

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY



**Franckův – Hertzův pokus v praktiku z atomové
a jaderné fyziky**

Diplomová práce

Autor: Bc. Karolína Slánská

Studijní program: N1701 Fyzika

Studijní obor: Fyzika – Matematika

Forma studia: Prezenční

Vedoucí práce: doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.

Termín odevzdání práce: květen 2013

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením doc. RNDr. Romana Kubínka, CSc. a že jsem veškerou použitou literaturu uvedla v seznamu literatury.

V Olomouci

.....

podpis

Ráda bych poděkovala především doc. RNDr. Romanu Kubínkovi, CSc. za cenné rady, trpělivost, ochotu a čas, který mi věnoval při tvorbě diplomové práce, rovněž také Mgr. Vítu Procházkovi, PhD. za velkou pomoc při samotné realizaci pokusu.

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKACE

Autor: Bc. Karolína Slánská

Název práce: Franckův – Hertzův pokus v praktiku z atomové a jaderné fyziky

Typ práce: Diplomová práce

Pracoviště: Katedra experimentální fyziky

Vedoucí práce: doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.

Rok obhajoby práce: 2013

Abstrakt:

K uspokojivému popisu struktury atomu vedla dlouhá cesta. Ernest Rutherford představil přijatelný model, který byl v souladu s dvěma základními pilíři klasické fyziky – Newtonovými pohybovými zákony a zákony elektrostatiky, ovšem odporoval dalšímu pilíři a to teorii elektromagnetického pole. Niels Bohr však vytvořil model blízký Rutherfordově modelu, který je ovlivněn kvantovou teorií a již není v rozporu s dalšími fyzikálními zákony. James Franck a Gustav Hertz tuto teorii experimentálně ověřili a zcela zásadně tak ovlivnili rozvoj moderní fyziky. Franckův – Hertzův pokus bývá úlohou praktika z atomové a jaderné fyziky, proto mají studenti vysokých škol možnost si tento významný experiment oceněný Nobelovou cenou za fyziku sami provést.

Klíčová slova: model atomu, elektron, excitace, energetické hladiny, kvantování energie, Bohrovy postuláty, Franckův – Hertzův pokus

Počet stran: 61

Počet příloh: 0

Jazyk: český

BIBLIOGRAPHICAL IDENTIFICATION

Author: Bc. Karolína Slánská

Title: Frack-Hertz experiment in practical excercises of nuclear physics

Type of thesis: Master

Department: Department of Experimental Physics

Supervisor: doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.

The year of presentation: 2013

Abstract:

It has been a long journey to get a satisfactory description of the structure of the atom Ernest Rutherford introduced a plausible model, which was in line with the two basic pillars of classical physics - Newton's laws of motion and law of electrostatics, however it contradicted to the next pillar and electromagnetic field theory. However Niels Bohr created a model which was close to Rutherford's model, which is affected by quantum theory but it isn't in conflict with other laws of physics. James Franck and Gustav Hertz experimentally verified this theory and fundamentally influenced the development of modern physics. Franck – Hertz's experiment is the role of the practitioner in atomic and nuclear physics, so students of universities have the opportunity to try this important experiment which was appraised by Nobel Prize in physics, themselves.

Keywords: model of the atom, the elektron, excitation, energy levels, energy quanta, Bohr's postulates, Franck - Hertz experiment

Number of pages: 61

Number of appendices: 0

Language: Czech

OBSAH

ÚVOD.....	7
1. VÝVOJ PŘEDSTAV O STAVBĚ ATOMU.....	8
1.1 Objev elektronu.....	9
1.2 Thomsonův a Rutherfordův model atomu.....	10
1.3 Nezdár klasické fyziky.....	14
2. BOHRŮV MODEL ATOMU.....	16
2.1 Energetické hladiny a spektra.....	18
2.2 Bohrovy postuláty.....	19
3. FRANCKŮV – HERTZŮV POKUS.....	21
3.1 James Franck.....	21
3.2 Gustav Hertz.....	23
3.3 Princip Franckova – Hertzova pokusu.....	24
3.4 Aparatura Franckova – Hertzova pokusu od firmy Phywe.....	25
3.4.1 Franckova – Hertzova trubice.....	26
3.4.2 Zdroj napájení.....	28
3.4.3 Měřicí zesilovač.....	29
3.4.4 Napájecí zdroj.....	30
3.4.5 Schéma zapojení Franckova – Hertzova pokusu.....	31
4. VLASTNÍ MĚŘENÍ.....	32
4.1 Pro teplotu 170°C.....	32
4.2 Pro teplotu 180°C.....	38
4.3 Pro teplotu 190°C.....	44
5. NÁVOD PRO PROVEDENÍ FRANCKOVA – HERTZOVA POKUSU PRO PRAKTIKUM Z ATOMOVÉ A JADERNÉ FYZIKY.....	50
6. FRANCKŮV – HERTZŮV EXPERIMENT PRO STUDENTY STŘEDNÍCH ŠKOL.....	57
7. ZÁVĚR.....	58
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A OSTATNÍCH ZDROJŮ.....	59

ÚVOD

Již od pradávna lidstvo bádalo nad tím, z čeho je složená hmota a tak můžeme v průběhu věků sledovat řadu různých teorií. Velké objevy jsou však spojeny až s novověkem. Thompson a Rutherford udělali velký krok k tomu, aby lidstvo bylo blíže k poznání struktury atomu, Niels Bohr na jejich výsledky navázal a vytvořil teorii, která je platná a není v rozporu s fyzikálními zákony. Jeho myšlenky však byly v tehdejší světě fyziky přijímány s nedůvěrou a značnou skepsí, neboť svůj výklad opřel o poznatky tehdy vznikající kvantové teorie. Avšak James Franck a Gustav Hertz se jeho myšlenkami inspirovali a rozhodli se je experimentálně ověřit, což se jim také podařilo a za svoji práci byli v roce 1925 odměněni Nobelovou cenou za fyziku. Svým experimentem přispěli k velkému rozvoji moderní fyziky.

Cílem práce bylo zařadit Franckův – Hertzův pokus mezi úlohy v praktiku z atomové a jaderné fyziky, aby se studenti mohli seznámit s tak významným fyzikálním experimentem. Bylo tedy důležité zkompletovat Franckův – Hertzův pokus, odstranit všechny technické nedostatky, které by mohly narušit hladký průběh měření, dále také provést samotné měření, zanalyzovat výsledky a konečně vytvořit studijní text, který bude sloužit jako návod pro Franckův – Hertzův experiment v praktiku z atomové a jaderné fyziky.

1. VÝVOJ PŘEDSTAV O STAVBĚ ATOMU

V současné době je téměř každý člověk obeznámen s faktem, že veškerá hmota kolem nás je tvořena menšími částicemi, které označujeme jako atomy. Ne každý se nad důležitostí této informace pozastaví a spíše ho vnímá jako fakt, který mu byl prezentován ve škole a který je nezpochybnitelný. Pokud sleduje vývoj experimentálních technik, používaných ke studiu atomu a elementárních částic (např. urychlovače prezentované v médiích), musí ho dnešní možnosti vědy fascinovat, nicméně podstata mu uniká. Přitom objevení atomu a jeho popis patří mezi nejvýznamnější objevy v přírodních vědách, ke kterému vedla dlouhá cesta plná mylných a nakonec i správných teorií [1].

Lidé v minulosti byli podobní těm současným svou zvědavostí a touhou po poznání. Všimli si věcí kolem sebe a zajímali se o jejich původ, strukturu i vzájemné interakce. Historie uvažování nad stavbou hmoty se datuje do starověku, konkrétně 400 let př.n.l. a je spojována se jménem řeckého filozofa Demokrita z Abdér (žil pravděpodobně v letech 460 – 370 př.n.l.). Ten tvrdil, že vše, co existuje kolem nás (oheň, voda, vzduch země, člověk, lidská duše), se skládá z malinkých stabilních částic, tzv. atomů (atomos = nedělitelný). Protože se atomy pohybují, způsobují veškeré změny, které se ve světě odehrávají. Demokrita a další myslitele, kteří se strukturou hmoty zabývali, označujeme jako atomisty. Je nutné podotknout, že jejich závěry se neopírají o žádné experimentální výsledky či pozorování, ale jsou pouze důsledkem jejich spekulativního myšlení [1].

Na rozdíl od Demokrita zastávajícího názor, že pokud budeme jakoukoli hmotu dělit na menší a menší části, dojdeme nakonec k částicím – atomům, které už dělit nepůjdou, jeho krajan Aristoteles (384 – 322 př.n.l.) byl přesvědčen, že látku lze dělit neomezeně. Avšak až do 17. století nebyl žádný z následovníků - atomistů schopen předložit takový důkaz, aby tato teorie stála na pevném přírodovědném základu [1].

V pozdějších dobách se na rozvíjení atomistických úvah podíleli např. Boyle (1672 – 1691) nebo Newton (1642 – 1727), kteří předpokládali, že teplo je vlastně vnitřním pohybem. Zásadní pokrok však v rozvoji této myšlenky učinil až Daniel Bernoulli (1700 – 1782), který vzduch ztotožnil s pružnou kapalinou, jejíž částice se v různých směrech rychle pohybují, čímž vlastně odvodil již dříve experimentálně

objevený Boyleův – Mariottův zákon. Předpokládal také, že všechny částice se pohybují stejně rychle [1].

V 19. století se již vědci ztotožnili s myšlenkou, že chemické prvky jsou složeny z atomů, ale o nich samotných nevěděli takřka nic. Do té doby byli přesvědčeni, že atom je dál nedělitelný, ale tato stanovisko jim narušil fakt, že při experimentech se z elektricky neutrálních atomů stávaly nabitě ionty. Další vývoj změnil až objev elektronu a zjištění, že elektrony jsou součástí všech atomů [2].

1.1 Objev elektronu

K objevu elektronu došlo při sledování výboje ve zředěných plynech. Z katody vystupoval svazek záření, na fluorescenčním stínítku vytvořil stopu dopadu. Takové záření označujeme jako katodové paprsky. Prvky vyzařující tyto paprsky mají ty vlastnosti, které jsou připisovány hmotným částicím s elementárním nábojem (příkladem je magnetické pole, které vychyluje stejně svazek záření i proud částic se záporným nábojem). Následně bylo zjištěno, že částice s tímž chováním jsou uvolňovány z povrchu pevných látek (termoemise, vnější fotoefekt). Tyto pokusy prokázaly, že z elektricky neutrálního atomu je možné uvolnit nositele záporného elementárního elektrického náboje. Tyto částice dostaly název elektrony. Elektron se tak stal první objevenou elementární částicí [3].

Důležitou fyzikální vlastností elektronu je jeho náboj, který tvoří elementární množství elektrického náboje. Náboj byl určen při známém Millikanově pokusu. Mezi desky rovinného kondenzátoru byly vstříkovány kapičky oleje, které nesly určité množství elektrického náboje. Bez přítomnosti elektrického pole kapičky vlivem tíhové síly padaly dolů, při připojení elektrického pole však začaly stoupat vlivem elektrostatické síly. Ze statistického zpracování souboru takto nabitých olejových kapek byla zjištěna hodnota elementárního náboje

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C},$$

a bylo potvrzeno, že elektrický náboj je kvantován [4].

Experimentální cestou bylo také J.J. Thomsonem zjištěno, jaká je klidová hmotnost elektronu a to

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}.$$

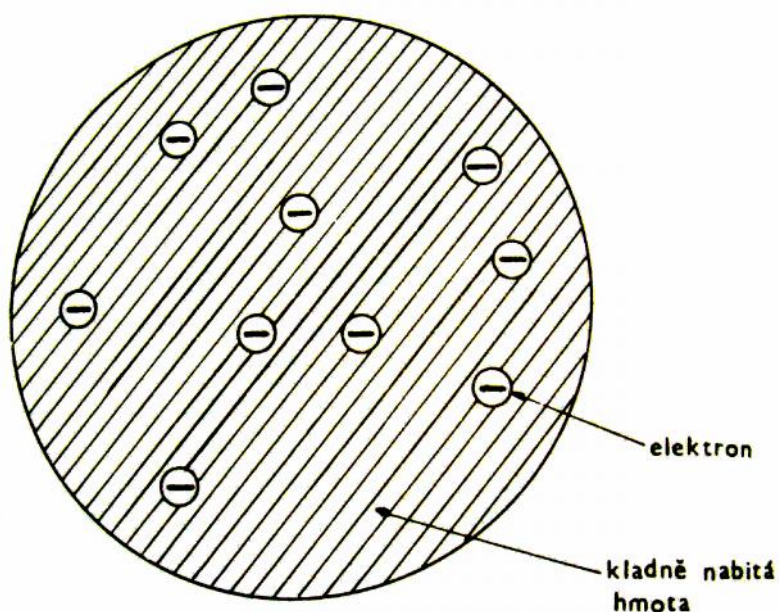
Všechny nové poznatky související s objevem elektronu a některých jeho vlastností přineslo řadu otázek:

- rozdělení zbývající hmotnosti v atomu,
- rozmístění kladného elektrického náboje,
- jak jsou vázány elektrony ve struktuře atomu [3].

Na tyto otázky se snažilo odpovědět mnoho vědců a vytvořili modely, kterými interpretovali své představy o stavbě atomu.

1.2 Thomsonův a Rutherfordův model atomu

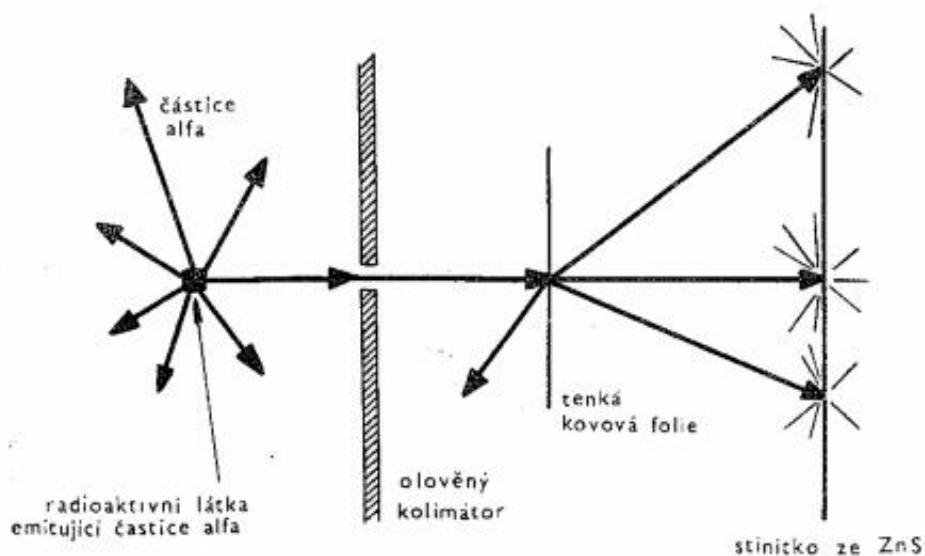
První významný model atomu představil v roce 1898 J.J. Thomson. Tento model říká, že atom je homogenní koule elektricky kladně nabitě hmoty, v níž jsou ponořeny záporně nabitě elektrony (tento model je často označován jako “puďinkový”). Otázkou bylo, co přesně udržuje tento systém pohromadě [2].



Obr. 1.1 Thomsonův model atomu (převzato z [2])

Thomsonův model čekal 13 let na své experimentální ověření. Ten provedli v roce 1911 Geiger a Marsden na popud Ernesta Rutherforda.

