



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Základní pojmy kvantové optiky

Ing. Stanislav Jakoubek

Přehled studijních materiálů

Číslo DUMu	Název DUMu
<u>III/2-1-3-3</u>	<u>Vnější a vnitřní fotoelektrický jev a jeho teorie</u>
<u>III/2-1-3-4</u>	<u>Technické využití fotoelektrického jevu</u>
<u>III/2-1-3-5</u>	<u>Dualismus vln a částic</u>



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vnější a vnitřní fotoelektrický jev a jeho teorie

Ing. Stanislav Jakoubek

Název školy	Střední škola technická AGC a.s.
Název a číslo OP	OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost, CZ. 1.5 Název projektu: Výuka atraktivně a efektivně, č.p.: CZ.1.07/1.5.00/34.0057
Název šablony klíčové aktivity	III/2 Zvyšování kvality výuky prostřednictvím ICT
Tematická oblast (předmět)	Fyzika
Název sady vzdělávacích materiálů	Vybrané partie z fyziky pro IV. ročník středních technických škol
Jméno tvůrce vzdělávací sady	Ing. Stanislav Jakoubek
Číslo sady	III/2-1-3
Číslo DUMu	III/2-1-3-3
Anotace	V tomto DUMu nahlédneme pod pokličku experimentům, které vedly k vybudování jednoho z pilířů moderní fyziky – ke kvantové fyzice. Poznáme, z a jakých podmínek může dopadající záření uvolňovat z kovu elektrony a tento jev si vysvětlíme.

Co je to světlo (historický nástin)

- ▶ I. Newton: světlo je složeno z částic, ty mají různé velikosti, tím pádem i hmotnosti a rozklad světla se dá vysvětlit právě tím
- ▶ V době Newtona i později existovaly názory, že světlo není částicové, ale vlnové povahy (Huygensova vlnová teorie)
- ▶ Tyto názory se neprosadily, protože co řekl Newton, bylo „svaté“ 😊

Pokračování

- ▶ Maxwell: světlo nemá částicovou povahu, je to elektromagnetické vlnění
- ▶ Ohyb, interference, polarizace,... – tyto jevy vlnovou představu podporují
- ▶ ALE ... je tomu tak doopravdy?

Fotoemise

- ▶ Je to děj, při němž dochází k uvolňování elektronů z kovů pomocí dopadajícího světla

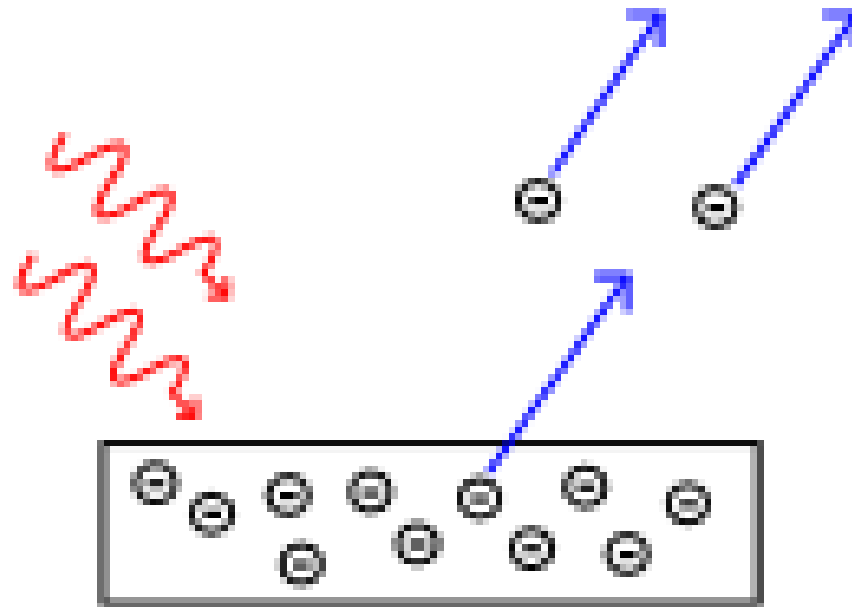
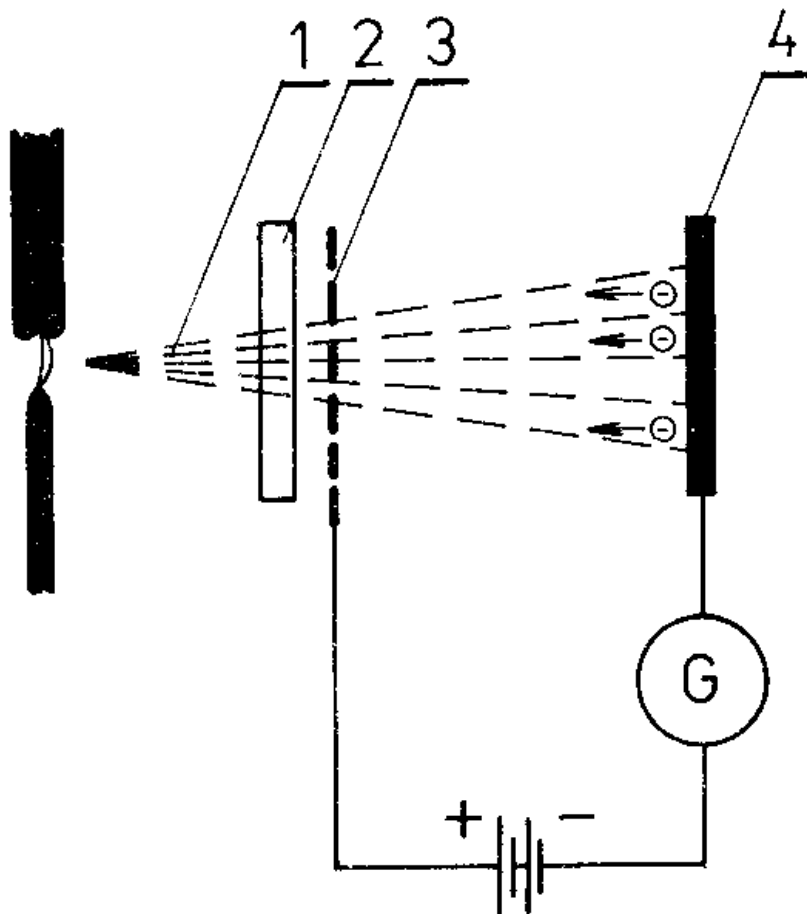


