

Kde se nacházíme ?

ČÁST VII - KVANTOVÁ FYZIKA

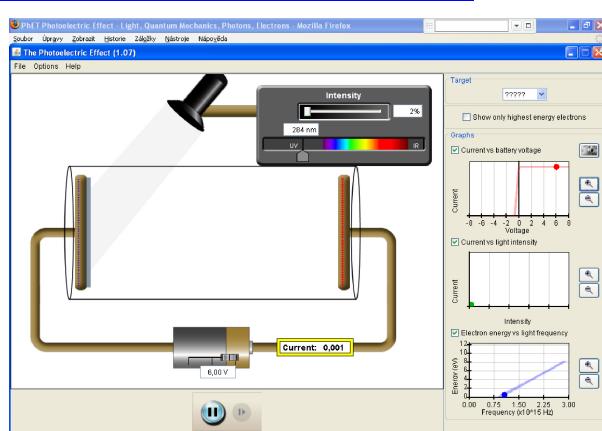
29 Částicové vlastnosti elektromagnetických vln

30 Vlnové vlastnosti částic

31 Schrödingerova formulace kvantové mechaniky

Kolem roku 1900 -1915 řada experimentů, které neodpovídaly klasické fyzice : na př. fotoelektrický jev, záření černého těles, Comptonův jev - hovoří se o "krizi" fyziky - nutný nový pohled na jevy v přírodě → **KVANTOVÁ FYZIKA**

Co je to FOTOELEKTRICKÝ JEV ? (pomocí simulace Coloradské universit- PhET)



29 ČÁSTICOVÉ VLASTNOSTI ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN

Fotony - Experimenty, které prokázaly existenci fotonu :

Fotoelektrický jev,

Comptonův jev,

Záření absolutně černého tělesa,

29.1 Fotony

Foton je základním elementem elektromagnetického pole a zařazujeme ho proto mezi tzv. elementární částice, tj. základní částice, ze kterých sestává náš svět. Vlastnosti fotonu určují věty 29.1 a 29.2.

29.1

Energie fotonu je určena vztahem

$$W = h\nu = \hbar\omega, \quad (29.1)$$

kde Planckova konstanta $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$, $\hbar = h/2\pi$, ν je kmitočet záření a ω je úhlový kmitočet.

29.2

Hybnost fotonu je určena vztahem

$$p = mc = \frac{W}{c} = \frac{h\nu}{c}, \quad (29.2)$$

resp.. ve vektorovém tvaru vztahem

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}, \quad (29.3)$$

kde \mathbf{k} je vlnový vektor (věta 24.1).

EXPERIMENT č. 1 - FOTOELEKTRICKÝ JEV = ENERGIE FOTONU

Heinrich Hertz 1887 (objevuje elmg. vlny a zjišťuje, že UV záření ovlivňuje výboj)

Wilhelm Hallwachs 1888 (vybijení kovových desek UV zářením)

J.J. Thomson 1899 (emitované částice jsou elektrony)

Philipp Lenard 1902 (brzdný potenciál, jeho nezávislost na intenzitě).

29.3

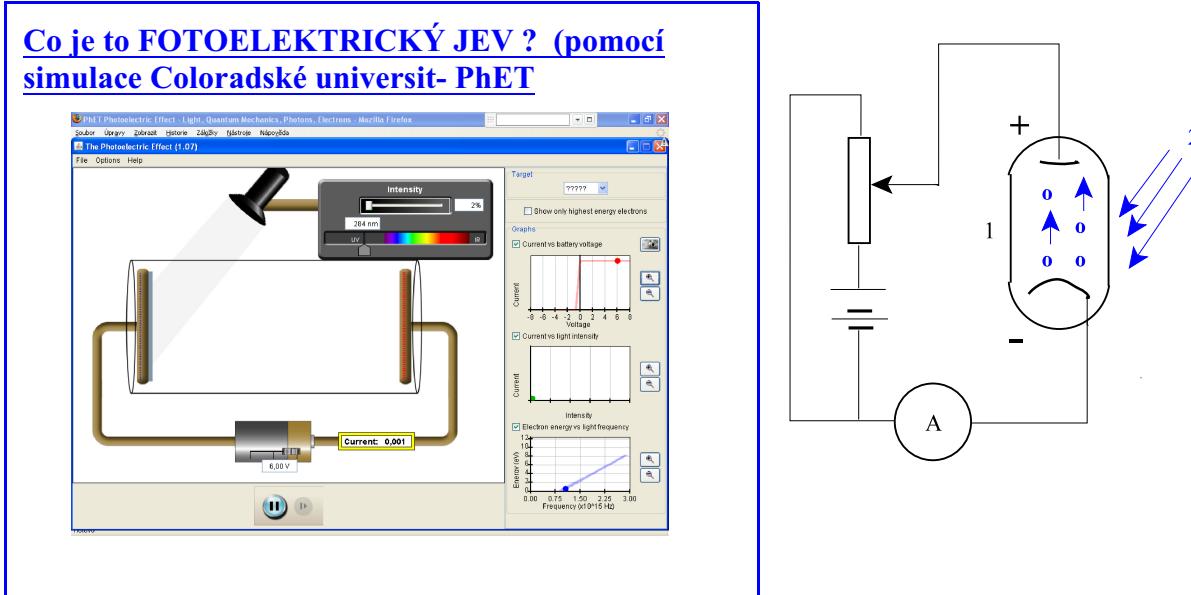
Rovnice pro fotoelektrický jev (Einsteinova rovnice)