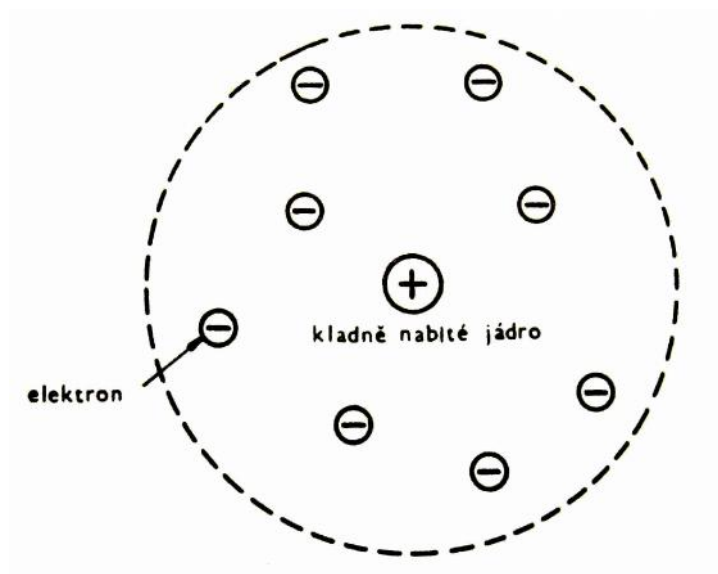
Jako sondu použili částice alfa, jádra atomů hélia. Tyto částice vznikají při radioaktivním rozpadu některých těžkých atomů. Zdroj těchto částic byl umístěn za olověnou desku opatřenou malým otvorem, díky němuž získali úzký svazek částic alfa směřující na tenkou zlatou fólii. Ta byla opatřena stínítkem ze sulfidu zinečnatého, který reaguje na přítomnost částic alfa viditelným světelným zábleskem. Vzhledem k tomu, že Thomsonův model předpokládá rovnoměrné rozložení náboje uvnitř atomu, očekávaným výsledkem bylo, že většina částic alfa projde přímo zlatou fólií a jen několik málo se vychýlí. Skutečnost však byla jiná. Většina částic sice opravdu bez odchytky proletěla zlatou fólií, část však byla vychýlená o značný úhel a několik bylo dokonce vráceno do původního směru. Je nutno podotknout, že hmotnost částic alfa je oproti hmotnosti elektronu značně větší (jsou asi 7000x těžší), takže na ně zřejmě působily opravdu velké síly, když dokázaly takovýmto způsobem ovlivnit směr jejich dráhy [2].



Obr. 1.2 Rutherfordův pokus s rozptylem (převzato z [2])

Na základě získaných poznatků Rutherford usoudil, že atom se skládá z velmi drobného, kladně nabitého jádra, v němž je soustředěna téměř veškerá hmota atomu. Elektrony se zdržují v blízkosti jádra, zbytek atomu je potom prázdný prostor, což vysvětluje, proč většina částic proletěla přímočaře bez jakékoliv odchytky. Na rozdíl od srážky s jádrem. V tomto případě silné elektrické pole způsobilo vychýlení částic z původního směru. Malá hmotnost elektronu neměla větší vliv na odchylku ze směru

letících částic. Thomsonův model byl Rutherfordem zvržen a předložen vědecké obci jako nový model atomu.



Obr. 1.3 Rutherfordův model atomu (převzato z [2])

Avšak i tento model měl nejasnosti. V Thomsonově modelu byly elektrony ponořeny, takže se u nich nepředpokládal pohyb. Což se o Rutherfordově modelu říci nedá. K objasnění tohoto problému lze využít analogii soustavy planet. Ty obíhají okolo Slunce po oběžných drahách přitahovány gravitační silou Slunce. V planetárním modelu atomu elektrony také obíhají po určitých drahách, tzv. orbitách a jsou přitahovány coulombovskou silou jádra. Pokud aplikujeme zákony elektromagnetismu, tak dostáváme fakt, že elektrické náboje pohybující se se zrychlením vyzařují energii ve formě elektromagnetického vlnění, což vede ke ztrátě energie [2].

Aplikujme tedy klasickou dynamiku na nejjednodušší ze všech atomů – vodík. Předpokládejme pro jednoduchost, že se pohybuje po kruhové dráze. Síla, která na elektron pohybující se kolem jádra působí jako dostředivá a udržuje jej v konstantní vzdálenosti r od jádra, je síla elektrostatická [2].

Tedy

$$F_e = \frac{mv^2}{r} \quad (1.1)$$

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}. \quad (1.2)$$

Pro stabilitu dráhy platí

$$F_e = F_c,$$

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}. \quad (1.3)$$

Rychlost elektronu tedy evidentně souvisí s poloměrem jeho dráhy vztahem

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 mr}}. \quad (1.4)$$

Celková energie atomu vodíku je určena součtem jeho kinetické energie

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

a jeho potenciální energie

$$V = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Tedy

$$E = T + V = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Dosazením za v ze vztahu (1.4) dostaneme

$$E = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}. \quad (1.5)$$

Celková energie elektronu je tedy záporná. Kdyby byla větší než 0, elektrony by měly příliš mnoho energie na to, aby zůstaly na uzavřené dráze kolem jádra [2].

Uvedené poznatky jsou aplikací klasických Newtonových pohybových zákonů a zákonů elektrostatických, což jsou 2 hlavní pilíře klasické fyziky. Z tohoto pohledu vypadá atom skutečně stabilní, ale je třeba zohlednit další nedílnou součást klasického výkladu fyziky, a to je teorie elektromagnetického pole. Ta tvrdí, že se zrychlením se pohybující elektricky nabitě částice, vyzařují energii ve formě elektromagnetických vln [2].

1.3 Nezdár klasické fyziky

Časová změna energie je rovna

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 a^2}{4\pi\epsilon_0 c^3} \quad (1.6)$$

Zrychlení elektronu je rovno dostředivému zrychlení, což znamená při použití vztahu (1.4)

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m r^2},$$

potom

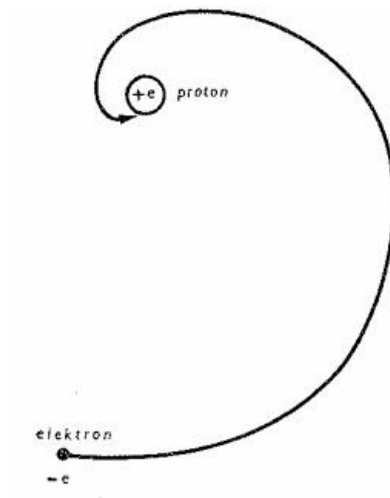
$$P = \frac{2}{3} \frac{e^6}{(4\pi\epsilon_0)^3 c^3 m^2 r^4}.$$

Pro vodíkový atom platí, že $r = 5,3 \cdot 10^{-11}$ m. Pak tedy

$$P = \frac{2}{3} (9 \cdot 10^9)^3 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^3}{(3 \cdot 10^8)^3 (9,1 \cdot 10^{-31})^2 (5,3 \cdot 10^{-11})^4} = 4,6 \cdot 10^{-9} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Tato skutečnost ukazuje na rychlý úbytek energie elektronu, ze vztahu vyplývá, že elektron ztrácí energii rychleji a rychleji, tudíž by se během 10^{-16} s měl stabilní atom vodíku zhroutit [2].

Proběhla však řada experimentů a i s vlastní zkušenostmi víme, že atom vodíku zůstává stabilní. „Tento rozpor může znamenat jen jednu jedinou věc: Fyzikální zákony, platné v makroskopickém světě, neplatí v mikroskopickém světě atomu“. [2, str. 132, 133]



Obr. 1.4 Pohyb elektronu podle klasické fyziky (převzato z [2])

2. BOHRŮV MODEL ATOMU

Jak je známo, elementární částice se mohou chovat jako vlny i jako částice. Částici můžeme přiřadit tzv. de Broglieho vlnovou délku, pro kterou platí

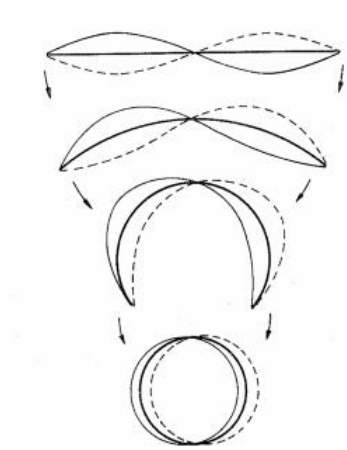
$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

kde h je Planckova konstanta. Pokud za v dosadíme již známý vztah (2.4), dostaneme

$$\lambda = \frac{h}{e} \sqrt{\left(\frac{4\pi\epsilon_0 r}{m}\right)}. \quad (2.1)$$

Poloměr dráhy elektronu je roven $r = 5,3 \cdot 10^{-11}$ m, vlnová délka má tedy potom hodnotu $\lambda = 33 \cdot 10^{-11}$ m. Pokud bychom chtěli spočítat obvod kruhové dráhy elektronu, zjistíme, že je stejný jako vlnová délka elektronu, tedy $2\pi r = 33 \cdot 10^{-11}$ m. „Dráha elektronu v atomu vodíku odpovídá jedné celé elektronové vlně, jež navazuje sama na sebe“. [2, str. 141]

Pokud bychom uvažovali drátěnou smyčku, která kmitá, dojdeme k závěru, že všechny vlny na sebe navazují, a že obvod je roven celočíselným násobkům vlnové délky kmitů této smyčky. „Uvažující chování elektronových vln v atomu vodíku jako analogii kmitů drátěné smyčky, máme možnost postulovat, že elektron může kroužit kolem jádra nekonečně dlouho aniž by vyzařoval energii za předpokladu, že jeho dráha obsahuje celočíselný počet de Broglieho vlnových délek“. [2, str. 141]



Obr. 2.1 Dráha elektronu ve vodíkovém atomu odpovídá úplné de Broglieho vlně, jež navazuje sama na sebe (převzato z [2])

Tento postulát lze vyjádřit matematicky a to následovně:

$$n\lambda = 2\pi r_n, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (2.2)$$

kde r_n je poloměr dráhy elektronu, která obsahuje n vlnových délek. Toto číslo n bývá označováno jako kvantové číslo dráhy.

Využitím vztahu pro výpočet vlnové délky (2.1) obdržíme

$$\frac{nh}{e} \sqrt{\left(\frac{4\pi\epsilon_0 r_n}{m}\right)} = 2\pi r_n,$$

vyjádřením r_n dostáváme vztah pro výpočet poloměru stabilních drah elektronu, tedy

$$r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

Pokud do vztahu dosadíme 1, dostáváme již známou hodnotu této veličiny, jedná se o poloměr první vnitřní dráhy, označujeme ji

$$r_1 = a_0 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m.}$$

Nazývá se jako tzv. Bohrovův poloměr [2].

Poloměr ostatních drah se spočítá pomocí vztahu

$$r_n = n^2 a_0,$$

z čehož vyplývá, že vzdálenost vedlejších drah se s rostoucím n zvětšuje [2].

2.1 Energetické hladiny a spektra

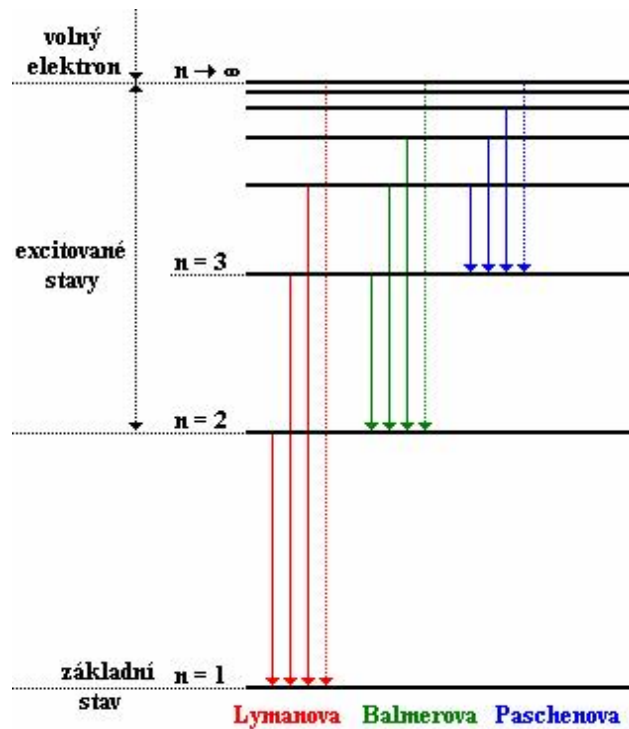
Elektrony se pohybují po určitých drahách, jejichž poloha je dána poloměrem r_n . Těmto stavům odpovídají hodnoty energie, které jsou dány vztahem

$$E_n = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}.$$

Pokud za r_n dosadíme vztah (2.3), dostáváme

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n^2} \right), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.4)$$

Takovéto energie označujeme jako tzv. energetické hladiny [2].



Obr. 2.2 Spektrum atomu vodíku (převzato z [5])

Nejnižší stav o energii E_1 , kdy $n = 1$, se nazývá základní stav, stavy E_2, E_3, E_4, \dots , kterým odpovídají hodnoty $n = 2, 3, 4, \dots$, se nazývají stavy excitované (vzbuzené) [2].

Je užitečné vyčíslit hodnotu energie základního energetického stavu atomu vodíku, neboť se často využívá v různých oblastech atomové fyziky. Je energetickou jednotkou, nazýváme ji rydberg (Ry) a její číselná hodnota je

$$1 \text{ Ry} = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = 13,6 \text{ eV} .$$

Jak už obrázek 2.2. napovídá, energetické hladiny atomu vodíku mají souvislost s čárovými spektry. Při přechodu z vyšší energetické hladiny na nižší totiž elektron uvolní energii ve formě elektromagnetického záření podle vztahu $E_i - E_f = h\nu$, kde E_i je energie počátečního stavu (s vyšší energií), E_f energie konečného stavu (s nižší energií) a ν je frekvence uvolněného fotonu [2, 5].

2.2 Bohrovy postuláty

Jak už bylo řečeno, Rutherfordův model atomu není stabilní podle zákonů klasické fyziky. Studium spekter dále ukazuje, že emisní spektrum atomů není spojité. Touto problematikou se zabýval Niels Bohr (1885 – 1962) a v roce 1913 vyslovil následující postuláty:

- „atomy se nacházejí v ustálených (stacionárních) energetických stavech, ve kterých neabsorbují ani neemitují energii. Energie, odpovídající těmto stavům, tvoří diskrétní posloupnost a řídí se kvantovými pravidly“,
- „atom emituje nebo absorbuje záření po kvantech, při přechodu z jednoho stacionárního stavu do druhého. Pro kvantum záření platí $h\nu = E_i - E_f$, kde E_i je energie počátečního a E_f energie konečného stavu atomu“. [3, str. 51]

Nabízí se otázka, jakým způsobem se atom dostává na vyšší energetickou hladinu a stává se tak excitovaným. Existují 3 základní mechanismy excitace atomu:

- srážka atomu s jiným atomem nebo částicí,
- tepelná excitace,

- absorpce fotonu, který má takovou energii, že dokáže příslušný atom dostat na vyšší energetickou hladinu [2, 6].

Všechny uvedené poznatky byly pouhou fikcí, kterou tehdejší vědci přijímali s velkou nedůvěrou a značnou skepsí. V letech 1913 – 1914 však pánové Franck a Hertz provedli řadu pokusů, kterými tuto hypotézu potvrdili a dali tak pevný základ nově vznikající kvantové mechanice.

3. FRANCKŮV HERTZŮV POKUS

3.1. James Franck



Obr. 3.1 James Franck (převzato z [7])

James Franck se narodil 26. srpna 1882 v Hamburku. Po absolvování Wilhelmova gymnázia studoval rok chemii na univerzitě v Heidelbergu, a poté studoval fyziku na univerzitě v Berlíně, kde jeho hlavními lektory byli Emil Warburg a Paul Drude. Titul PhD. získal v roce 1906 v Berlíně a poté, co krátkou dobu působil jako asistent ve Frankfurtu nad Mohanem, se vrátil do Berlína, aby se stal asistentem Heinricha Rubense. V roce 1911 začal přednášet na univerzitě v Berlíně jako člen ústavu fyziky, kde získal titul docenta. Zde zůstal až do roku 1918. Stejně jako Hertz bojoval na frontě a byl vyznamenán Železným křížem první třídy [7].

