

# VYŠETROVANIE VONKAJŠIEHO FOTOELEKTRICKÉHO JAVU A URČENIE PLANCKOVEJ KONŠTANTY

doc. RNDr. Drahoslav Vajda, CSc.

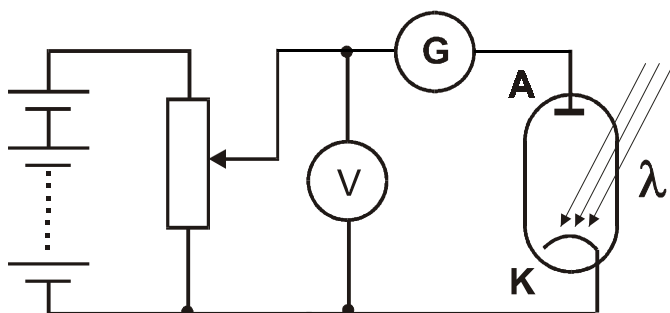
## Teoretický úvod:

Vonkajší fotoelektrický jav je veľmi presvedčivým dôkazom kvantovej povahy elektromagnetického žiarenia (svetla). Spočíva v tom, že po dopade elektromagnetického žiarenia na povrch vhodných materiálov (kov, polovodič) sa z ich povrchu uvoľňujú elektróny (tzv. fotoelektróny). Charakteristické črty tohto javu sú:

- energia vyletujúcich elektrónov nezávisí od intenzity dopadajúceho žiarenia (rozumej: od počtu dopadajúcich fotónov), ale len od jeho vlnovej dĺžky  $\lambda$  (resp. od frekvencie  $\nu$ ).
- uvoľňovanie elektrónov nastáva len pod istou hodnotou vlnovej dĺžky  $\lambda_0$  (resp. nad frekvenciou  $\nu_0$ ), ktorej hovoríme kritická vlnová dĺžka (frekvencia).
- od intenzity dopadajúceho žiarenia závisí len počet uvoľnených elektrónov a nie ich energia.

Schéma zariadenia na pozorovanie vonkajšieho fotoelektrického javu je na obr. 1.

Vo vyčerpanej banke, do ktorej môže vnikať svetlo, sú umiestnené dve elektródy: anóda A a katóda K (vákuová fotónka). Katóda nie je žeravená. Ak na katódu nedopadá žiarenie, okruhom prúd netečie, lebo v elektrickom poli medzi anódou a katódou niet elektrických nábojov. Po dopade žiarenia vhodnej vlnovej dĺžky  $\lambda$  na katódu sa z jej povrchu uvoľňujú elektróny a fotónkou môže tiecť prúd.