$$h\nu = A + \frac{1}{2}mv^2, \quad (29.4)$$

kde A je tzv. výstupní práce materiálu, na který dopadají fotony , $W_k=1/2 mv^2$ je kinetická energie vyletujících elektronů.

Výstupní práce některých kovů A = eV

Hliník	4.08 eV	Cesium	2.1 eV	Olovo	4.14 eV	Draslík	2.3 eV	Uran	3.6 eV
Beryllium	5.0 eV	Kobalt	5.0 eV	Hořčík	3.68 eV	Platina	6.35 eV	Zinek	4.3 eV
Kadmium	4.07 eV	Měď	4.7 eV	Rtuť	4.5 eV	Selen	5.11 eV		
Vápník (calcium)	2.9 eV	Zlato	5.1 eV	Nikl	5.01 eV	Stříbro	4.73 eV		
Uhlík	4.81 eV	Železo	4.5 eV	Niob	4.3 eV	Sodík	2.28 eV		



Komentář k fotoelektrickému jevu

Velmi přesvědčivým důkazem fotonové struktury elektromagnetického záření je tzv. fotoelektrický jev. Je to jev, při kterém se při ozáření vhodných látek (kovů) světlem vhodné vlnové délky uvolňují z jejich povrchu elektrony. Schéma uspořádání experimentu je na obr. 29.2.

Charakteristické vlastnosti tohoto jevu jsou

1. kinetická energie vyletujících elektronů nezávisí na intenzitě dopadajícího záření,
2. uvolňování elektronů nastává jen pro kmitočty dopadajícího záření $v > v_o$.

V podstatě i na základě elektromagnetické teorie světla vyjádřené Maxwellovými rovnicemi bylo možno očekávat takový jev, avšak pro platnost uvedených poznatků nebyla tato teorie schopna poskytnout žádný rozumný argument. Správné vysvětlení jevu podal až r. 1905 Einstein na základě zpřesnění Planckovy hypotézy, že totiž kvantovou povahu má nejen samotný jev emise elektromagnetického záření, ale i její absorpcie. Elektromagnetické záření se tedy šíří v podobě "korpuskulí" (fotonů), které mají nejen energii $W=h\nu$, ale v souladu se vztahem (24.55) i hybnost $p=W/c=h\nu/c$, (což je vztah (29.2)) a hmotnost $m=h\nu/c^2$. Zápis (29.3) vyplývá z předchozího vztahu na základě rovnic $v=\omega/2\pi$, $c=v\lambda$ a definice vlnového vektoru (věta 24.1).