Po první světové válce byl jmenován členem a vedoucím oddělení fyziky v institutu Kaiser Wilhelm pro fyzikální chemii na Berlin-Dahlem. V roce 1920 se stal Frank profesorem experimentální fyziky a ředitelem 2. institutu experimentální fyziky na univerzitě v Göttingenu. Během let 1920-1933, kdy se Göttingen stal důležitým centrem kvantové fyziky, Franck úzce spolupracoval s Maxem Bornem. Právě v Göttingenu se Frank projevil jako vysoce nadaný učitel. Tam se kolem něj shromažďoval kruh jeho studentů. Byla mezi nimi taková významná jména jako Blackett, Condon, Kopfermann, Kroebel, Maier-Leibnitz, Oppenheimer a Rabinovich, kteří v pozdějších letech prosluli v jiných oborech [7].

Poté, co se vlády v Německu ujali nacisté, se Franck odstěhoval společně se svou rodinou do Baltimore, kam byl pozván, aby přednášel na John Hopkins University. Následně odjel na rok do Kodaně, kde působil jako hostující profesor. V roce 1935 se

vrátil do Spojených států, opustil John Hopkins University a v roce 1938 přijal místo profesora na fyzikální chemii univerzity v Chicagu. Během druhé světové války působil Franck jako ředitel chemického oddělení metalurgické laboratoře na univerzitě v Chicagu, která byla centrem projektu Manhattan [7].

Zatímco v Berlíně byla hlavním oborem výzkumu profesora Francka kinetika elektronů, atomů a molekul, jeho počáteční výzkumy USA se zabývaly vedením elektřiny v plynech. Později, spolu s Hertzem, vyšetřoval chování volných elektronů v různých plynech - zejména neelastické dopady elektronů, které v konečném důsledku vedly k experimentálnímu důkazu některých základních pojmů Bohrovy teorie. Zato jim byla udělena Nobelova cena za rok 1925 a „Franckův-Hertzův pokus“ se stal zásadním experimentem v oblasti atomové fyziky [7].

Franckovy další výzkumy, z nichž mnohé byly provedeny se spolupracovníky a studenty, se věnovaly také problematice atomové fyziky. Byla studována výměna energie excitovaných atomů (dopady druhého typu, fotochemické průzkumy) a řešeny optické problémy spojené se základními procesy při chemických reakcích. Během jeho působení v Göttingenu byla většina jeho studií věnována fluorescenci plynů a par. V roce 1925 navrhl mechanismus, kterým vysvětlil své vyjádření fotochemického rozkladu molekul jódu [7].

Franck dodržoval morální hodnoty. Byl jedním z prvních, kdo otevřeně demonstroval proti vydání rasových zákonů v Německu tím, že v roce 1933 odstoupil z univerzity v Göttingenu, Rovněž, se skupinou atomových vědců, v roce 1945 otevřeně naléhal („Franck Report“), aby byla atomová bomba použita v neobydleném místě Japonska [7].

Kromě Nobelovy ceny profesor Franck obdržel v roce 1951 medaili Maxe Placka od Německé fyzikální společnosti. V roce 1953 byl v univerzitním městě Göttingen jmenován čestným občanem. V roce 1955 dostal Rumfordovu medaili americké akademie umění a věd za jeho práci zabývající se fotosyntézou, které se věnoval během jeho působení ve Spojených státech. V roce 1964 byl profesor Franck zvolen zahraničním členem Královské společnosti v Londýně za jeho přínos k pochopení výměny energie při srážkách elektronů, k výkladu molekulárních spekter a řešení jevu fotosyntézy [7].

Profesor Franck zemřel v Německu dne 21. května 1964, při návštěvě Göttingenu [7].

3.2. Gustav Hertz



Obr. 3.2 Gustav Hertz (převzato z [8])

Gustav Ludwig Hertz se narodil v Hamburku 22. července 1887, Navštěvoval Johanneumovu školu v Hamburku, své vysokoškolské vzdělání zahájil v Göttingenu v roce 1906, následně studoval na univerzitách v Mnichově a Berlíně, promoval v roce 1911. V roce 1913 byl jmenován odborným asistentem na fyzikálním ústavu berlínské univerzity, ale s nástupem 1. světové války byl mobilizován a následně těžce zraněn v akci v roce 1915. Hertz se vrátil do Berlína v roce 1917. Od roku 1920 do roku 1925 pracoval v laboratoři fyziky Philips Incandescent Lamp Factory v Eindhovenu [8].

V roce 1925 byl zvolen profesorem a ředitelem fyzikálního institutu univerzity v Halle a v roce 1928 se vrátil do Berlína jako ředitel institutu fyziky technologické univerzity v Charlottenburgu. Hertz rezignoval z politických důvodů v roce 1935, vrátil se do průmyslového odvětví jako ředitel výzkumné laboratoře společnosti Siemens. Od roku 1945 do roku 1954 působil jako vedoucí výzkumné laboratoře v Sovětském svazu, kde byl jmenován profesorem a později byl ředitelem fyzikálního institutu na Univerzitě Karla Marxe v Lipsku. Pracoval do roku 1961 a od té doby žil v důchodu, nejprve v Lipsku a později v Berlíně [8].

Hertzovy první výzkumy se týkaly absorpce IČ záření v oxidu uhličitým v závislosti na tlaku a parciálním tlaku. V roce 1913 začal spolupracovat s Jamesem Franckem. Později demonstroval kvantitativní vztahy mezi řadou spektrálních čar a energetickými ztrátami elektronů v kolizi s atomy, které odpovídají stacionárním

energetickým stavům atomů. Jeho výsledky byly v dokonalé shodě s Bohrovou teorií, která zahrnovala použití kvantové teorie Maxe Plancka [8].

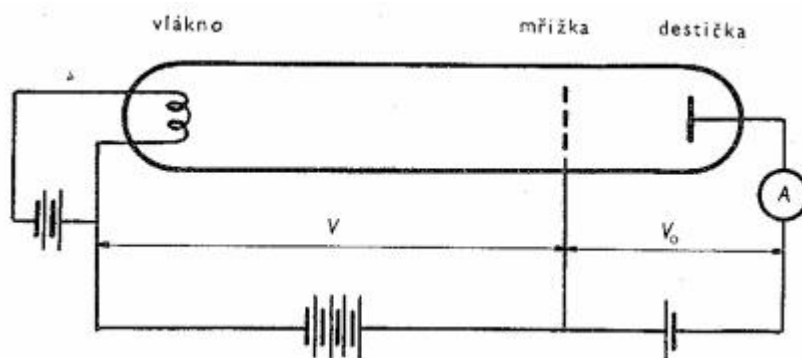
Hertz publikoval řadu prací sám, ale i s Franckem, či Kloppersem. Práce se týkaly např. kvantitativní výměny energie mezi elektrony a atomy, jakož i měření ionizačních potenciálů. Je také autorem některých dokumentů týkajících se dělení izotopů [8].

Gustav Hertz byl členem německé akademie věd v Berlíně, korespondentem Göttingenské akademie věd, byl také čestný člen Maďarské akademie věd, člen Československé akademie věd a zahraniční člen Akademie vědy SSSR. Získal medaili Maxe Plancka v německé fyzikální společnosti [8].

Gustav Hertz zemřel 30. října 1975 [8].

3.3 Princip Franckova – Hertzova pokusu

V roce 1913 navázali pánové Franck a Hertz na práci Nielse Bohra a chtěli jeho myšlenku o kvantování energie elektronů v atomech experimentálně potvrdit. Princip byl následující. Atomy par různých prvků, nejčastěji rtuti nebo neonu, jsou bombardovány elektrony. Pokud se jedná o pružnou srážku, kdy atom energii nepřijímá, pak se nemění ani kinetická energie elektronu a důsledkem je pouze změna směru rychlosti, kdy se elektron vychýlí ze svého původního směru. V případě nepružné srážky však elektrony svou energii předávají atomům par, ty se díky této kolizi dostávají ze základního do excitovaného stavu. K tomuto bombardování bylo použito zařízení zobrazené na obrázku 4.3. [2,9,10].



Obr. 3.3 Aparatura pro Franckův – Hertzův pokus (převzato z [2])

Jedná se o tzv. Franck – Hertzovu trubici, která je naplněna plynem, jak už bylo řečeno, nejčastěji parami rtuti nebo neonu. K vlákně, katodě, je přiveden proud, díky tomu se rozžhává a emituje elektrony, které jsou urychlovány elektrickým polem, vytvořeným katodou a mřížkou. V případě, že mezi elektronem a atomem prvku dojde k nepružné srážce, elektron ztrácí téměř veškerou svou energii a je zachycen slabě kladně nabitou destičkou. Pokud se jedná o pružnou srážku, elektron má dostatek energie, překonává i brzdné napětí V_0 vyvolané mezi mřížkou a destičkou a dostává se až na tuto destičku (anodu), k níž je připojen galvanometr, který měří hodnoty protékajícího proudu I [2, 9, 10, 15].

Při určitých hodnotách urychlovacího napětí U dochází mezi elektrony a atomy par k velkému počtu nepružných srážek, takže můžeme pozorovat první velký pokles proudu procházejícího galvanometrem A . Za další pozorované poklesy proudu jsou odpovědné opět nepružné srážky elektronů s atomy. Pro atomy rtuti Franck s Hertzem zjistili, že tyto poklesy odpovídají násobkům napětí $U = 4,9 \text{ V}$, zároveň energetický rozdíl základního a prvního excitovaného stavu je $\Delta E = 4,9 \text{ eV}$ [2, 9, 10].

Z těchto poznatků tedy vyplývá, že pokud je energie elektronů menší, než jistá kritická hodnota, jedná se o pružnou srážku elektronu s atomem, který tudíž energii nepřijímá. Je-li ovšem dosaženo tzv. kritické hodnoty energie elektronu, která zároveň odpovídá excitační energii atomu, dochází k nepružné srážce a atom plynu se dostává na vyšší energetickou hladinu, přičemž je tato energie přijímána v kvantech, která jsou dána rozdílem energií dvou energetických hladin [2, 9, 10, 16].

Franck s Hertzem tímto pokusem prokázali, že pokud atom přijme od elektronu určité minimální množství energie, může se dostat na vyšší energetickou hladinu, což je obsahem Bohrových postulátů, tudíž dokázali jejich platnost.

3.4 Aparatura Franckova – Hertzova pokusu od firmy PHYWE

Katedra experimentální fyziky má v inventáři aparaturu pro Franckův Hertzův pokus, bylo však nutné některé komponenty doobjednat, aby byl kompletní. O celkové a správné sestavení aparatury se zasloužil především pan Mgr. Vít Procházka, PhD. Na mně bylo provést řadu měření, aby bylo dosaženo správných výsledků.

Od začátku měření jsem se potýkala s řadou problémů. Nejdříve to byla nestabilita hodnot proudu. Při realizaci pokusu se neustále chaoticky měnily, takže nebylo možné pro jistou hodnotu napětí zapsat odpovídající hodnotu proudu. Po čase jsme zjistili, že toto chování souvisí se změnou teploty. Franckova – Hertzova pícka je vybavena termostatem, který při poklesu teploty po určité době sepne a opět vyhřeje pícku na nastavenou teplotu. Ovšem pokles teploty byl velký (asi 20 - 30°C), takže tato skutečnost výrazně zkreslovala výsledky měření. Bylo to poznat na základě hlasitého sepnutí termostatu, v tuto chvíli nebylo zvyšováno urychlovací napětí, pouze odečítány hodnoty proudu a právě po sepnutí termostatu byla nestabilita proudu patrná nejvíce. Tento problém jsme vyřešili doplněním aparatury o regulátor teploty. Při zahřívání pícky bylo třeba nastavit regulátor tak, aby teplota byla stabilní, proto je třeba poměrně dlouhou dobu počkat, až se ustálí. Hodnoty proudu však od té doby byly stabilní a bylo možné je pohodlně odečítat.

Ovšem i přes tuto důležitou a cennou úpravu někdy přece jen proud kolísal. K aparatuře jsme tedy připojili osciloskop a sledovali, jak se hodnoty proudu mění. Napětí bylo stabilní, ovšem proud v některých chvílích kolísal. Po určité době jsme vysledovali, že jeho stabilita je závislá na okolním prostředí, konkrétně na prudkých pohybech kolem aparatury. Kabeláž je citlivá na dotyk, proto je třeba při realizaci pokusu sedět v klidu, zbytečně nesahat na kabely. Pro jistotu jsme raději pokus přeskládali tak, aby studenti při měření co nejméně svou činností o kabely zavadili.

Bylo také nutné kontrolovat multimetry. Slabá baterie totiž výsledky měření značně zkreslovala a hodnoty nebyly přesné.

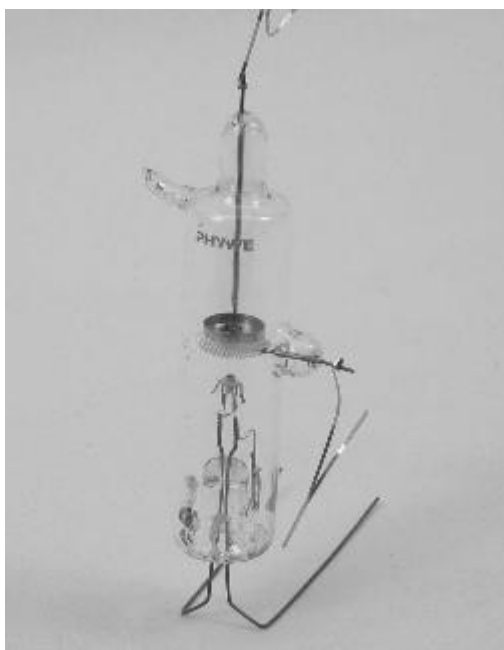
Po řadě hodin strávených u aparatury jsme nakonec přece jen všechny problémy odstranily, měření teď vykazuje stabilní hodnoty, studenti nemusí řešit žádné komplikace. Proto mohl být pokus zařazen do praktika z atomové a jaderné fyziky.

Naše laboratoř je vybavena aparaturou od firmy PHYWE pro provedení Franckova – Hertzova pokusu. Je tvořena následujícími komponenty:

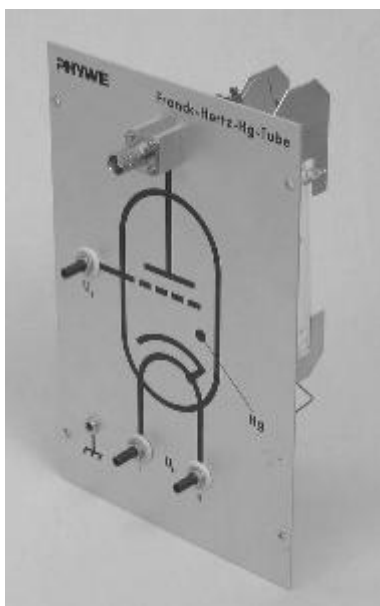
3.4.1 Franckova – Hertzova trubice

Jedná se o vyčerpanou trubici naplněnou rtuťovými parami, uvnitř které se odehrávají pružné a nepružné srážky elektronů s atomy. Obsahuje katodu, mřížku a

anodu, jak už bylo popsáno v předchozí kapitole. Pro provedení Franckova – Hertzova pokusu je třeba dosáhnout patřičné teploty, proto je trubice umístěna v pícce. Na zadní straně této pícky najdeme schéma zapojení trubice, zdířky pro zapojení měřidel a zdrojů napájení. Teplotu regulujeme pomocí teploměru, jenž je součástí této pícky. Maximální dosažitelná teplota je asi 300°C. Nutnost zahřátí spočívá ve skutečnosti, že při vyšší teplotě se zvýší tlak rtuťových par, tudíž i pravděpodobnost srážek mezi atomy rtuti a elektrony emitovanými z katody [9].