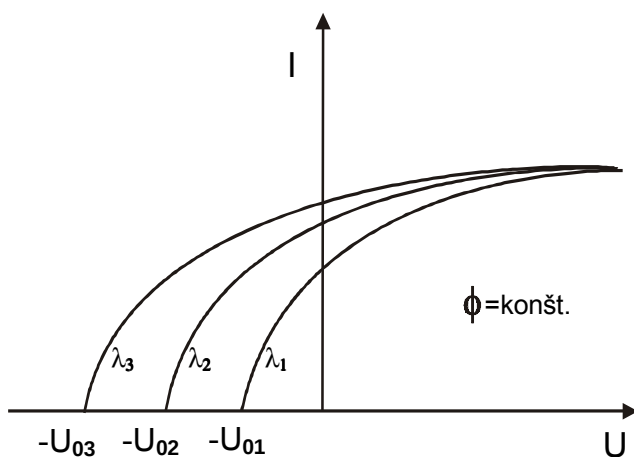


Obr. 1

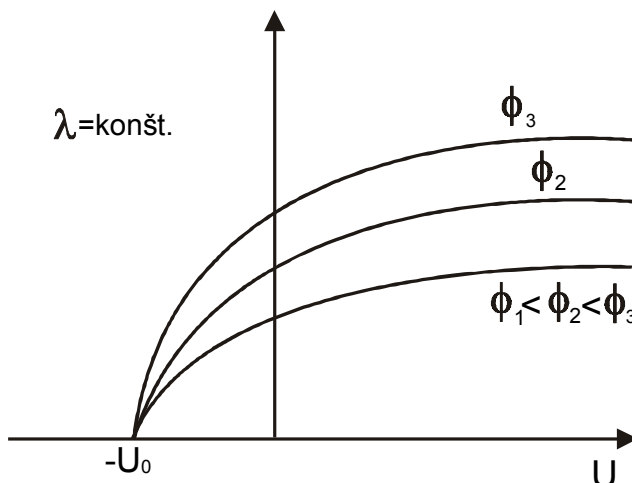
Závislosť intenzity prúdu  $I$  od napätia  $U$  medzi anódou a katódou fotónky pre monochromatické žiarenie rôznych vlnových dĺžok  $\lambda$ , ale rovnakej intenzity dopadajúceho svetla  $\phi = \text{konšt.}$ , je znázornená na obr. 2. Závislosť  $I$  od  $U$  pre rôzne intenzity dopadajúceho svetla  $\phi$  pri  $\lambda = \text{konšt.}$  je znázornená na obr. 3.

**Poznámka:** V našich úvahách predpokladáme, že všetky dopadajúce fotóny vyvolajú fotoefekt, teda všetky fotóny

svoju energiu odovzdajú elektrónom a nedochádza k strate energie premenou ich energie na energiu tepelnú (fotóny svoju energiu neodovzdávajú mriežke).



Obr. 2



Obr. 3

Z týchto obrázkov vidíme, že:

Prúd fotónkou preteká aj pri nulovom napätí medzi  $A$  a  $K$ . Je to spôsobené tým, že elektróny (fotoelektróny), vyletujúce z povrchu katódy, majú nenulovú kinetickú energiu.

Nad určitú hodnotu anódového napätia prúd už nerastie. Dosahuje nasýtenú hodnotu, ktorá závisí len od intenzity dopadajúceho žiarenia. Je to zapríčinené tým, že už všetky fotoelektróny sa podieľajú na vedení elektrického prúdu.

Aby prúd fotónkou netiekol, musíme fotoelektróny, ktoré vyletujú z katódy a majú kinetickú energiu  $W_k = 1/2 mv^2$ , „zabrzdiť“. Nastane to vtedy, keď anóda voči katóde bude mať záporný potenciál. Tomu odpovedajúcu hodnotu anódového napätia nazývame brzdné napätie  $U_0$  a v tomto prípade platí

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_0, \quad (1)$$

kde  $e$  je náboj elektrónu. Brzdné napätie  $U_0$  je lineárnou funkciou frekvencie  $\nu$  dopadajúceho žiarenia. Vid' obr. 5.

Vysvetlenie vonkajšieho fotoelektrického javu podal A. Einstein na základe Planckovej hypotézy o kvantovej povahe elektromagnetického žiarenia, podľa ktorej sa elektromagnetická energia šíri v podobe „korpuskúl“ (fotónov), ktoré majú energiu  $W = h\nu$ , kde  $h$  je Planckova konštanta a  $\nu$  je frekvencia elektromagnetickej vlny.

Podľa Einsteina sa energia fotónu  $W = h\nu$  pohltaná elektrónom, spotrebuje na výstupnú prácu  $A$  (je rovnaká pre všetky elektróny) a zvyšok si elektrón odnáša so sebou vo forme kinetickej energie  $W_k = \frac{mv^2}{2}$ . Platí teda

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (2)$$

Túto rovnicu poznáme pod názvom Einsteinova rovnica vonkajšieho fotoelektrického javu.