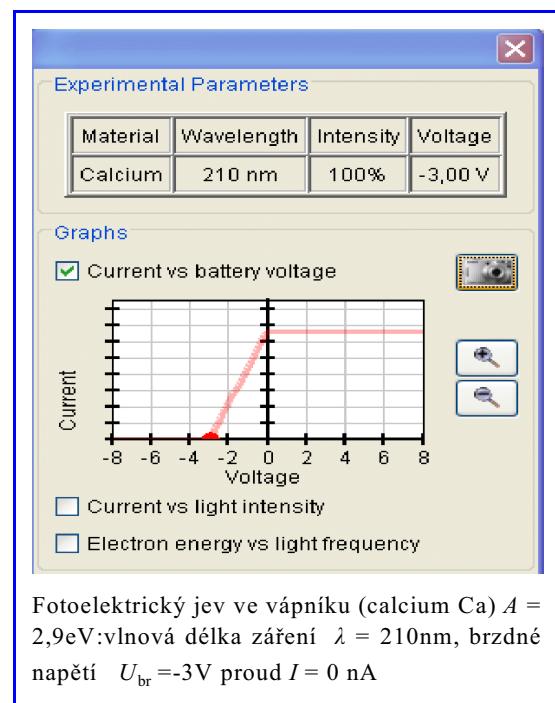
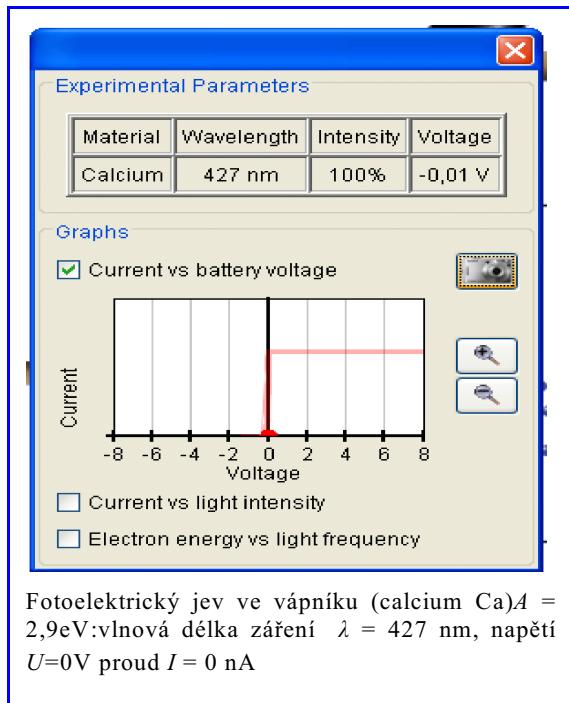
Podle Einsteina se energie fotonu $W=h\nu$ absorbovaná v pevné látce elektronem, spotřebuje z části na překonání vazebních a povrchových sil (tzv. výstupní práce A) a zbytek tvoří kinetická energie elektronu $mv^2/2$. Musí tedy platit rovnice

$$hv = A + \frac{1}{2}mv^2, \quad (29.4)$$

což je rovnice (29.4). Při $hv < A$ nemůže dojít k uvolňování elektronů, což vysvětluje existenci dolní frekvenční hranice fotoelektrického jevu. Minimální kmitočet, při kterém se elektron právě stačí uvolnit z povrchu látky s nulovou rychlostí je určen podmínkou

$$hv_o = A, \quad (29.6)$$

což např. ve vápníku s $A = 2,9\text{eV}$ dává $v_o \approx 7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Vznik fotoelektrického jevu ve vápníku můžeme tedy očekávat při ozáření světlem s vlnovou délkou kratší než asi $\lambda = 427 \text{ nm}$, což velmi dobře souhlasí s pozorováním (viz simulace).

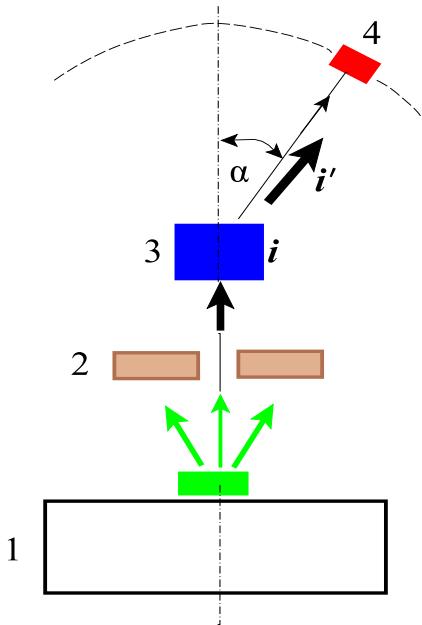


Pokud naopak platí podmínka $hv > A$ vyletují elektrony z kovu katody s kinetickou energií $mv^2/2$, takže i při napětí $U = 0\text{V}$ na elektronce z obr. 29.2 protéká obvodem proud. Napětí, potřebné k potlačení proudu, brzdné napětí U_{br} splňuje podmíinku