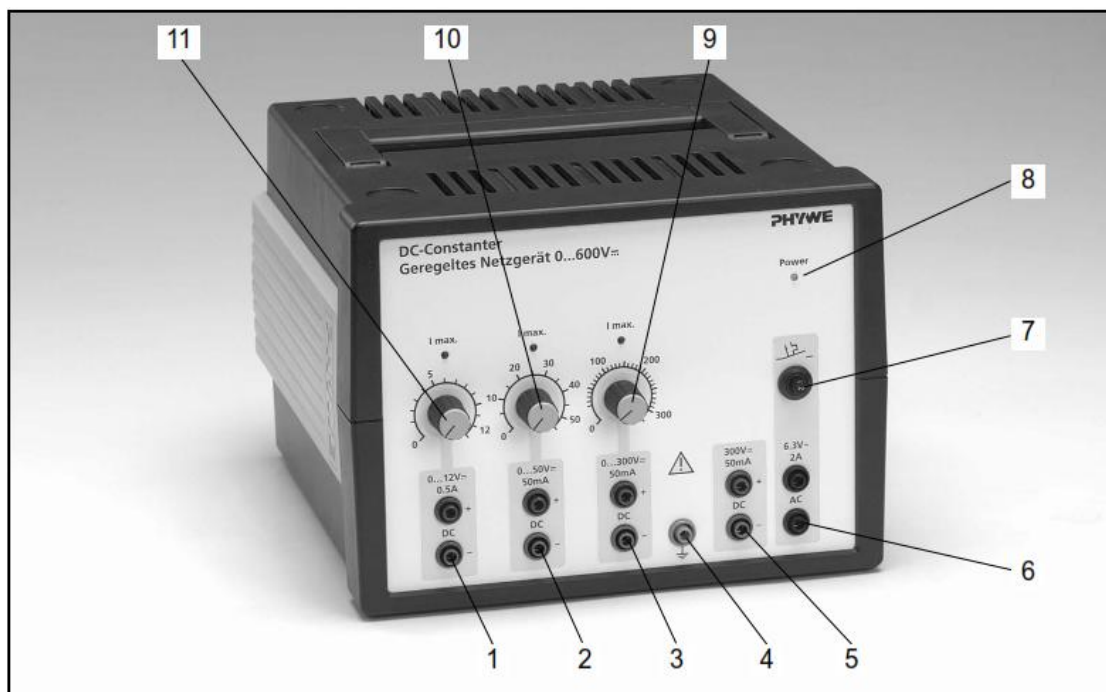


Obr.3.4.1 Franckova – Hertzova trubice (převzato z 11)



Obr. 3.4.2 a 3.4.3 Franckova – Hertzova píčka (převzato z [12])

3.4.2 Zdroj napájení



Obr. 3.4.4 Zdroj napájení (převzato z [13])

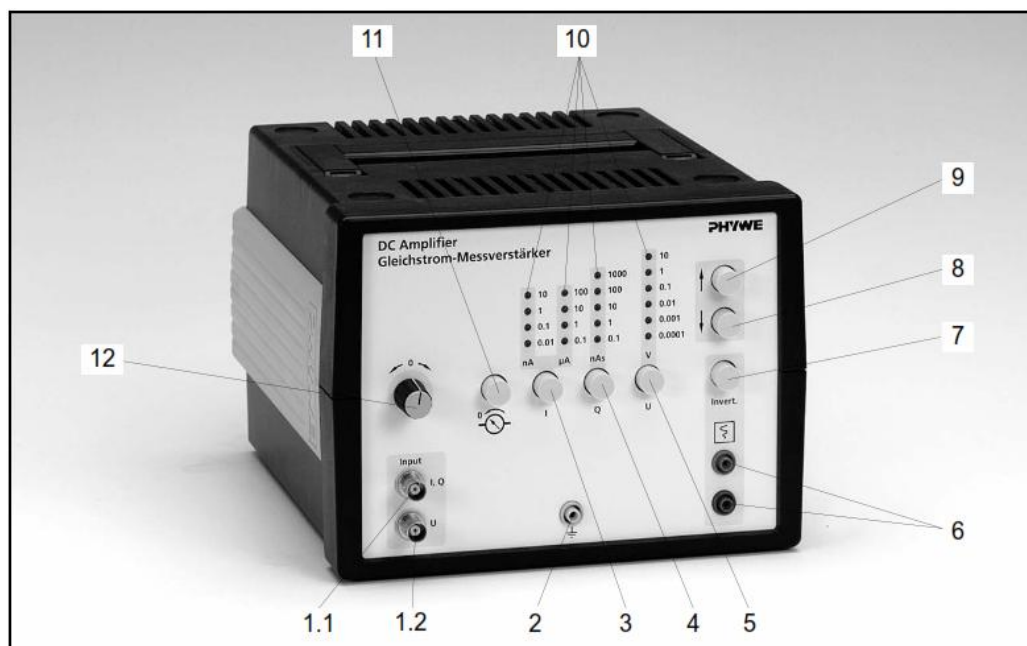
Tento přístroj slouží jako zdroj napětí, nejvyšší možná dosažitelná hodnota je až 600 V. Je vybaven několika funkčními a ovládacími prvky:

1. výstup, 0 – 12V-/0.5,
2. výstup, 0 – 50V-/50mA,
3. výstup, 0-300V-/50mA,
4. uzemňovací zásuvka,
5. výstup, 300V-/50mA,
6. výstup, 6,3V ~/2A,
7. výstup, proudový jistič pro 6,3V ~,
8. dioda značící, že je přístroj zapnutý,
9. nastavovací hlavice, kterou lze dosáhnout napětí až 300V,
10. nastavovací hlavice, kterou lze dosáhnout napětí až 50V,
11. nastavovací hlavice, kterou lze dosáhnout napětí až 12V.

Výstupy 1,2,3,5,6, jsou tvořeny dvěma zásuvkami, jedna modré a druhá červené barvy. Modrá barva značí záporný pól, červená kladný pól.

3.4.3 Měřicí zesilovač

Toto zařízení slouží jako univerzální měřicí přístroj k měření stejnosměrných proudů velmi malých hodnot. Je možno využít až 19 rozsahů, přepínání mezi jednotlivými rozsahy se provádí pomocí tlačítek.

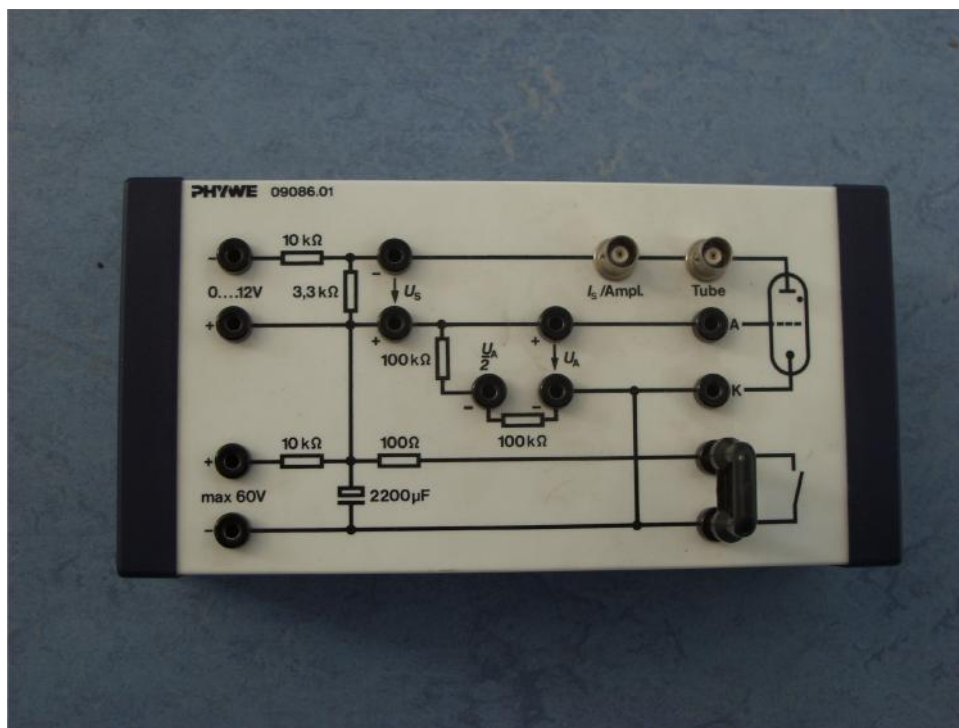


Obr. 3.4.5 Měřicí zesilovač (převzato z [14])

Funkční a ovládací prvky:

- 1.1 zásuvka, vstup I, Q, slouží k připojení obvodu, současně k nabíjení a měření,
- 1.2 zásuvka, vstup, slouží k připojení obvodu,
2. uzemňovací zásuvka,
3. tlačítko I, jeho přepnutím se dostáváme do režimu měření proudu,
4. tlačítko Q, jeho přepnutím se dostáváme do režimu měření náboje,
5. tlačítko U, jeho přepnutím se dostáváme do režimu měření napětí,
6. výstup,
7. tlačítko Invert, slouží ke změně výstupního signálu,
8. tlačítko sloužící ke snížení rozsahu měření,
9. tlačítko sloužící ke zvýšení rozsahu měření,
10. dioda značící, ve kterém rozsahu měření probíhá,
11. tlačítko, při jehož zmáčknutí zůstává zkratován asi jednu sekundu,
12. ovládací knoflík pro nastavení nulového bodu.

3.4.4 Napájecí zdroj

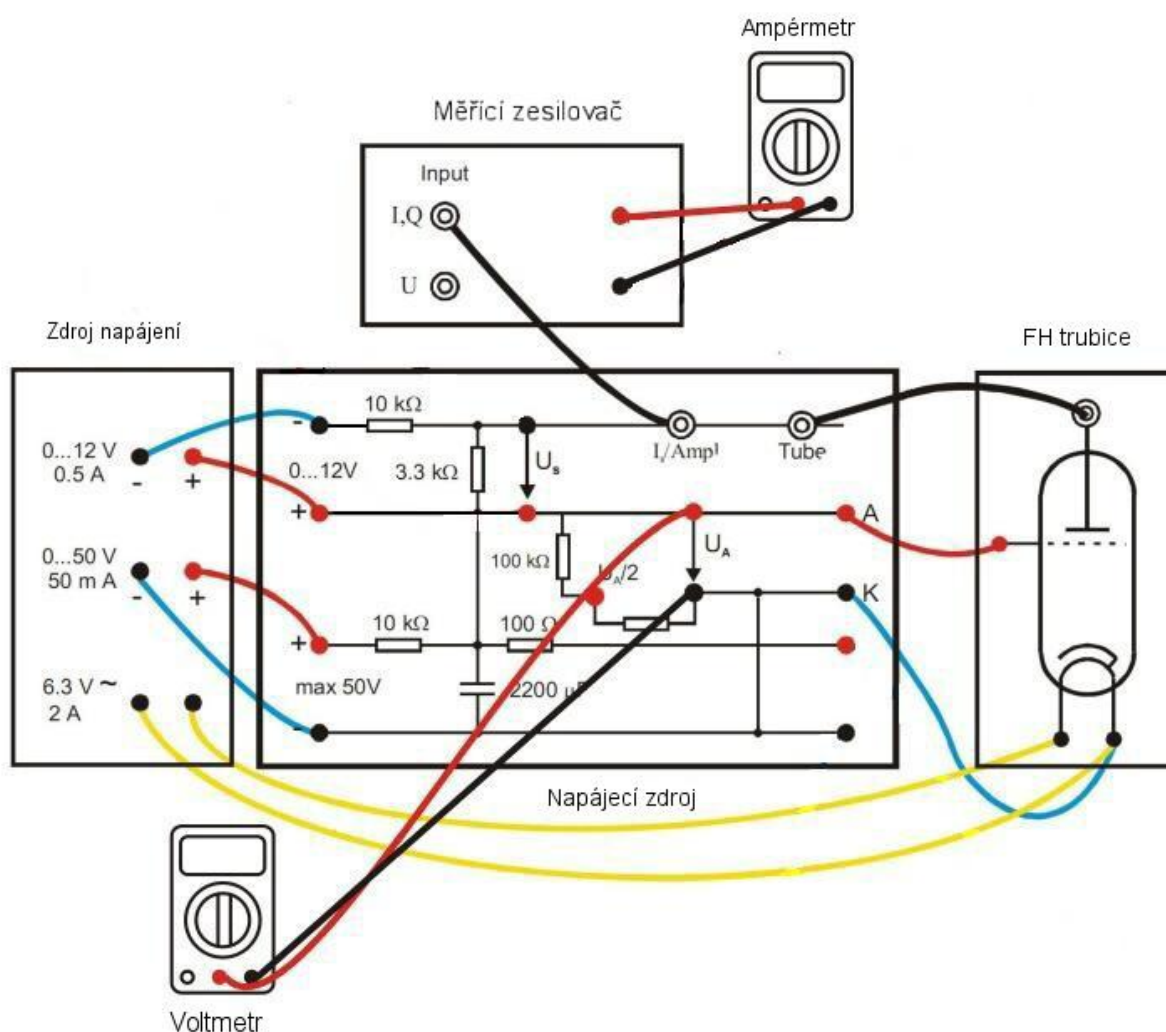


Obr. 3.4.6 Napájecí zdroj

Toto zařízení se používá společně s Franckovou – Hertzovou trubicí a zdrojem napájení. Obsahuje řadu vstupů, pomocí kabeláže tak můžeme propojit ostatní komponenty a dostat tak Franckův – Hertzův pokus již kompletní pro měření.

K provedení Franckova – Hertzova pokusu je kromě výše uvedených přístrojů zapotřebí také čidlo ke zjištění teploty, multimetry pro měření teploty, proudu a napětí.

