píčky. Při manipulaci s teploměrem dbejte opatrnosti, neboť senzor je



Obr. 4: Uspořádání Franckova-Hertzova experimentu [1]. Namísto souřadnicového zapisovače XY (v pravém dolním rohu) budeme využívat zapojení s digitálními voltmetry.

velice tenký a snadno dojde k jeho deformaci. Hrot lze do pícky vsunout do hloubky přibližně 1 cm. Přesvědčte se, že je teploměr správně vložený, neboť v případě špatného kontaktu mezi teploměrem a měděným válcem bude skutečná teplota uvnitř pícky vyšší než teplota změřená senzorem, což může vést k přehřátí a poškození aparatury.

4. DIN konektor teplotního senzoru zapojte do odpovídající zdířky (b) na levém panelu napájecí jednotky. DIN konektor z patice Franckovy-Hertzovy trubice připojte do zdířky (c) na prostředním panelu napájecí jednotky.

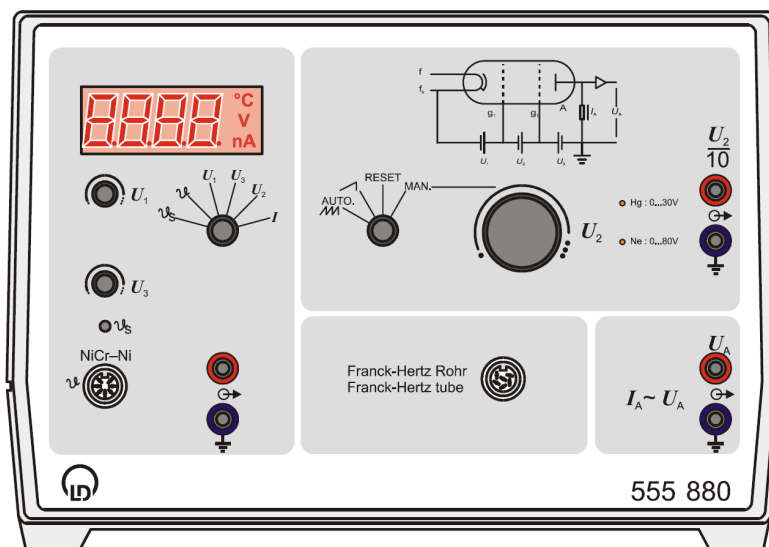
Než budete pokračovat, nechte si zapojení aparatury **zkontrolovat asistentem** a seznámte se s ovládáním napájecí jednotky, jejíž čelní panel je znázorněn na Obr. 5. V levé části se nachází číselný displej, z něhož je možné odečítat okamžitou teplotu v pícce ϑ , konečnou zvolenou teplotu ϑ_S , napětí U_1 , U_2 , U_3 (definovaná podle Obr. 3) a anodový proud I_A . Zvolenou veličinu k zobrazení lze vybrat pomocí otočného přepínače níže. Pod číselným displejem jsou dále potenciometry umožňující regulovat napětí U_1 a U_3 a zapuštěný potenciometr pro regulaci koncové teploty ϑ_S . Nastavení ϑ_S by nemělo být nutné měnit, pouze později proved'te kontrolu (viz sekce 4.2).

Na pravém horním panelu napájecí jednotky se kromě schématu zapojení Franckovy-Hertzovy elektronky známého z Obr. 3 nachází otočný přepínač umožňující zvolení režimu:

- RESET: urychlující napětí U_2 je nastaveno na 0 V,
- \nearrow : nahrávání Franckovy-Hertzovy křivky se souřadnicovým zapisovačem XY (nebudeme používat),
- \mathcal{M} : pro měření s osciloskopem (napětí U_2 postupně narůstá z 0 na cca 30 V, periodicky s frekvencí cca 25 Hz),
- MAN: umožňuje manuálně nastavit hodnotu napětí U_2 na otočném potenciometru v rozmezí od 0 do cca 30 V.

Dále se na pravé straně čelního panelu nachází 4 mm zdířky umožňující zapojení měřících přístrojů pro určování napětí $U_2/10$ a napětí U_A . Pro převod mezi U_A a proudem I_A výrobce uvádí vztah přímé úměrnosti

$$I_A [\text{nA}] = U_A [\text{V}]. \quad (3)$$



Obr. 5: Čelní panel napájecí jednotky [1].

4.2 Zapnutí aparatury

Zvolte na napájecí jednotce režim RESET a zapněte jednotku vypínačem na zadním panelu. LED dioda s označením Hg na pravém horním panelu jednotky by se po chvíli měla rozsvítit zeleně. Zahřívání není nutné zapínat, započne automaticky, což se projeví přepnutím LED diody na červenou barvu. Dioda se opět rozsvítí zeleně až ve chvíli, kdy bude dosaženo zvolené teploty ϑ_S . Nyní na číselném displeji napájecí jednotky zkontrolujte, zda je teplota ϑ_S nastavena na hodnotu mezi přibližně 170 a 180 °C. Pokud tomu tak není, obraťte se na asistenta a požádejte ho o upravení teploty na potenciometru.