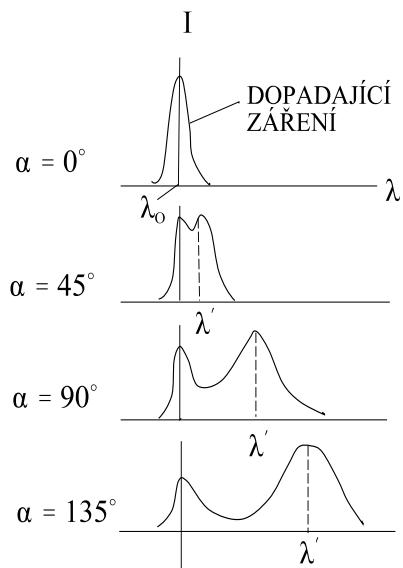
$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_{br},$$

pro náš případ draslíku je to $U_{br} = -3\text{V}$ (náboj elektronu je $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (viz simulace). Ze závislosti brzdného napětí na vlnové délce záření lze stanovit experimentálně Planckovu konstantu (viz praktikum).

EXPERIMENT č.2 : COMPTONŮV ROZPTYL = HYBNOST FOTONU



Obr. 29.4 Zařízení pro měření Comptonova rozptýlu: 1-zdroj fotonů, 2-clona, 3-pevné látka, ve které dochází k rozptýlu, 4-detektor fotonů



Obr. 29.5 Rozložení intenzity rozptýleného záření při různých rozptýlových úhlech

A. H. Compton
(10. 9.1892-3.15.1962)

1927 Nobel Prize in Physics

*Time magazine,
January 13, 1936.*

Comptonův jev - srážka fotonu s elektronem

fire photon

wavelength of incident photon = [0.7] nm

29.4

Změna vlnové délky fotonu při Comptonově rozptýlu je

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_o = \frac{h}{m_o c} (1 - \cos \alpha). \quad (29.5)$$

Comptonovy vlnové délky:

$$\lambda_o = h/(mc)$$

$2.426\ 310\ 238(16) \times 10^{-12}$ m (electron)

$1.319\ 590\ 9067(88) \times 10^{-15}$ m (neutron)

$1.321\ 409\ 8555(88) \times 10^{-15}$ m (proton)

Odvození Comptonova jevu

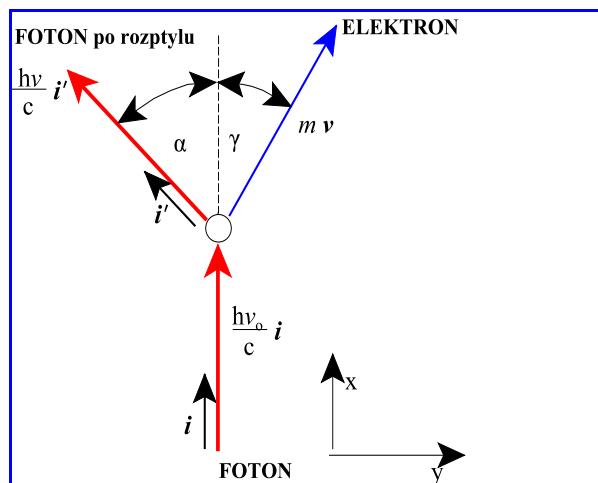
Dalším jevem svědčícím o existenci fotonů je tzv. Comptonův jev. Podle principu kvantové fyziky je energie fotonu nedělitelná, takže po ozáření absorbujícího prostředí zářením můžeme očekávat po průchodu látkou sice zmenšený počet fotonů, avšak se stejným kmitočtem. Ukázalo se však, že záření se při průchodu může "měnit" na záření s větší vlnovou délkou rozptýlené do stran. Tento jev vysvětlil na základě kvantové a relativistické fyziky Compton, proto se nazývá Comptonův jev.

Představme si, že foton se chová jako částice, a proto při interakci s elektronem může dojít ke srážce

podobající se srážce dvou pružných koulí (obr. 13.11). Po srážce se elektron - který byl původně v

klidu - pohybuje jedním směrem a foton se změněnou energií, tj. i jiným kmitočtem, jiným směrem.