3.4.5 Schéma zapojení Franckova – Hertzova pokusu:



Obr. 3.4.7 Schéma zapojení Franckova – Hertzova pokusu

4. VLASTNÍ MĚŘENÍ

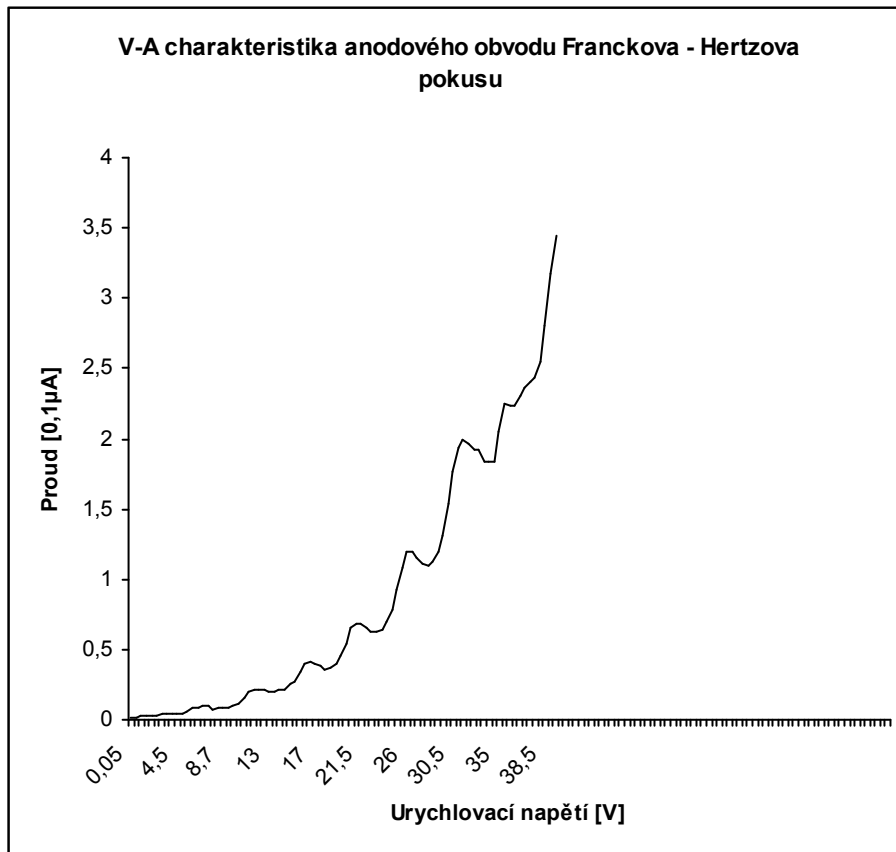
Naměřené hodnoty:

4.1 Pro teplotu 170°C

a) při brzdém napětí 5V

Tab. 1 Hodnoty proudu a napětí pro teplotu plynu 170 °C při brzdém napětí 5 V

I [0,1μA]	U [V]	I [0,1μA]	U [V]
0,015	0,05	0,540	20
0,017	0,4	0,660	20,5
0,024	0,93	0,690	21
0,030	1,4	0,690	21,5
0,034	1,8	0,650	22
0,034	2,3	0,620	22,5
0,036	2,9	0,630	23
0,037	3,5	0,640	23,5
0,038	4	0,700	24
0,043	4,5	0,780	24,5
0,047	4,9	0,920	25
0,053	5,2	1,080	25,5
0,080	6	1,190	26
0,088	6,3	1,200	26,5
0,093	6,8	1,150	27
0,093	7,2	1,110	27,5
0,073	7,7	1,100	28
0,081	8,2	1,130	28,5
0,085	8,7	1,190	29
0,087	9	1,310	29,4
0,099	9,5	1,540	30
0,110	9,8	1,770	30,5
0,150	10,4	1,940	31
0,200	11	1,990	31,5
0,220	11,5	1,960	32
0,220	12	1,920	32,5
0,210	12,5	1,920	33
0,200	13	1,840	33,5
0,200	13,5	1,970	34
0,210	14	1,830	34,3
0,220	14,3	2,050	35
0,250	14,7	2,250	35,3
0,270	15	2,230	35,6
0,340	15,5	2,240	36
0,400	16	2,300	36,2
0,410	16,5	2,360	36,5
0,400	17	2,410	37
0,380	17,5	2,440	37,5
0,360	18	2,550	38
0,370	18,5	2,800	38,5
0,400	19	3,180	39
0,460	19,6	3,440	39,2

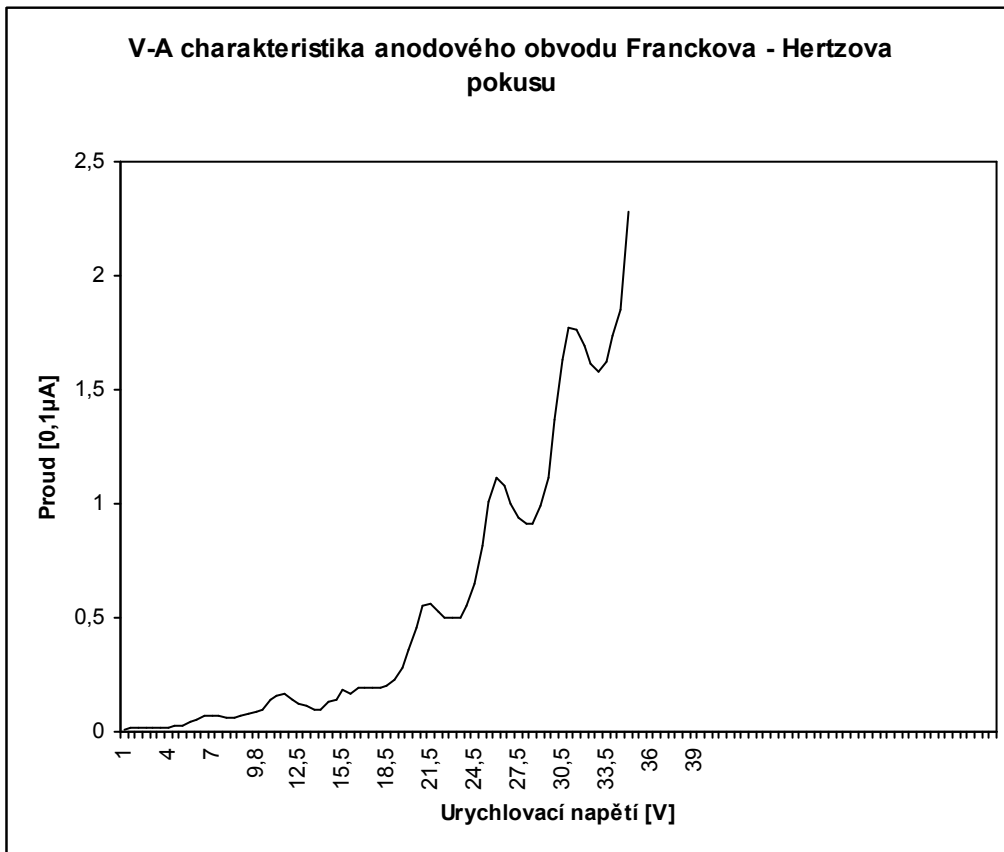


Obr. 4.1 Graf závislosti hodnot proudu a napětí pro teplotu plynu 170°C při brzdém napětí 5 V

b) při brzdém napětí 10V

Tab. 2 Hodnoty proudu a napětí pro teplotu plynu 170 °C při brzdém napětí 10 V

I [0,1μA]	U [V]	I [0,1μA]	U [V]
0,012	1	0,190	18
0,016	1,5	0,200	18,5
0,018	2	0,230	19
0,020	2,5	0,280	19,6
0,020	3	0,360	20
0,020	3,5	0,460	20,5
0,021	4	0,550	21
0,024	4,5	0,560	21,5
0,029	4,9	0,530	22
0,043	5,5	0,500	22,5
0,057	6	0,500	23
0,066	6,5	0,500	23,5
0,068	7	0,550	24
0,066	7,5	0,650	24,5
0,065	8	0,820	25
0,063	8,5	1,010	25,5
0,067	9	1,110	26
0,080	9,5	1,080	26,5
0,092	9,8	1,000	27
0,096	10	0,940	27,5
0,140	10,5	0,910	28
0,160	11	0,910	28,5
0,170	11,5	0,990	29
0,140	12	1,110	29,4
0,120	12,5	1,370	30
0,110	13	1,630	30,5
0,100	13,5	1,770	31
0,100	14	1,760	31,5
0,130	14,7	1,690	32
0,140	15	1,610	32,5
0,180	15,5	1,580	33
0,170	16	1,620	33,5
0,190	16,5	1,740	34
0,190	17	1,850	34,3
0,190	17,5	2,280	35

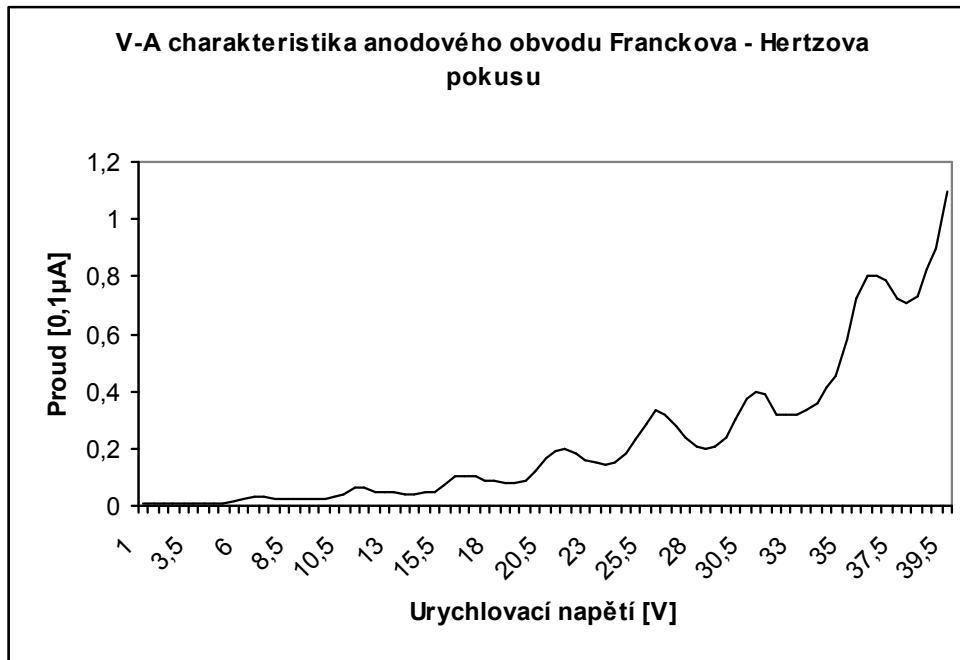


Obr. 4.2 Graf závislosti hodnot proudu a napětí pro teplotu plynu 170°C při brzdném napětí 10 V

c) při brzdém napětí 12V

Tab. 3 Hodnoty proudu a napětí pro teplotu plynu 170 °C při brzdém napětí 12 V

I [0,1μA]	U [V]	I [0,1μA]	U [V]
0,005	1	0,170	20,5
0,007	1,5	0,190	21
0,009	2	0,200	21,5
0,009	2,5	0,180	22
0,009	3	0,160	22,5
0,009	3,5	0,150	23
0,008	4	0,140	23,5
0,008	4,5	0,150	24
0,010	4,9	0,180	24,5
0,016	5,5	0,230	25
0,025	6	0,290	25,5
0,030	6,5	0,330	26
0,030	7	0,320	26,5
0,027	7,5	0,280	27
0,025	8	0,240	27,5
0,023	8,5	0,210	28
0,020	9	0,200	28,5
0,022	9,5	0,210	29
0,025	9,8	0,240	29,4
0,030	10	0,300	30
0,040	10,5	0,370	30,5
0,060	11	0,400	31
0,060	11,5	0,390	31,5
0,050	12	0,320	32
0,050	12,5	0,320	32,5
0,050	13	0,320	33
0,040	13,5	0,330	33,5
0,040	14	0,360	34
0,050	14,7	0,410	34,3
0,050	15	0,450	34,5
0,070	15,5	0,580	35
0,100	16	0,720	35,5
0,100	16,5	0,800	36
0,100	17	0,800	36,5
0,090	17,5	0,790	37
0,090	18	0,720	37,5
0,080	18,5	0,710	38
0,080	19	0,730	38,5
0,090	19,6	0,830	39
0,120	20	0,900	39,2



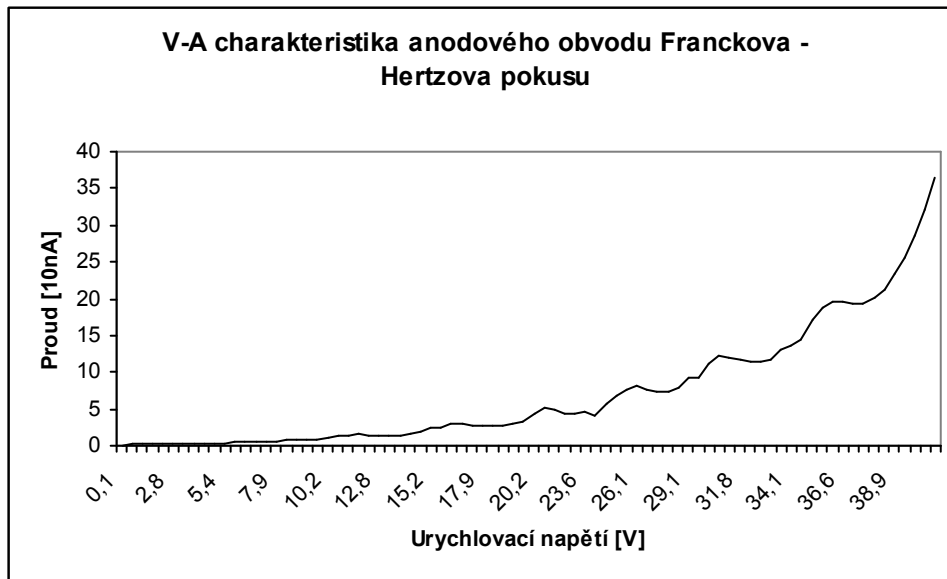
Obr. 4.3 Graf závislosti hodnot proudu a napětí pro teplotu plynu 170 °C při brzdném napětí 12 V

4.2 Pro teplotu 180°C

a) při brzdém napětí 5V

Tab. 4 Hodnoty proudu a napětí pro teplotu plynu 180 °C při brzdém napětí 5 V

I [10nA]	U [V]	I [10nA]	U [V]
0,127	0,1	4,430	20,2
0,154	0,7	5,040	20,9
0,186	1	4,850	21,5
0,228	1,7	4,420	22,5
0,256	2,3	4,390	23
0,270	2,8	4,650	23,6
0,285	3,3	4,040	24
0,306	3,9	5,790	24,5
0,339	4,4	6,860	25
0,345	5	7,690	25,4
0,378	5,4	8,110	26,1
0,524	6,1	7,740	26,7
0,593	6,5	7,380	27,3
0,641	6,9	7,390	28
0,670	7,4	7,840	28,6
0,68	7,9	9,120	29,1
0,699	8,4	9,200	29,4
0,727	8,8	11,200	30,1
0,810	9,4	12,200	30,7
0,940	9,8	12,000	31,3
1,080	10,2	11,600	31,8
1,290	10,6	11,300	32,4
1,470	11	11,300	32,9
1,510	11,8	11,700	33,2
1,460	12,3	13,000	33,9
1,410	12,8	13,700	34,1
1,410	13,1	14,300	34,3
1,470	13,7	17,100	35
1,630	14,2	18,900	35,5
1,970	14,7	19,700	36
2,320	15,2	19,500	36,6
2,570	15,5	19,300	37
3,010	16,2	19,400	37,5
2,960	16,6	20,100	38
2,780	17,2	21,200	38,4
2,630	17,9	23,500	38,9
2,650	18,4	25,700	39,3
2,840	18,9	28,700	39,7
3,060	19,2	32,100	40,2
3,400	19,6	36,400	40,9

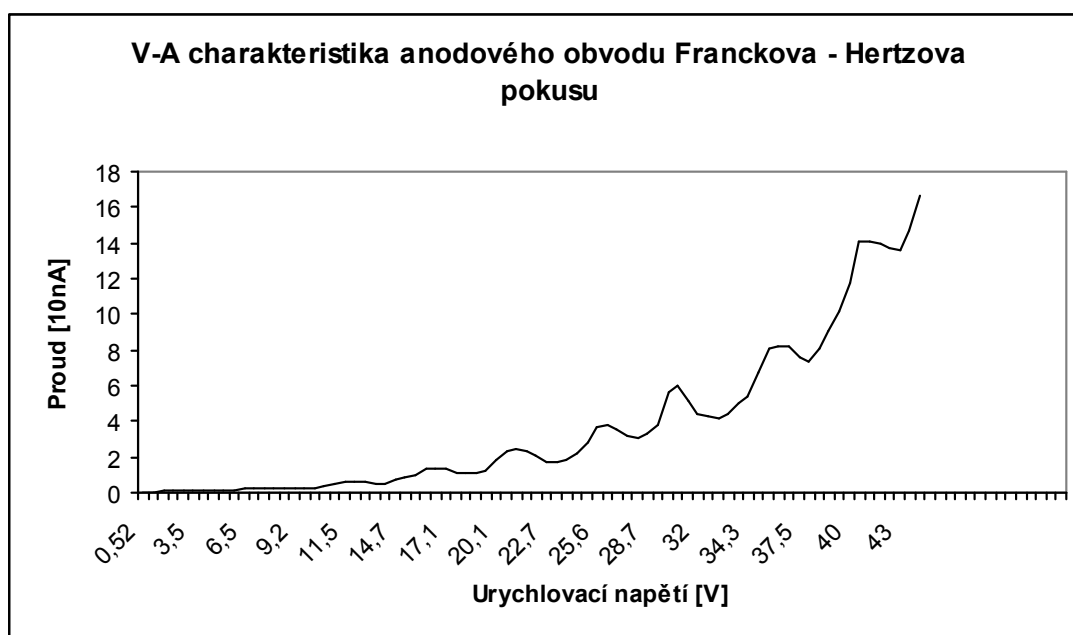


Obr. 4.4 Graf závislosti hodnot proudu a napětí pro teplotu plynu 180°C při brzděném napětí 5 V

b) při brzdém napětí 10V

Tab. 5 Hodnoty proudu a napětí pro teplotu plynu 180 °C při brzdém napětí 10 V

I [10nA]	U [V]	I [10nA]	U [V]
0,028	0,52	2,040	22,1
0,054	0,86	1,760	22,7
0,092	1,7	1,670	23,3
0,099	2,2	1,880	24
0,100	3	2,250	24,5
0,110	3,5	2,870	25
0,110	4	3,630	25,6
0,130	4,9	3,830	26,2
0,130	5,3	3,500	27
0,180	5,9	3,210	27,6
0,230	6,5	3,040	28,1
0,260	7,1	3,250	28,7
0,270	7,7	3,800	29,4
0,260	8,2	5,590	30,4
0,250	8,7	5,970	31
0,260	9,2	5,090	31,5
0,250	9,8	4,450	32
0,280	10,1	4,290	32,5
0,380	10,6	4,190	33
0,500	11	4,390	33,6
0,590	11,5	4,960	34
0,620	12,2	5,340	34,3
0,560	13	6,730	34,9
0,520	13,5	8,130	35,6
0,540	14	8,200	36,3
0,680	14,7	8,200	37
0,800	15	7,600	37,5
1,000	15,4	7,400	38
1,320	16	8,100	38,7
1,380	16,6	9,100	39,2
1,300	17,1	10,200	39,6
1,160	17,7	11,800	40
1,070	18,3	14,100	40,9
1,100	19	14,100	41,4
1,270	19,5	13,900	41,8
1,800	20,1	13,700	42,3
2,310	20,7	13,600	43
2,440	21	14,700	43,5
2,360	21,5	16,700	43,9