Od chvíle, kdy spustíte zahřívání, dbejte zvýšené opatrnosti, s píčkou již nijak nemanipulujte a do její těsné blízkosti neumísťujte další předměty kromě těch, které jsou součástí experimentální aparatury.

Zahřívání trvá přibližně 20 minut a vývoj teploty ϑ lze průběžně sledovat na číselném displeji. Píčka se zpravidla zahřeje na vyšší teplotu než ϑ_S a následně se její teplota sníží na požadovanou úroveň. Po zahřátí aparatury je vhodné počkat na ustálení teplotní rovnováhy, celkově je tedy doporučeno začít s měřením nejdříve po 30 minutách od zapnutí napájecí jednotky.

Bliká-li po zapnutí napájecí jednotky LED dioda přerušovaně, pak NiCr-Ni teplotní čidlo pravděpodobně není správně připojeno.

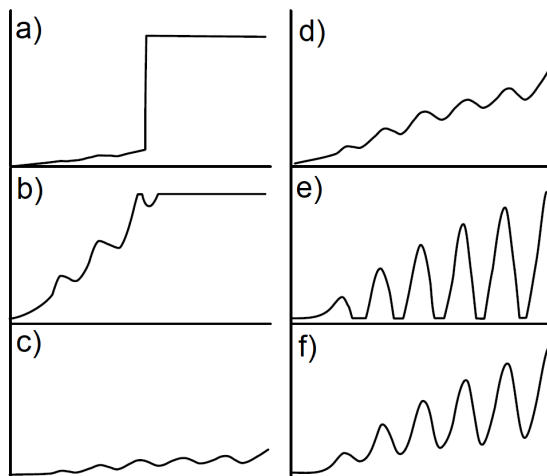
Dokud není dosažena provozní teplota ϑ_S , **na napájecí jednotce nenastavujte jiný režim než RESET!** Rtuť v kapalném stavu může mezi elektrodami vytvořit spojení nakrátko, je tedy nutno počkat na její odpaření.

4.3 Pozorování na osciloskopu a optimalizace parametrů U_1 , U_3

1. Za použití stíněných BNC/4 mm kabelů připojte výstupní signál $U_2/10$ (dvojice 4 mm konektorů na pravé straně napájecí jednotky) k 1. kanálu a výstupní signál U_A ke 2. kanálu digitálního osciloskopu GW Instek GDS-1072B.
2. Základní nastavení můžete po zapnutí osciloskopu obnovit stisknutím tlačítka *Default*. Následně vyberte režim XY pomocí volby: *Acquire* \rightarrow *XY* \rightarrow *Triggered XY*. Displej je v režimu XY rozdělen na dvě okna, horní ukazuje časový průběh obou signálů, zatímco ve spodním lze pozorovat XY zobrazení, kdy je signál z kanálu 2 (osa y , tj. I_A) zobrazen v závislosti na signálu z kanálu 1 (osa x , tj. $U_2/10$).
3. Nastavte počáteční hodnoty napětí $U_1 = 3$ V a $U_3 = 1,5$ V, teplota Franckovy-Hertzovy trubice by měla být přibližně 170-180 °C. Na napájecí jednotce zvolte režim \mathcal{M} a pozorujte

na osciloskopu Franckovu-Hertzovu křivku. Vhodně nastavte rozsah obou os (doporučeno 500 mV/div pro osu x a 2 V/div pro osu y) a časovou škálu (okolo 20 ms).

Nyní je třeba provést optimalizaci hodnot napětí U_1 a U_3 , aby měla Franckova-Hertzova požadovaný tvar podobný tomu na Obr. 6 f). Je-li tvar křivky bližší některému z předchozích případů, pak postupujte následujícím způsobem:



Obr. 6: Přehled možných podob křivek $I_A(U_2)$ pro optimalizaci parametrů U_1 a U_3 [1].