Pri  $h\nu < A$  nemôže dôjsť k uvoľneniu elektrónov. Minimálna frekvencia  $\nu_0$  žiarenia, pri ktorej sa elektrón stačí práve uvoľniť z povrchu látky s nulovou rýchlosťou ( $W_k = 0$ ), je určená podmienkou  $h\nu_0 = A$ . Preto k vzniku vonkajšieho fotoelektrického javu energia fotónu musí byť väčšia ako výstupná práca  $A$

$$h\nu_0 \geq A \quad (3)$$

alebo vzhľadom na vzťah  $\lambda = c/\nu$

$$\lambda_0 \leq \frac{hc}{A} \quad (4)$$

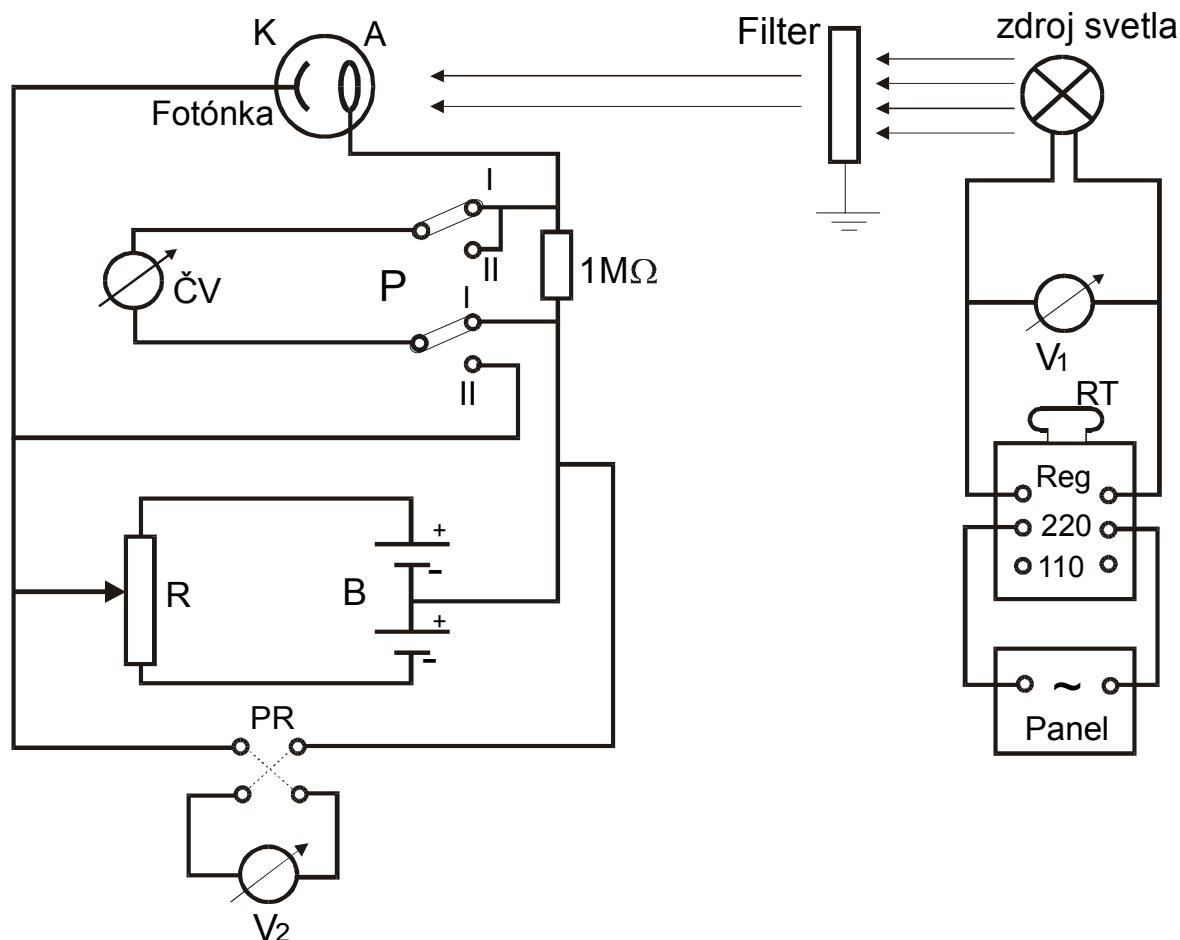
kde  $\nu_0$  a  $\lambda_0$  je tzv. kritická frekvencia a kritická vlnová dĺžka a  $c$  je rýchlosť svetla.