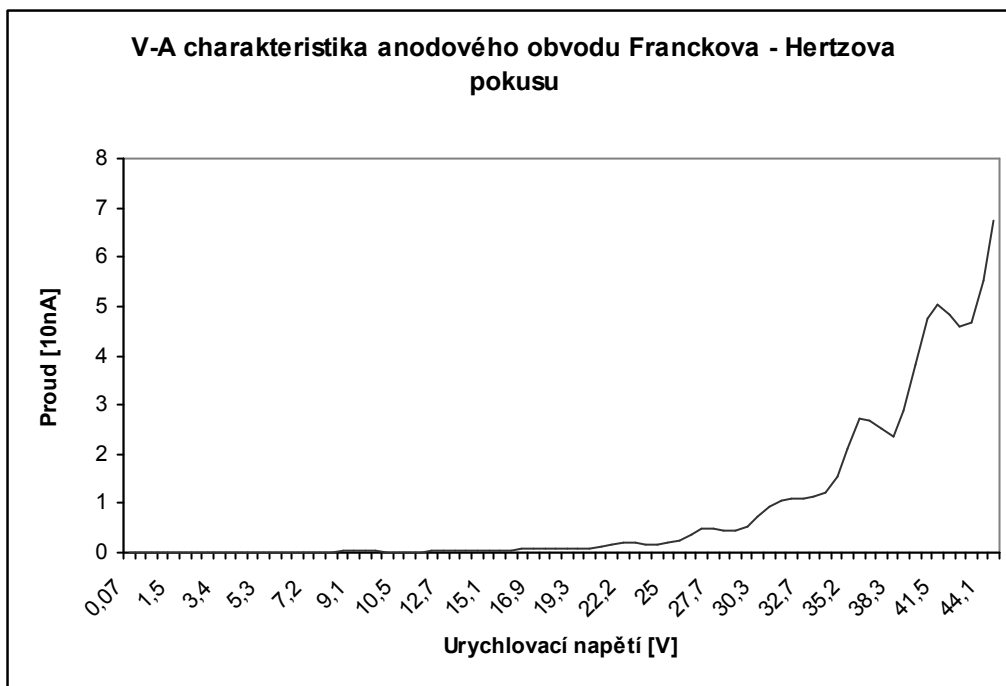


Obr. 4.5 Graf závislosti hodnot proudu a napětí pro teplotu plynu 180 °C při brzdném napětí 10 V

c) při brzdém napětí 12V

Tab. 6 Hodnoty proudu a napětí pro teplotu plynu 180 °C při brzdém napětí 12 V

I [10nA]	U [V]	I [10nA]	U [V]
0,002	0,07	0,100	19,3
0,003	0,5	0,100	20,2
0,004	0,8	0,130	20,9
0,004	1,2	0,170	21,6
0,005	1,5	0,200	22,2
0,005	1,7	0,190	22,9
0,007	2,3	0,180	23,6
0,009	2,9	0,170	24,3
0,010	3,4	0,190	25
0,011	3,7	0,250	25,5
0,006	4,2	0,370	26,1
0,009	4,9	0,470	27
0,010	5,3	0,470	27,7
0,012	5,7	0,450	28,3
0,013	6,2	0,460	29,1
0,016	6,8	0,540	29,6
0,018	7,2	0,720	30,3
0,020	7,5	0,930	31
0,020	7,9	1,070	31,7
0,026	8,4	1,090	32,2
0,032	9,1	1,080	32,7
0,031	9,5	1,130	33,2
0,028	9,8	1,210	34
0,010	10	1,540	34,6
0,020	10,5	2,120	35,2
0,020	11	2,710	36,1
0,020	11,5	2,660	36,9
0,030	12,1	2,520	37,4
0,040	12,7	2,370	38,3
0,050	13,4	2,880	39,3
0,050	14	3,820	40
0,050	14,6	4,740	40,6
0,050	15,1	5,020	41,5
0,050	15,5	4,850	42
0,060	15,9	4,580	42,7
0,070	16,7	4,650	43,5
0,080	16,9	5,520	44,1
0,080	17,4	6,740	44,6
0,090	18,1	0,100	19,3
0,100	18,7	0,100	20,2



Obr. 4.6 Graf závislosti hodnot proudu a napětí pro teplotu plynu 180 °C při brzdném napětí

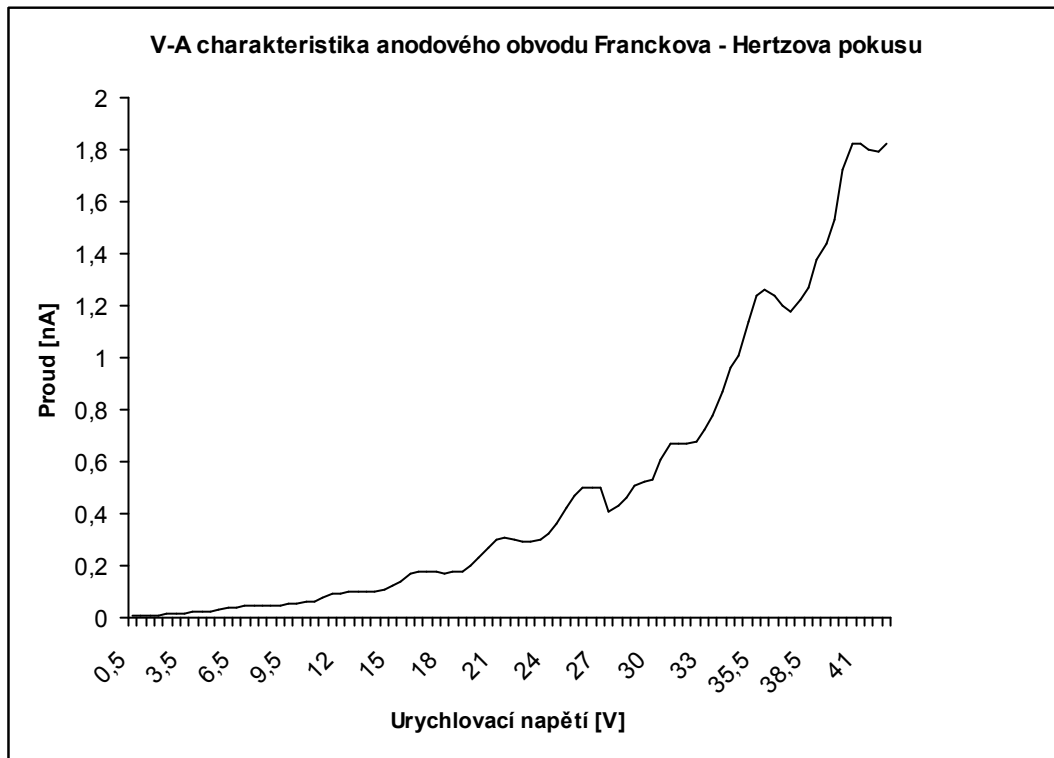
12 V

4.3 Pro teplotu 190°C

a) při brzděném napětí 5V

Tab. 7 Hodnoty proudu a napětí pro teplotu plynu 190 °C při brzděném napětí 5 V

I [nA]	U [V]	I [nA]	U [V]
0,006	0,5	0,420	25
0,007	1	0,470	25,5
0,009	1,5	0,500	26
0,011	2	0,490	26,5
0,013	2,5	0,500	27
0,016	3	0,410	27,5
0,018	3,5	0,430	28
0,002	4	0,460	28,5
0,022	4,5	0,510	29
0,025	4,9	0,570	29,4
0,029	5,5	0,530	30
0,035	6	0,610	30,5
0,041	6,5	0,670	31
0,046	7	0,670	31,5
0,044	7,5	0,670	32
0,046	8	0,680	32,5
0,047	8,5	0,720	33
0,049	9	0,780	33,5
0,051	9,5	0,870	34
0,055	9,8	0,960	34,3
0,006	10	1,010	34,5
0,006	10,5	1,140	35
0,008	11	1,240	35,5
0,009	11,5	1,260	36
0,009	12	1,240	36,5
0,100	12,5	1,200	37
0,100	13	1,180	37,5
0,100	13,5	1,220	38
0,100	14	1,270	38,5
0,110	14,7	1,380	39
0,120	15	1,440	39,2
0,140	15,5	1,530	39,5
0,170	16	1,720	40
0,180	16,5	1,820	40,5
0,180	17	1,820	41
0,180	17,5	1,800	41,5
0,170	18	1,790	42
0,180	18,5	1,820	42,5
0,180	19	1,870	43
0,200	19,6	1,980	43,5
0,230	20	2,150	44
0,270	20,5	2,200	44,1
0,300	21	2,340	44,5
0,310	21,5	2,560	45
0,300	22	2,590	45,5
0,290	22,5	2,610	46
0,290	23	2,580	46,5
0,300	23,5	2,620	47
0,320	24	2,680	47,5
0,360	24,5	2,700	48

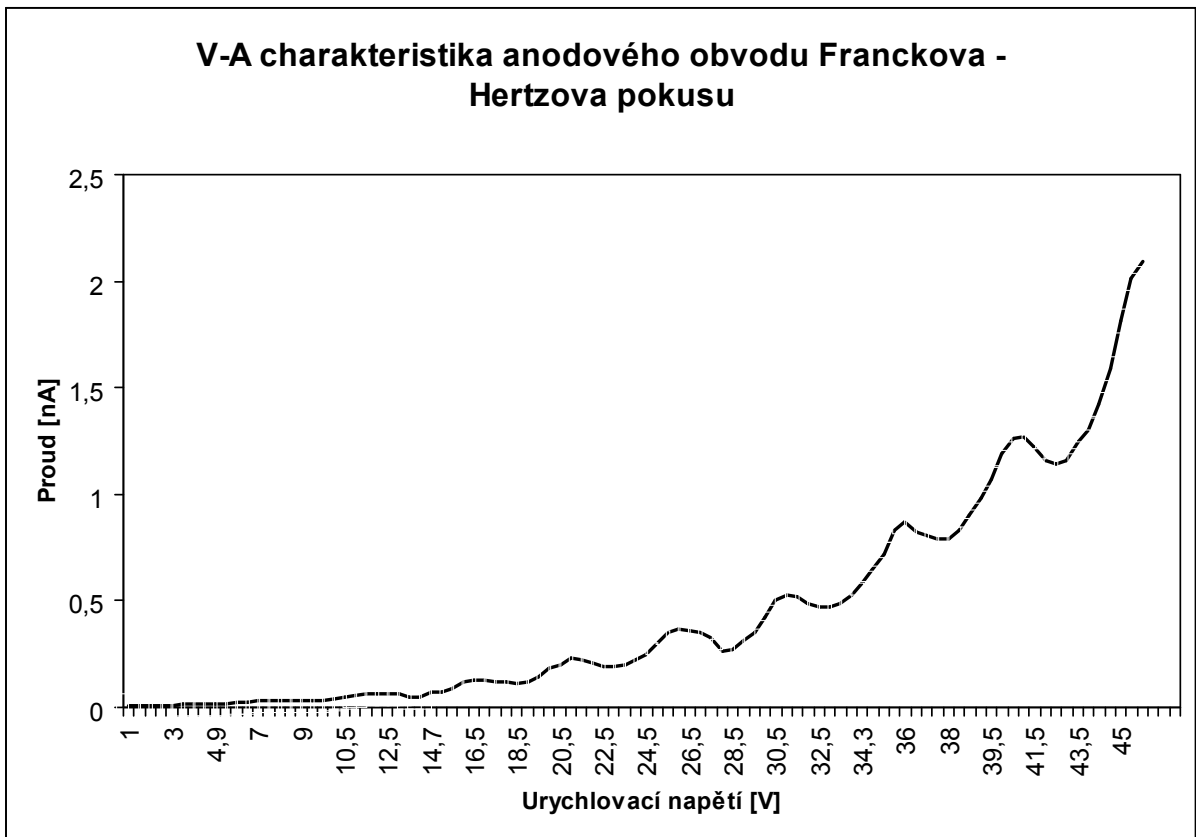


Obr. 4.7 Graf závislosti hodnot proudu a napětí pro teplotu plynu 190°C při brzděném napětí 5 V

b) při brzdém napětí 10V

Tab. 8 Hodnoty proudu a napětí pro teplotu plynu 190 °C při brzdém napětí 10 V

I [nA]	U [V]	I [nA]	U [V]
0,005	1	0,220	24
0,007	1,5	0,250	24,5
0,008	2	0,300	25
0,010	2,5	0,350	25,5
0,011	3	0,370	26
0,012	3,5	0,360	26,5
0,012	4	0,350	27
0,013	4,5	0,330	27,5
0,014	4,9	0,260	28
0,017	5,5	0,270	28,5
0,021	6	0,310	29
0,026	6,5	0,350	29,4
0,029	7	0,420	30
0,031	7,5	0,500	30,5
0,032	8	0,530	31
0,032	8,5	0,520	31,5
0,032	9	0,490	32
0,032	9,5	0,470	32,5
0,034	9,8	0,470	33
0,037	10	0,490	33,5
0,045	10,5	0,530	34
0,056	11	0,580	34,3
0,060	11,5	0,650	34,5
0,060	12	0,720	35
0,060	12,5	0,830	35,5
0,060	13	0,870	36
0,050	13,5	0,820	36,5
0,050	14	0,810	37
0,070	14,7	0,790	37,5
0,070	15	0,790	38
0,090	15,5	0,830	38,5
0,120	16	0,900	39
0,130	16,5	0,980	39,2
0,130	17	1,070	39,5
0,120	17,5	1,190	40
0,120	18	1,260	40,5
0,110	18,5	1,270	41
0,120	19	1,220	41,5
0,140	19,6	1,160	42
0,180	20	1,140	42,5
0,200	20,5	1,160	43
0,230	21	1,250	43,5
0,220	21,5	1,300	44
0,210	22	1,420	44,1
0,190	22,5	1,590	44,5
0,190	23	1,810	45
0,200	23,5	2,010	45,5