Schéma zařízení k měření fotoefektu



- 1. Záření
- 2. Skleněná destička
- 3. Síťka
- 4. Kovová destička

Přestože obvod není uzavřen, obvodem prochází proud. Vysvětlení: dopadající záření uvolňuje z kovové destičky elektrony.

Z pokusů plynou tři závěry

- ▶ Fotoemise nastane pouze v případě, že je frekvence dopadajícího záření větší, než určitá minimální frekvence f_0 (tzv. mezní frekvence); jinak řečeno: když je vlnová délka dopadajícího záření menší, než určitá (mezní) vlnová délka λ_0 ; není-li splněna tato podmínka, fotoefekt nenastane

Závěry – pokračování

- ▶ Při ozáření dané katody určitým zářením je fotoelektrický proud (tedy množství uvolněných elektronů) intenzitě dopadajícího záření
- ▶ Rychlost, se kterou z katody vyletují elektrony, závisí na frekvenci (vlnové délce) dopadajícího záření a na materiálu katody; nezávisí nijak na intenzitě záření

Problém

- ▶ Druhý závěr pomocí vlnové teorie vysvětlit lze
- ▶ První a třetí závěr pomocí vlnové teorie vysvětlit nelze (tedy světlo nemůže být elektromagnetická vlna!)
- ▶ Jak tedy závěry experimentu teoreticky vysvětlit?

Vysvětlení

- ▶ 1905 – Albert Einstein
- ▶ Aplikoval myšlenku Maxe Plancka, že zdroje nevyzařují spojitě, ale po kvantech (tedy po částicích)
- ▶ Částice se nazývá: foton

Vlastnosti fotonu

$$m_0 = 0\text{kg}$$

Klidová hmotnost; nulová hodnota znamená, že foton v klidu neexistuje.

$$Q = 0\text{C}$$

Elektrický náboj.

$$E = h \cdot f = h \frac{c}{\lambda}$$

Energie fotonu. Důležitý vzorec!!

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Hybnost fotonu.

Planckova konstanta

$$h = 6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Jedna ze tří základních konstant ve vesmíru (spolu s rychlostí světla ve vakuu a gravitační konstantou).