I zde musí být splněny dva zákony: **zákon zachování energie a zákon zachování hybnosti.** Pomocí rovnic (29.1) a (16.29) můžeme prvý z nich vyjádřit rovnicí



Obr. 29.3 K odvození Comptonova rozptylu

$$hv_o + m_o c^2 = hv + mc^2. \quad (29.7)$$

Zákon zachování hybnosti musíme napsat ve vektorovém tvaru. Hybnost fotonu před srážkou je podle (29.2) $\mathbf{p}_o = ihv_o/c$, po srážce $\mathbf{p}' = i'hv'/c$, kde i a i' jsou jednotkové vektory ve směru pohybu fotonu před a po srážce. Hybnost elektronu před srážkou je $p_{eo} = 0$ a po srážce $\mathbf{p}_e = mv$. Zákon zachování hybnosti tedy můžeme psát

$$\mathbf{p}_o = \mathbf{p}' + \mathbf{p}_e,$$

a dále pak rozepsat na dvě skalární rovnice vyjadřující průměty do zvolených x a y os

$$\frac{h\nu_o}{c} = \frac{h\nu}{c} \cos \alpha + m v \cos \gamma \quad (29.8)$$

$$0 = \frac{h\nu}{c} \sin \alpha - m v \sin \gamma, \quad (29.9)$$

kde γ je úhel, který svírá vektor hybnosti elektronu po srážce s původním směrem pohybu fotonu a α je úhel, pod kterým se rozptýlí nově vzniklý foton.

Výhodnější je přejít na vyjádření změny vlnové délky použitím vztahu $\lambda = c/v$. Rovnice (29.8) a (29.9) tím přejdou na tvar (s uvážením $m = \beta m_o$)

$$\begin{aligned} \frac{h}{\lambda_o} - \frac{h}{\lambda} \cos \alpha &= \beta m_o v \cos \gamma \\ \frac{h}{\lambda} \sin \alpha &= \beta m_o v \sin \gamma. \end{aligned}$$

Jejich umocněním na druhou a sečtením získáme

$$\frac{h^2}{\lambda_o^2} + \frac{h^2}{\lambda^2} - \frac{2h^2}{\lambda_o \lambda} \cos \alpha = \beta^2 m_o^2 v_o^2. \quad (29.10)$$

Úpravou rovnice (29.7) dostaneme

$$\frac{h}{\lambda_o} - \frac{h}{\lambda} + m_o c = \beta m_o c.$$

Tuto rovnici rovněž umocníme na druhou a potom od ní odečteme rovnici (29.10). Dostaneme další rovnici

$$\frac{2h^2}{\lambda_o \lambda} (\cos \alpha - 1) + 2 m_o c h \left(\frac{1}{\lambda_o} - \frac{1}{\lambda} \right) - m_o^2 [\beta^2 (c^2 - v^2) - c^2] = 0. \quad (29.11)$$

Výraz v hranaté závorce se však rovná nule a ze zbývající rovnice po uvedení na společného jmenovatele výrazu v závorce už lehce dostaneme vztah (29.5). Měření na poměrně jednoduchém zařízení (obr. 29.4) tento vztah velmi dobře potvrdila (obr. 29.5). Tak můžeme Comptonův jev považovat za velmi přesvědčivý důkaz kvantové povahy částic pole - fotonů.

Je zajímavé si povšimnout otázky klidové hmotnosti fotonů z hlediska teorie relativity. Fotony, pohybující se ve vakuu rychlostí světla mají podle speciální teorie relativity hmotnost (16.27)

$$m_f = \lim_{v \rightarrow c} \frac{m_{of}}{\left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}}} . \quad (29.12)$$

V případě, že klidová hmotnost fotonu m_{of} je nenulová (i když nepatrně malá) roste m_f nade všechny meze ($m_f \rightarrow \infty$). Odstranit tento rozpor se skutečností je možné pouze přijetím podmínky $m_{of}=0$, tj. klidová hmotnost fotonu je nulová.

Z rovnice pro celkovou relativistickou energii částice (16.35) vyplývá, že jeho energie je $W=pc$ a hybnost $p=Wc=hv/c$, což je ve shodě s větami (29.1) a (29.2).

Poznámka:

Na závěr tohoto článku si musíme nevyhnutelně položit otázku: Co je tedy světlo - vlnění nebo proud částic? Vlnovou povahu nemůžeme zamítout z hlediska poznatků interference, ohybu a polarizace, částicovou povahu si zase vynucují jevy uvedené v tomto článku. Jediná správná odpověď na tuto otázku je taková, že elektromagnetické záření (tj. i světlo) má současně vlnovou i korpuskulární povahu, i když se tyto vlastnosti v našich představách vylučují. Naštěstí neexistuje jev, v kterém by se současně projevily obě protichůdné povahy světla. Podle často používané interpretace se při vzniku a zániku záření projevují kvantové vlastnosti, při šíření naopak vlnové vlastnosti.