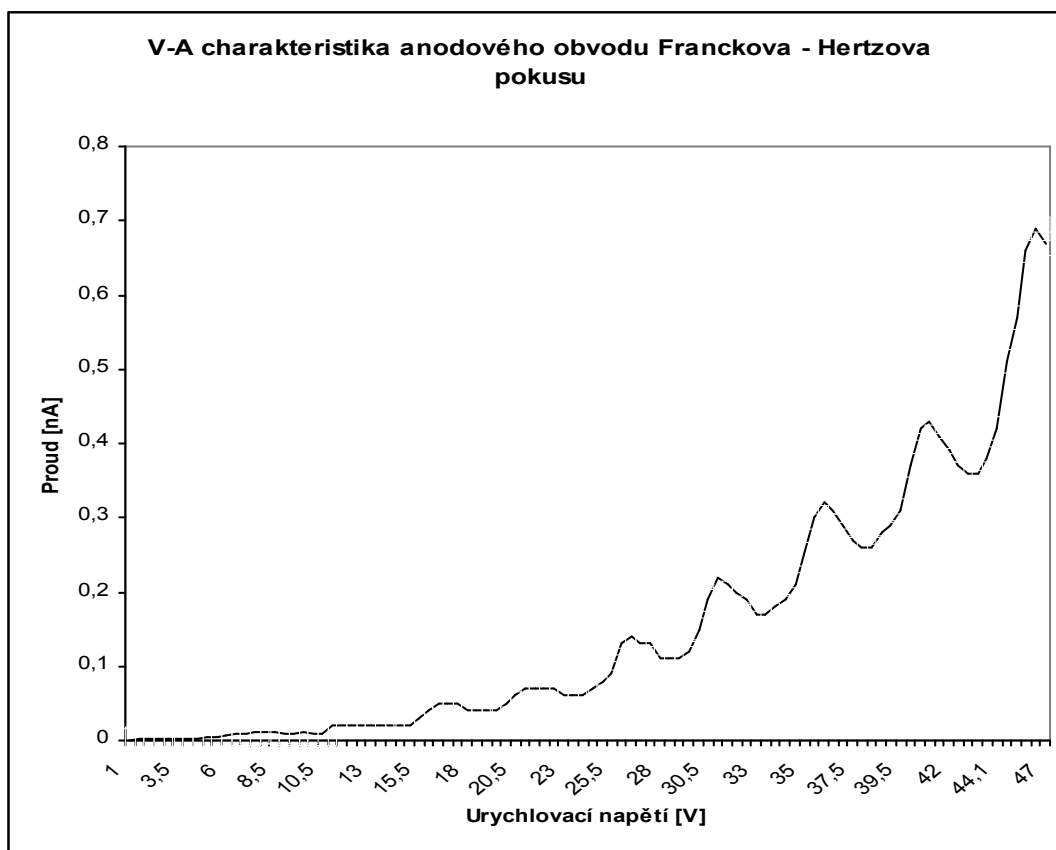


Obr. 4.8 Graf závislosti hodnot proudu a napětí pro teplotu plynu 190°C při brzděném napětí 10V

c) při brzděném napětí 12V

Tab. 9 Hodnoty proudu pro teplotu plynu 190 °C při brzděném napětí 12 V

I [nA]	U [V]	I [nA]	U [V]
0,001	1	0,070	24,5
0,002	1,5	0,080	25
0,002	2	0,090	25,5
0,003	2,5	0,130	26
0,003	3	0,140	26,5
0,003	3,5	0,130	27
0,003	4	0,130	27,5
0,003	4,5	0,110	28
0,004	4,9	0,110	28,5
0,005	5,5	0,110	29
0,006	6	0,120	29,4
0,008	6,5	0,150	30
0,010	7	0,190	30,5
0,011	7,5	0,220	31
0,011	8	0,210	31,5
0,011	8,5	0,200	32
0,010	9	0,190	32,5
0,010	9,5	0,170	33
0,011	9,8	0,170	33,5
0,010	10	0,180	34
0,010	10,5	0,190	34,3
0,020	11	0,210	34,5
0,020	11,5	0,250	35
0,020	12	0,300	35,5
0,020	12,5	0,320	36
0,020	13	0,310	36,5
0,020	13,5	0,290	37
0,020	14	0,270	37,5
0,020	14,7	0,260	38
0,020	15	0,260	38,5
0,030	15,5	0,280	39
0,040	16	0,290	39,2
0,050	16,5	0,310	39,5
0,050	17	0,370	40
0,050	17,5	0,420	40,5
0,040	18	0,430	41
0,040	18,5	0,410	41,5
0,040	19	0,390	42
0,040	19,6	0,370	42,5
0,050	20	0,360	43
0,060	20,5	0,360	43,5
0,070	21	0,380	44
0,070	21,5	0,420	44,1
0,070	22	0,510	44,5
0,070	22,5	0,570	45
0,060	23	0,660	45,5
0,060	23,5	0,690	46
0,060	24	0,670	47



Obr. 4.8 Graf závislosti hodnot proudu a napětí pro teplotu plynu 190°C při brzděném napětí 12V

Pro kvalitní výsledky Franckova – Hertzova pokusu je nutné trubici řádně zahřát, tím se zvýší tlak rtuťových pár a může tak lépe docházet ke srážkám mezi elektrony a atomy rtuť. Kromě V-A charakteristiky je úkolem studentů při realizaci Franckova – Hertzova pokusu v praktiku z atomové a jaderné fyziky spočítat také hodnotu excitační energie. Tu dostaneme na základě odečtení maxim a minim. Jejich velikost je závislá na hodnotě brzděného napětí. To zabraňuje elektronům s příliš malou energií, aby se dostaly až na anodu. A právě při nižších hodnotách brzděného napětí jsou maxima a minima nejzřetelnější, protože mřížka propustí více elektronů, a proto je i anodový proud, který měříme, zřetelnější. Z toho důvodu je při měření v praktiku vhodné volit menší hodnoty brzděného napětí.

5. NÁVOD PRO PROVEDENÍ FRANCKOVA – HERTZOVA POKUSU PRO PRAKTIKUM Z ATOMOVÉ A JADERNÉ FYZIKY

FRANCKŮV - HERTZŮV EXPERIMENT

Cíl laboratorního cvičení:

Seznámit se s Franckovým – Hertzovým pokusem, proměřit V-A charakteristiky a určit hodnotu excitační energie atomu rtuťi.

Úvod:

V roce 1913 provedli James Franck a Gustav Hertz pokus, kterým navázali na myšlenky Nielse Bohra a prokázali tak platnost jeho postulátů. Dokázali, že elektrony se mohou skutečně nacházet jen ve stavech o určité energii a pokud přecházejí z jednoho kvantového stavu do druhého, energii vyzařují či pohlcují, prokázali tak i existenci energetických hladin. Svým pokusem ověřili kvantovou teorii, čímž zásadně přispěli k formování moderní fyziky. Za své výsledky byli v roce 1925 odměněni Nobelovou cenou za fyziku.

Teoretický rozbor:

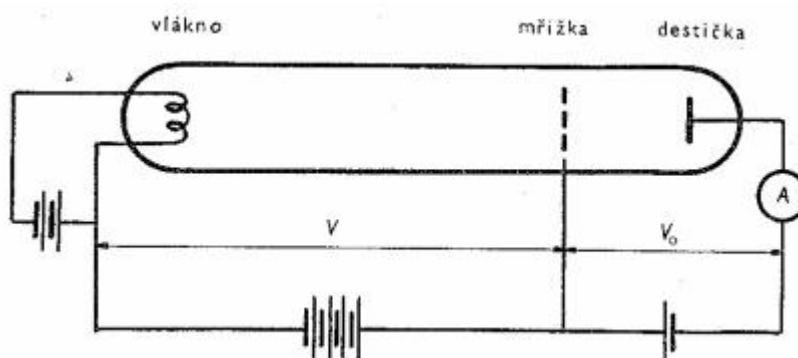
V roce 1913 prezentoval Niels Bohr planetární model atomu. Navázal tak na práci novozélandského fyzika Ernest Rutherforda, jenž se svým týmem provedl pokus, při kterém byla ostřelována zlatá fólie částicemi alfa. Na základě předchozího Thomsonova modelu se očekávalo, že všechny částice bez problémů projdou touto fólií. některé z nich se však od původního směru výrazně odchýlily. Tak bylo objeveno atomové jádro. Atom je tedy složen z kladně nabitého jádra, kolem kterého obíhají záporně nabitě elektrony. Samotný atom je elektricky neutrální. Při aplikaci dvou zásadních pilířů klasické fyziky – Newtonových pohybových zákonů a Coulombova zákona, výsledek koresponduje s experimentálním zjištěním – atom je stabilní. Tento model však odporoval Maxwellově teorii elektromagnetického pole, dalšímu pilíři klasické fyziky. Ten říká, že při zrychleném pohybu nabitě částice tato částice vyzařuje energie ve formě elektromagnetického záření, tím pádem by elektrony pohybující se

kolem jádra měly ztrácet energii, zmenšovat poloměr své dráhy, až by se nakonec splynuly s jádrem a celý atom by se tak zhroutil. A právě tímto problémem se zabýval Niels Bohr, který vytvořil model velice blízký modelu Rutherfordovu. Byl inspirován kvantovou teorií a díky ní vytvořil model, který už nebyl v rozporu s dalšími fyzikálními teoriemi. Kvůli tomu se také setkal s nedůvěrou a nesouhlasem klasických fyziků [2, 3, 4, 5].

Bohr vyslovil následující postuláty:

1. „Atom je stabilní soustava složená z kladně nabitého jádra, v němž je soustředěna téměř celá hmotnost atomu, a z elektronového obalu,
2. atom se může nacházet jen v určitých energetických (kvantových stavech) s energiemi E_1, E_2, \dots, E_n . Svoji energii může měnit jen při přechodech jednoho stavu do druhého,
3. při přechodu ze stavu s energií E_m do stavu s energií $E_n, (E_m > E_n)$ atom vyzáří foton s energií danou jejich rozdílem $E_m - E_n = h\nu$. V tomto vztahu je h Planckova konstanta a ν je frekvence odpovídajícího záření. Při opačném přechodu pak musí být atomu odpovídající energie dodána“. [14]

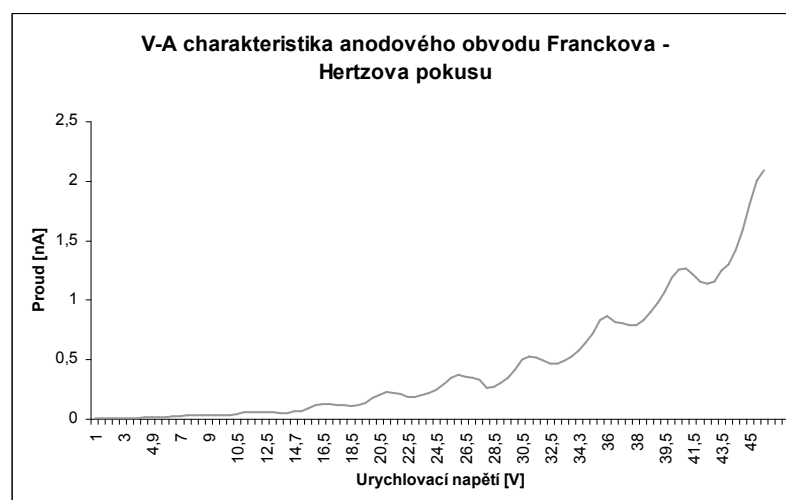
V experimentu, který provedli Franck a Hertz, byla použita vyčerpaná trubice naplněná plynem (v našem případě se jedná o rtuť, je možné se setkat také s trubicí naplněnou neonem). Trubice obsahuje 3 elektrody: rozžhavené vlákno (katoda), které emituje elektrony, mřížka a destička (anoda).



Obr. 1.1. Franckova – Hertzova trubice (převzato z [1])

Rozžhavená katoda emituje elektrony, které jsou urychlovány elektrickým polem vytvořeným mezi katodou a mřížkou. V tomto prostoru dochází k pružným a nepružným srážkám mezi elektrony a atomy rtuti. V případě nepružné srážky elektron ztrácí veškerou svou kinetickou energii, kterou předá atomu rtuti a sám je zachycen kladně nabitou destičkou. V případě pružné srážky má elektron dostatečnou energii a překonává i brzdné napětí vyvolané mezi destičkou a anodou. Elektron se dostává až na anodu, k níž je připojen galvanometr, který odečítá hodnoty protékajícího proudu. Při určitých hodnotách urychlovacího napětí můžeme pozorovat značné množství nepružných srážek mezi elektrony a atomy rtuti, to má za následek pokles proudu procházejícího galvanometrem. Zároveň však atomy rtuti přijímají od elektronů energii a dostávají se tak do vzbuzeného stavu. Za další pozorované poklesy proudu jsou odpovědné opět nepružné srážky elektronů s atomy. Pro atomy rtuti Franck s Hertzem zjistili, že tyto poklesy odpovídají násobkům mřížkového napětí $U = 4,9 \text{ V}$, zároveň energetický rozdíl základního a prvního excitovaného stavu je $\Delta E = 4,9 \text{ eV}$.

Bylo zjištěno, že pokud je hodnota potenciálového rozdílu na mřížce do $4,9 \text{ V}$ (v případě rtuti), proud roste s rostoucím napětím. S rostoucím napětím tedy roste i energie elektronu a tím pádem i počet elektronů, které překonaly brzdící napětí a prošly přes mřížku až k anodě. Při dosažení $4,9 \text{ V}$ dojde k prudkému poklesu proudu, nicméně s dalším zvyšováním napětí hodnota proudu opět roste až do hodnoty $9,8 \text{ V}$. Další průběh je analogický.