- (a) Pozorujete-li skokový nárůst proudu a dochází-li uvnitř trubice k viditelným zábleskům (způsobeny doutnavým výbojem), pak pravděpodobně nebylo dosaženo požadované teploty. Napájecí jednotku ihned přepněte do režimu RESET a vyčkejte na ustálení rovnováhy při požadované teplotě (v krajním případě lze zvýšit ϑ_S). K této variantě by při respektování popsaného postupu nemělo dojít.
- (b) Narůstá-li křivka příliš prudce a pozorujete-li saturaci křivky i při napětí $U_2 < 30$ V, pak je proud emitovaných elektronů příliš vysoký. Snižujte napětí U_1 , dokud křivka nezíská tvar d).
- (c) Je-li křivka plochá a změřené hodnoty proudu jsou příliš nízké, pak zvyšujte napětí U_1 (maximálně do hodnoty 4,8 V!), dokud křivka nezíská tvar d). Zůstává-li křivka plochá i po zvýšení napětí U_1 , pak je nutno zvolit nižší teplotu ϑ_S (v takovém případě se obraťte na asistenta).
- (d) Jsou-li maxima a minima křivky málo viditelná, pak je třeba střídavě zvyšovat hodnoty napětí U_3 (maximálně do 4,5 V!) a U_1 , dokud není dosaženo tvaru f).
- (e) Není-li možné pozorovat minima křivky, pak je nutné střídavě snižovat napětí U_3 a U_1 , dokud není dosaženo tvaru f).

Samotný osciloskop není nejvhodnějším nástrojem k přesnému zaznamenání Franckovy-Hertzovy křivky, neboť při frekvencích, s jakými je třeba měnit napětí U_2 , aby byl obraz na osciloskopu stabilní, značně narůstá elektrická kapacita Franckovy-Hertzovy trubice. I při optimální volbě parametrů ϑ_S , U_1 a U_3 je tedy možné, že bude křivka bližší tvaru d), neboť při vykreslení na osciloskopu dochází k jejímu zkreslení a minima nemusí být příliš zřetelná. V takovém případě není třeba hodnoty parametrů dále měnit a je možné přikročit k manuálnímu proměření, při kterém bude zaznamenán skutečný tvar křivky.

Pokuste se do protokolu přiložit fotografii optimalizované Franckovy-Hertzovy křivky zobrazené na osciloskopu, případně vytvořte v osciloskopu snímek obrazovky a uložte si ho na USB flash disk.

4.4 Manuální proměření Franckovy-Hertzovy křivky

Pro nalezené optimální hodnoty ϑ_S , U_1 a U_3 nyní manuálně proměřte Franckovu-Hertzovu křivku. Pro tyto účely znovu nastavte na napájecí jednotce režim RESET, odpojte osciloskop a ke svorkám s výstupními signály $U_2/10$ a I_A připojte digitální voltmetry a vhodně zvolte rozsahy stupnic měřících přístrojů.

Následně zvolte režim MAN a pro napětí U_2 na intervalu od 0 do 30 V proveďte alespoň 80 měření, přičemž zvolte dostatek bodů v blízkosti maxim a minim Franckovy-Hertzovy křivky, jejichž souřadnice bude nutné stanovit pro určení excitační energie rtuti. Sestrojte a do protokolu přiložte nalezený graf závislosti $I_A(U_2)$.

4.5 Určení excitační energie rtuti

V okolí lokálních maxim a minim Franckovy-Hertzovy křivky proložte data polynomem druhého stupně $I_A = aU_2^2 + bU_2 + c$ a určete souřadnice extrémů (i s chybami). S využitím *postupné metody* určete průměrnou hodnotu excitační energie pro maxima a minima zvlášť a pro stanovení konečného výsledku obě výsledné hodnoty zprůměrujte. Kromě toho diskutujte, který typ extrémů vám připadá pro stanovení excitační energie výhodnější a který vede k přesnějším výsledkům.

Pro zpracování dat je výhodné použít např. programovací jazyk Python, kde lze fitovat s využitím knihovny SciPy a funkce `scipy.optimize.curve_fit()`.

5 Poznámky a bezpečnostní pokyny

- Franckova-Hertzova trubice obsahuje přibližně 5 g rtuti pod nízkým tlakem (cca 12 hPa při teplotě 180 °C). Dojde-li k rozbití trubice, vyvarujte se jakéhokoliv kontaktu s uvolněnou rtutí a nevdechujte rtuťové výpary. O nehodě neprodleně informujte asistenta a začněte s větráním místnosti.
- Při provádění experimentu respektujte následující povolené napěťové rozsahy a Franckovu-Hertzovu trubici nevystavujte po dlouhou dobu vyšším hodnotám:

U_1	U_2	U_3
0-4,8 V	0-30 V	0-4,5 V

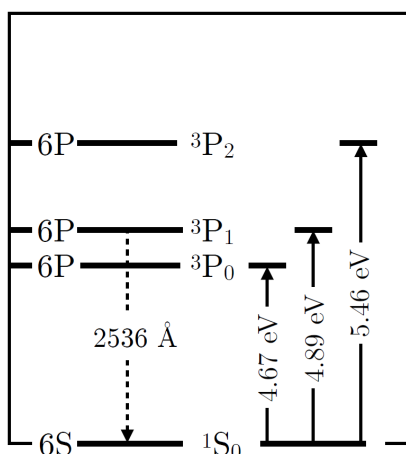
Provozní teplota Franckovy-Hertzova trubice činí přibližně 180 °C. Je doporučeno volit ϑ_S přibližně 170-180 °C. Trubice nikdy nesmí být vystavena teplotám vyšším než 200 °C!