### **Metóda merania:**

Pri vyšetřovaní vonkajšieho fotoelektrického javu postupujeme tak, že zo zdroja svetla necháme dopadať svetlo o známej vlnovej dĺžke  $\lambda$  na katódu fotónky a meriame závislosť prúdu fotónkou od napätia medzi anódou a katódou.

**Postup merania:**

Úlohu zapojte podľa pripojenej schémy, obr. 4.



Obr. 4

Primárne vinutie 230V regulačného transformátora pre napájanie zdroja svetla pripojíme na 12V rozvodného panelu. Vlnovú dĺžku svetla  $\lambda$  dopadajúceho na katódu fotónky vymedzíme optickým filtrom. Intenzitu svetla  $\phi$  dopadajúceho na katódu fotónky regulujeme zmenou napätia na zdroji svetla a kontrolujeme voltmetrom  $V_1$ . Potenciometer R dáme do takej polohy, aby na anóde fotónky bolo kladné napätie. Napätie na anóde meriame voltmetrom  $V_2$ . Prúd medzi anódou a katódou meriame tak, že voltmetrom ČV meriame napätie na odpore  $1M\Omega$ . Pri meraní postupujeme od vyššieho kladného napätia na anóde k nulovému napätiu medzi anódou a katódou. Keď voltmeter  $V_2$  ukazuje nulové napätie prepínačom PR zmeníme polaritu voltmetra  $V_2$  a na anóde fotónky postupne nastavujeme záporné hodnoty napätia (a zisťujeme im odpovedajúce hodnoty prúdu fotónkou tak, ako v prípade kladných hodnôt napätia na anóde). Napätia na anóde meníme a meriame až dovtedy, kým prúd fotónkou nie je rovný nule. V oblasti nulového anódového prúdu meriame zvlášť pozorne, aby sme čo najpresnejšie určili hodnotu brzdného napätia  $U_0$ . Takýmto postupom získame dve sady meraní. Jednu pri  $\phi = \text{konšt}$  a rôznych  $\lambda$ , v zhode s obr. 2. A druhú sadu pre  $\lambda = \text{konšt}$  a rôznymi hodnotami  $\phi$ , v zhode s obr. 3.

**Úlohy:**

1. Zmerajte závislosť prúdu  $I$  od napätia  $U$  pre niekoľko vlnových dĺžok pri konštantnej intenzite dopadajúceho svetla,  $\phi = \text{konšt.}$  Namerané hodnoty zapíšte do tabuľky I.
2. Zmerajte závislosť prúdu  $I$  od napätia  $U$  pre rôzne intenzity monochromatického svetla,  $\lambda = \text{konšt.}$  Namerané hodnoty zapíšte do tabuľky II.
3. Určte Planckovu konštantu  $h$ .

Tabuľka I.

| $U_{\lambda} = \text{konšt.}$ |               |         |               |         |
|-------------------------------|---------------|---------|---------------|---------|
| Číslo mer.                    | $\lambda_1 =$ |         | $\lambda_2 =$ |         |
|                               | $U$ [V]       | $I$ [A] | $U$ [V]       | $I$ [A] |
| 1.                            |               |         |               |         |
| 2.                            |               |         |               |         |
| .                             |               |         |               |         |