Obr. 1.2 V-A charakteristika anodového obvodu Franckova – Hertzova pokusu

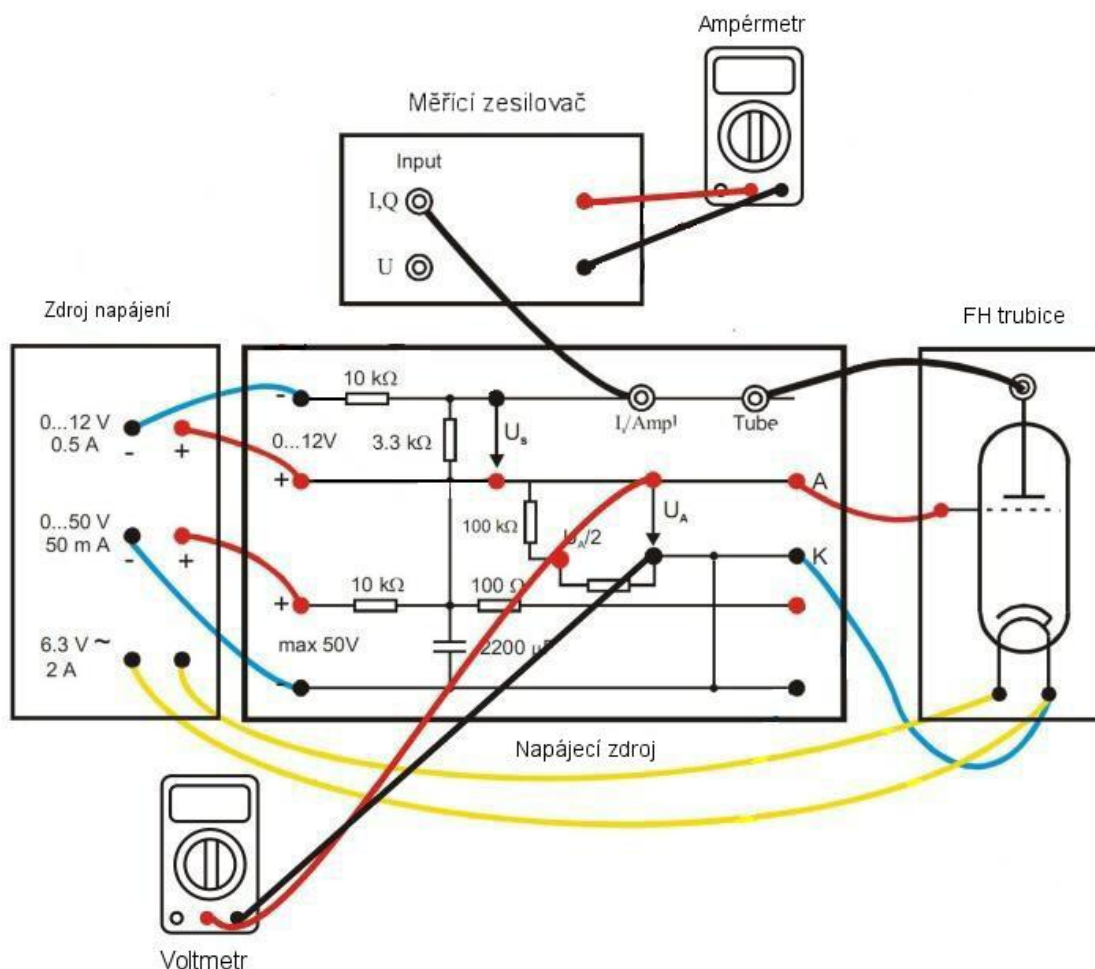
Úkol:

- 1) Proměřte $V - A$ charakteristiky pomocí digitálních multimetrů, vytvořte graf pro hodnoty brzdného napětí 5V při teplotách 170°C a 180°C.
- 2) Určete co nejpřesněji energii rozdílu energetických hladin atomu rtuti.
- 3) Výslednou energii porovnejte s tabulkovými hodnotami

Pomůcky:

- 1) Franck – Hertzova trubice
- 2) Zdroj napájení
- 3) Měřicí zesilovač
- 4) Napájecí zdroj
- 5) Multimetry
- 6) Spojovací kabeláž
- 7) Čidlo je zjištění teploty

Schéma zapojení Franckova – Hertzova pokusu



Obr. 1.3 Schéma zapojení Franckova – Hertzova pokusu

Postup měření:

1) Zapojte Franckovu - Hertzovu píčku do sítě, je třeba použít přiložený regulátor kvůli stabilizaci teploty. Otáčením kolečka pro nastavení teploty vyhřejte Franckovu – Hertzovu trubici na zadanou teplotu, tu kontrolujte pomocí digitálního multimetru a teplotního čidla, hodnoty napětí na zdroji napájení mějte na nule.

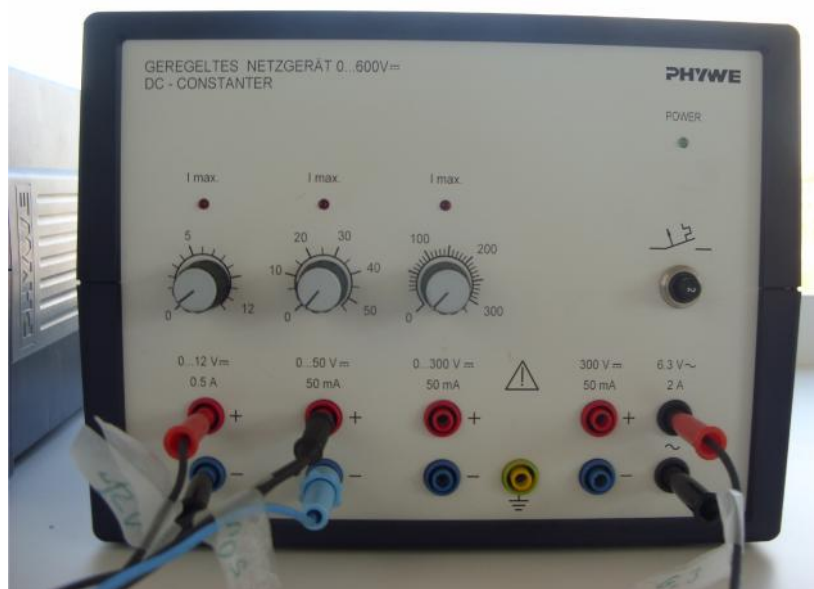
Pozor!!!! Trubice musí být umístěna na podložce kvůli vysoké teplotě, je nutná opatrná manipulace

2) Po vyhřátí Franck – Hertzovy stupnice nastavte na zdroji napájení hodnotu brzdného napětí na hodnotu 5 V.

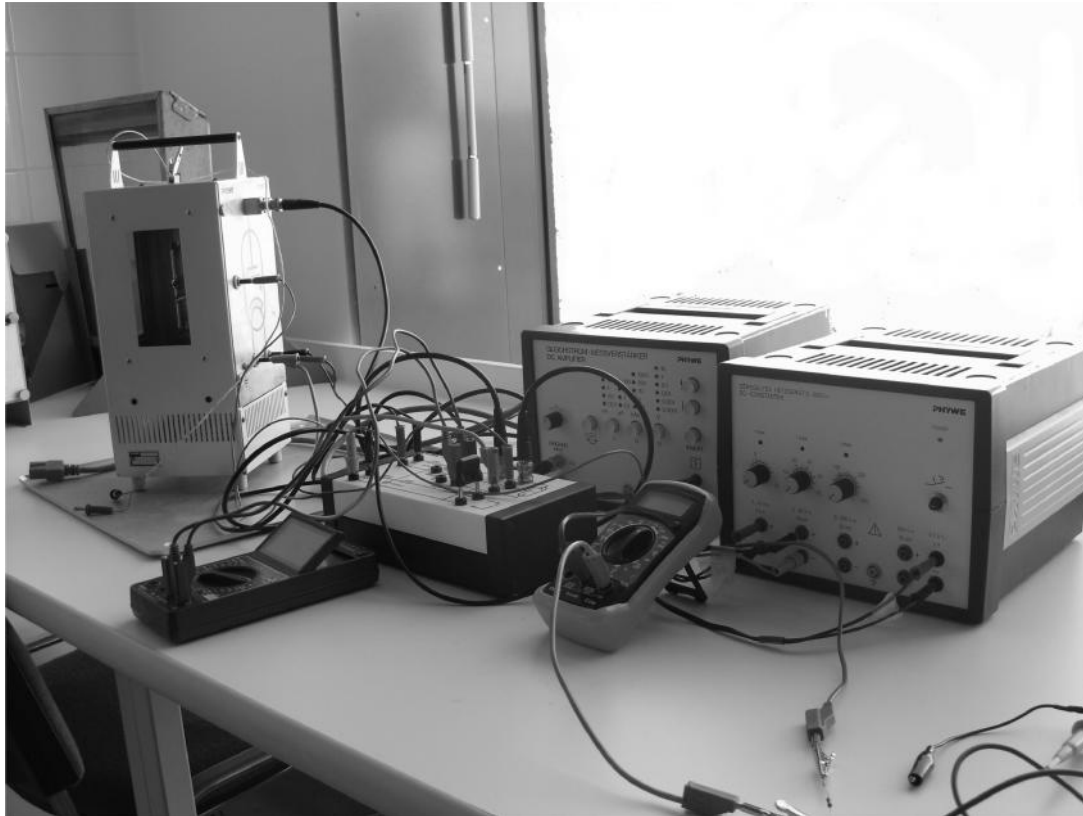
3) Pomalu zvyšujte urychlovací napětí, cca po 1 V, přesnou hodnotu napětí a proudu odečítejte na digitálních multimetrech. Měřicí zesilovač je vybaven 19 rozsahy pro měření proudu. Začněte na rozsahu 0,1nA, při překročení hodnoty napětí 10V je nutné kvůli technickým dispozicím přístroje přepnout na hodnotu 1nA. Napětí zvyšujte asi do hodnoty 35 – 38V, při vyšších hodnotách napětí nastává výboj v plynu. V případě, že výboj v plynu nastane, je nutno jej zhaset pomocí kolíku, jehož vsunutím do zdroje napájení přerušíme přívod mřížky.

4) Naměřené hodnoty zapište, ve vámi vybraném programu vytvořte graf odpovídající V – A charakteristiky

5) Na základě poloh minim křivky získaného grafu určete hodnotu excitační energie atomů rtuti.



Obr.1.4 Jednotka pro nastavení napětí. Prvním potenciometrem zleva nastavujeme brzdné napětí, druhým zleva pak urychlovací napětí v intervalu 0-38V



Obr.1.5 Franckův –Hertzův pokus

Seznam použité literatury:

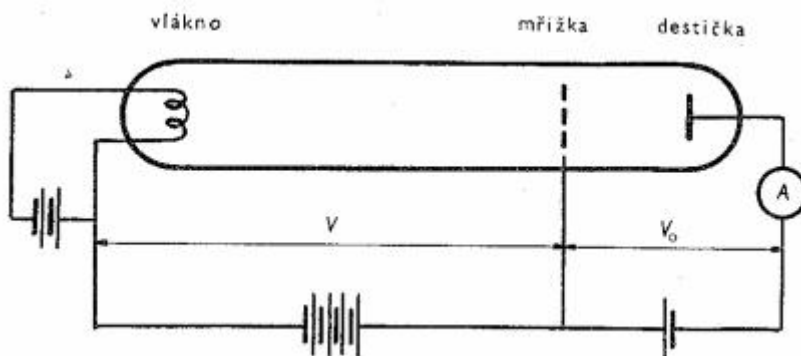
- [1] BEISER, Arthur. *Úvod do moderní fyziky*. Praha: Academia, 1977, 628 s.
- [2] DVOŘÁK, Lubomír. *Praktikum z atomové a jaderné fyziky*. Olomouc: Rektorát Univerzity Palackého v Olomouci, 1988, 125 s.
- [3] JANEČEK, Ivan, René KALUS a Daniel HRIVŇÁK. Multimediální učební text Katedry fyziky Přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity: Kvantová, atomová a jaderná fyzika. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://artemis.osu.cz/mmfiz/am/am_1_5_2.htm
- [4] DVOŘÁK, Lubomír. *Praktikum z atomové a jaderné fyziky*. Olomouc: Rektorát Univerzity Palackého v Olomouci, 1988, 125 s.
- [5] JANEČEK, Ivan, René KALUS a Daniel HRIVŇÁK. Multimediální učební text Katedry fyziky Přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity: Kvantová, atomová a jaderná fyzika. [online]. [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/mmfiz/>

6. FRANCKŮV – HERTZŮV EXPERIMENT PRO STUDENTY STŘEDNÍCH ŠKOL

V roce 1913 představil Niels Bohr světu novinku, která vyvolala řadu diskuzí mezi fyziky. Jsou to jeho známé postuláty o tom, že atomy se mohou nacházet pouze ve stavech, kterým odpovídá určitá energie. Pokud se má atom dostat na vyšší energetickou hladinu, je třeba mu dodat jisté množství energie potřebné pro tento přechod, pokud přechází do stavu o nižší energii, energie se uvolňuje ve formě elektromagnetického záření.

Na jeho myšlenky navázali panové Gustav Hertz a James Franck a experimentálně je ověřili při provedení Franckova – Hertzova pokusu. Ovlivnili tak veškerý další vývoj fyziky a dali pevný základ rozvíjející se moderní fyzice. Za svůj velký přínos byli v roce 1925 odměněni Nobelovou cenou za fyziku.

Princip uvedeného pokusu je následující:



Obr. 1.1 Aparatura pro Franckův – Hertzův pokus (převzato z [2])

Rozžhavené vlákno uvolňuje elektrony, které jsou urychlovány elektrickým polem vytvořeným mezi vláknem a mřížkou. Celý prostor je vyplněn parami rtuti. Elektrony emitované z vlákna narážejí do atomu rtuti, přičemž mohou nastat 2 situace:

1) pružná srážka – elektron si při srážce zachovává svoji energii, pouze se vychýlí z původního směru. Překonává kladně nabitou mřížku, načež se dostává až na destičku, na které můžeme měřit proud.

2) nepružná srážka – elektron při srážce svoji energii ztrácí, předává jí atomu rtuti, která se dodáním této energie určité hodnoty dostává na vyšší energetickou hladinu a tím pádem do vzbuzeného stavu. Při měření bylo zjištěno, že tato energie odpovídá hodnotě $4,9\text{eV}$.

7. ZÁVĚR

Franckův – Hertzův pokus patří zcela nepochybně k nejdůležitějším experimentům v moderní fyzice. Díky jeho realizaci byly potvrzeny Bohrovy postuláty a tehdejší fyzika se mohla směle posouvat dál k novým objevům. O jeho významnosti jistě vypovídá i Nobelova cena, kterou byli James Franck a Gustav Hertz odměněni.

Hlavním přínosem této práce mělo být zrealizování Franckova – Hertzova pokusu, aby se i studenti Katedry experimentální fyziky mohli s tímto experimentem seznámit nejen teoreticky, ale i prakticky. K jeho sestavení a správnému nastavení vedla dlouhá cesta, musela být odstraněna řada nedostatků, provedeno mnoho měření, ale v této chvíli je aparatura Franckova – Hertzova pokusu připravena k měření, přičemž toto měření bude zcela jistě probíhat bez potíží a bude vykazovat stabilní výsledky.

Proto doufám, že i manuál úlohy Franckův – Hertzův pokus do praktika z atomové a jaderné fyziky bude pro studenty pochopitelný a mohou si tak změřit významný a prestižní experiment oceněný Nobelovou cenou za fyziku za rok 1925. Pro mě byla tato zkušenost více než obohacující.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A OSTATNÍCH ZDROJŮ

- [1] LACINA, Aleš. Atom - od hypotézy k jistotě: ke 170. výročí objevu Brownova pohybu. [online]. [cit. 2013-04-03]. Dostupné z: <http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/atom.pdf>
- [2] BEISER, Arthur. *Úvod do moderní fyziky*. Praha: Academia, 1977, 628 s.
- [3] ŠTĚRBA, František, Michal SUK a Zbyšek TRKA. *Atomová a jaderná fyzika: 1. svazek - část textová*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, 1982, 245 s.
- [4] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/708-millikanuv-pokus>
- [5] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/752-spektrum-atomu-vodik>
- [6] BOUCHAL, Zdeněk. Optika: část I. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://optics.upol.cz/userfiles/file/OPT_PO_CAST_I.pdf
- [7] Nobelprize.org: The Official Web Site of the Nobel Prize. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1925/franck.html
- [8] Nobelprize.org: The Official Web Site of the Nobel Prize. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1925/hertz.html
- [9] DVOŘÁK, Lubomír. *Praktikum z atomové a jaderné fyziky*. Olomouc: Rektorát Univerzity Palackého v Olomouci, 1988, 125 s.
- [10] JANEČEK, Ivan, René KALUS a Daniel HRIVŇÁK. Multimediální učební text Katedry fyziky Přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity: Kvantová, atomová a jaderná fyzika. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://artemis.osu.cz/mmfiz/am/am_1_5_2.htm
- [11] Franck - Hertz Tube. *Phywe.com* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.phywe.com/index.php/fuseaction/download/lrn_file/bedanl.pdf/09085.01/e/0908501e.pdf
- [12] Franck - Hertz Tube on a panel. [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <https://wiki.brown.edu/confluence/download/attachments/29288/PHYWE+Oven.pdf?version=1&modificationDate=1362594360000>

- [13] Power supply, 0...600 V-, regulated. *Phywe.com* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.phywe.com/index.php/fuseaction/download/lrn_file/bedanl.pdf/13672.93/e/1367293e.pdf
- [14] JANEČEK, Ivan, René KALUS a Daniel HRIVŇÁK. Multimediální učební text Katedry fyziky Přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity: Kvantová, atomová jaderná fyzika. [online]. [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/mm fyz/>
- [15] DRŠKA, Ladislav, Bohdan KLIMEŠ a Josef B. SLAVÍK. *Základy atomové fyziky*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1958.
- [16] JANEČEK, Ivan. *Atomová a jaderná fyzika: Učební text Katedry fyziky Ostravské univerzity* [Pdf]. Ostrava, 2007.