- Po ukončení měření nastavte na napájecí jednotce režim RESET a vypněte ji. Franckovu-Hertzovu nevyndavejte z pícky a nechte ji uvnitř vychladnout.
- Základní stav atomu rtuti značíme ve spektroskopické notaci 1S_0 a nejnižší excitované stavy jsou u rtuti ve skutečnosti tvořeny tripletem 3P , jak je znázorněno na Obr. 7. Nalezenou hodnotu excitační energie rtuti lze porovnat s energií $39412,3 \text{ cm}^{-1} = 4,8865 \text{ eV}$ [5], která odpovídá stavu 3P_1 .

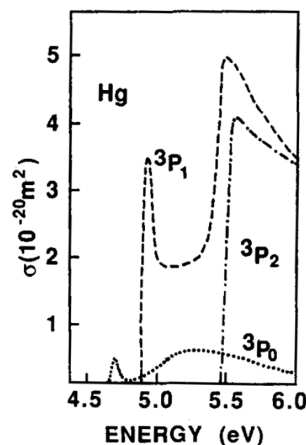
Ačkoliv k přechodu na hladinu 3P_0 může docházet už při energii 4,67 eV, účinný průřez pro interakci $\text{Hg}(^1S_0) + e^- \rightarrow \text{Hg}(^3P_0) + e^-$ je velice nízký v porovnání s ostatními procesy (viz Obr. 8) a jeho příspěvek je zanedbatelný. Doba života stavu 3P_0 je navíc přibližně $10^5 \times$ vyšší než doba života stavu 3P_1 a deexcitace vyzářením fotonu v tomto případě není možná, neboť by nebyl splněn zákon zachování momentu hybnosti. Příspěvek od stavu 3P_2 je rovněž potlačen, jelikož většina elektronů podstupuje nepružné srážky již při energii 4,89 eV.

6 Otázky

1. V jakém ohledu mluví závěry Franckova-Hertzova pokusu ve prospěch Bohrova modelu atomu?



Obr. 7: Energetické hladiny relevantní pro interpretaci výsledků Franckova-Hertzova pokusu [6].



Obr. 8: Závislost účinného průřezu excitace atomů rtuť ze stavu $1S_0$ do jednoho z tripletních stavů $3P$ na kinetické energii elektronu [7].

2. Jaký je rozdíl mezi pružnou a nepružnou srážkou mezi elektrony a atomy rtuť?
3. K čemu potřebujeme při pokusu brzdné napětí U_3 ? Došli bychom v experimentu ke stejnému pozorování i při $U_3 = 0$?
4. Jakým způsobem ovlivňují napětí U_1 a U_3 tvar Franckovy-Hertzovy křivky?

Reference

- [1] 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 [cit. 17.2.2021].
- [2] Wikimedia Commons: *Redrawing of a figure from the original 1914 paper of Franck and Hertz*. Dostupné online z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Franck-Hertz_en.svg [cit. 17.2.2021].
- [3] M. Richmond: *The Franck-Hertz experiment supports Bohr's model*. Dostupné online z: <http://spiff.rit.edu/classes/phys314/lectures/fh/fh.html> [cit. 17.2.2021].
- [4] J. Franck, G. Hertz: *On the excitation of the 2536 Å Mercury Resonance Line by Electron Collisions*. Dostupné online z: [http://hermes.ffn.ub.es/luisnavarro/nuevo_maletin/Franck-Hertz%20\(1914\),%20Excitation%20by%20collisions.pdf](http://hermes.ffn.ub.es/luisnavarro/nuevo_maletin/Franck-Hertz%20(1914),%20Excitation%20by%20collisions.pdf) [cit. 17.2.2021].
- [5] National Institute of Standards and Technology: *Energy Levels of Neutral Mercury (Hg I)*. Dostupné online z: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable5.htm> [cit. 17.2.2021].
- [6] R. Rubenzahl, B. Peng: *The Franck-Hertz Experiment*. Dostupné online z: http://www.pas.rochester.edu/~rrubenza/projects/RAR_PHY243W_Lab2_FranckHertz.pdf [cit. 17.2.2021].
- [7] G. F. Hanne: *What really happens in the Franck-Hertz experiment with mercury?* American Journal of Physics 56, 696 (1988). <https://doi.org/10.1119/1.15503>.