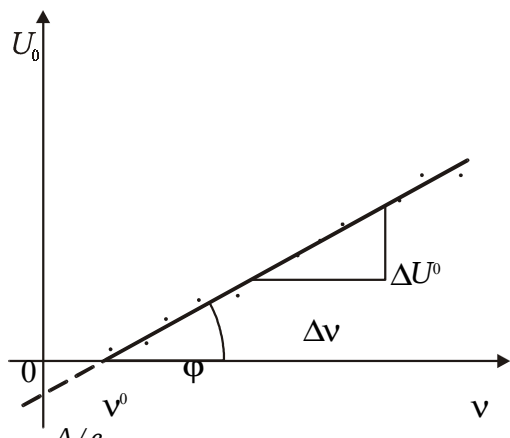
Tabuľka II.

| $\lambda = \text{konšt.}$ |                   |         |                   |         |
|---------------------------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| Číslo mer.                | $U_{\lambda 1} =$ |         | $U_{\lambda 2} =$ |         |
|                           | $U$ [V]           | $I$ [A] | $U$ [V]           | $I$ [A] |
| 1.                        |                   |         |                   |         |
| 2.                        |                   |         |                   |         |
| .                         |                   |         |                   |         |

**Spracovanie výsledkov:**

- a) Zostrojte volt-ampérové charakteristiky fotónky, t.j. namerané hodnoty uvedené v tabuľke I. a tabuľke II. vyneste do grafov. Dostanete grafy typov uvedených na obr. 2 a obr. 3.
- b) Určte Planckovu konštantu  $h$ .

Pri určovaní Planckovej konštanty z experimentálnych údajov postupujeme takto. Z nameraných hodnôt zostrojte graf závislosti brzdného napätia  $U_0$  od frekvencie dopadajúceho svetla  $\nu$ . Táto závislosť je znázornená na obr. 5.



S uvažovaním, že  $\frac{1}{2} m v^2 = e U_0$  rovnicu (2) môžeme zapísať nasledovne

$$h \nu = A + e U_0 \quad \text{alebo} \quad U_0 = \frac{h}{e} \nu - \frac{A}{e} \quad (5)$$

Z rovnice (5) vidíme, že závislosť  $U_0$  od  $\nu$  je lineárna. Ak zderivujeme rovnicu (5) podľa frekvencie  $\nu$ , dostaneme

$$\frac{dU_0}{d\nu} = \frac{h}{e} \quad (6)$$

a ak nekonečne malé zmeny nahradíme konečnými, potom

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta \nu} = \frac{h}{e}$$

a Planckovu konštantu môžeme určiť zo vzťahu

$$h = e \frac{\Delta U_0}{\Delta \nu} \quad (7)$$

- c) Porovnajte tabuľkovú hodnotu Planckovej konštanty s hodnotou určenou podľa vzťahu (7) a uvažujte o metodike a presnosti merania.

**Kontrolné otázky:**

1. Nakreslite závislosti  $I$  od  $U$  pre rôzne  $\lambda$  pri konštantnej intenzite svetla.
2. Nakreslite závislosť  $I$  od  $U$  pre rôznu intenzitu svetla pri konštantnej  $\lambda$ .
3. Aké sú charakteristické vlastnosti vonkajšieho fotoelektrického javu?
4. Vysvetlite fotoelektrický jav na základe Planckovej hypotézy!
5. Vysvetlite, prečo elektromagnetické žiarenie ľubovoľnej vlnovej dĺžky (frekvencie) nemôže vyvolať vonkajší fotoelektrický jav!
6. Nakreslite principiálnu schému zariadenia na pozorovanie vonkajšieho fotoelektrického javu (obr.1).

**Úloha je prevzatá, doplnená a opravená, zo skrípt:**

Doc. RNDr. Drahošlav Vajda, CSc., Doc. Ing. Július Štelina, CSc., RNDr. Jaroslav Kovár, Ing. Ctibor Musil, CSc., RNDr. Ivan Bellan, Doc. Ing. Igor Jamnický, CSc. „*Návody k laboratorným cvičeniam z fyziky*“, vydala Žilinská univerzita vo vydavateľstve EDIS, 2. nezmenené vydanie, rok 2003.