Energetické jednotky v mikrosvětě

- ▶ Z makrosvěta jsme zvyklí používat pro energii jednotku Joule
- ▶ Pro děje v mikrosvětě je Joule příliš veliký, proto používáme jednotku *elektronvolt*

$$1eV \doteq 1,60218 \cdot 10^{-19} J \Rightarrow 1J = 6,2415 \cdot 10^{18} eV$$

Příklad

- ▶ Jakou energii má foton rádiového záření o vlnové délce 200 m, UV foton 300 nm a foton rtg. záření o vlnové délce 10^{-12} m?

$$\lambda_1 = 200m, \lambda_2 = 300nm = 300 \cdot 10^{-9} m, \lambda_3 = 10^{-12} m; E = ?$$

$$E = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow E_1 = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{200} J \doteq 9,939 \cdot 10^{-28} J;$$

$$E_2 = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{300 \cdot 10^{-9}} J \doteq 6,626 \cdot 10^{-19} J;$$

$$E_3 = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^{-12}} J \doteq 1,9878 \cdot 10^{-13} J$$

Příklad

- Vyjádřete energie z předchozího příkladu v elektronvoltech.

$$E_1 = \frac{9,939 \cdot 10^{-28}}{1,60217 \cdot 10^{-19}} eV \doteq 6,2 \cdot 10^{-9} eV$$

$$E_2 = \frac{6,0626 \cdot 10^{-19}}{1,60217 \cdot 10^{-19}} eV \doteq 3,76 eV$$

$$E_3 = \frac{1,9878 \cdot 10^{-13}}{1,60217 \cdot 10^{-19}} eV \doteq 1240664 eV \doteq 1,24 MeV$$

Einsteinova rovnice fotoelektrického jevu

$$hf = W_V + \frac{1}{2} m_e v^2$$

hf – energie dopadajícího fotonu

W_V – výstupní práce – energie
potřebná k uvolnění elektronu z kovu

$\frac{1}{2} m_e v^2$ – kinetická energie
elektronu vyletujícího z kovu

Poznámky

$$W_V = hf_0 = h \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow hf = hf_0 + \frac{1}{2} m_e v^2$$

Energie dopadajícího fotonu se částečně spotřebuje na uvolnění elektronu z kovu a když nějaká zbyde, tak i na jeho urychlení při odletu. Pokud nemá dopadající elektron energii rovnou alespoň výstupní práci, k fotoefektu nemůže dojít.

Důležitá poznámka

- ▶ Einsteinova rovnice fotoelektrického jevu je vyjádřením **zákona zachování energie** pro tento jev.

Příklad

- ▶ Sodík má výstupní práci $3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Určete mezní frekvenci, mezní vlnovou délku a rychlost vyletujících elektronů, dopadá-li na katodu záření o frekvenci $6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$.

$$W_V = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}, f = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}; f_0 = ?, \lambda_0 = ?, v = ?$$

$$W_V = hf_0 \Rightarrow f_0 = \frac{W_V}{h} = \frac{3,6 \cdot 10^{-19}}{6,626 \cdot 10^{-34}} \text{ Hz} \doteq 5,4331 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \cdot 10^8}{5,4331 \cdot 10^{14}} \text{ m} \doteq 552 \text{ nm}$$

Pokračování řešení

$$hf = W_V + \frac{1}{2} m_e v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2(hf - W_V)}{m_e}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2(6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{14} - 3,6 \cdot 10^{-19})}{9,1 \cdot 10^{-31}}} m.s^{-1} \doteq 287314 m.s^{-1} \doteq 3 \cdot 10^5 m.s^{-1}$$

Poznámka: rychlost obrovská, ale fakticky necelé jedno promile rychlosti světla ve vakuu.

Příklad

- ▶ Jakou rychlostí opouštějí elektrony měď o mezní vlnové délce 227 nm po dopadu světla ze sodíkové výbojky ($\lambda = 589 \text{ nm}$)?

$$\lambda_0 = 227 \text{ nm}, \lambda = 589 \text{ nm}; v = ?$$

$\lambda < \lambda_0 \Rightarrow$ foton má příliš malou energii a k fotoefektu vůbec nedojde.

Druhy fotoelektrického jevu

- ▶ **Vnější fotoelektrický jev** – probírali jsme doted'; vnější je proto, že se elektrony uvolňují z kovu do vnějšího okolí
- ▶ **Vnitřní fotoelektrický jev** – zářením uvolněné elektrony látku neopouštějí, ale zůstávají uvnitř ní jako vodivostní elektrony; probíhá zejména u polovodičů

Literatura

- ▶ [1] WOLFMANKURD. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 10.11.2012]. Dostupný na WWW:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f5/Photoelectric_effect.svg
- ▶ [2] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- ▶ [3] BARTÁK, František a kol. *Sbírka úloh z fyziky pro studijní obory SOU a SOŠ*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství Praha,n.p., 1988, ISBN 14-423-88.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Technické využití fotoelektrického jevu

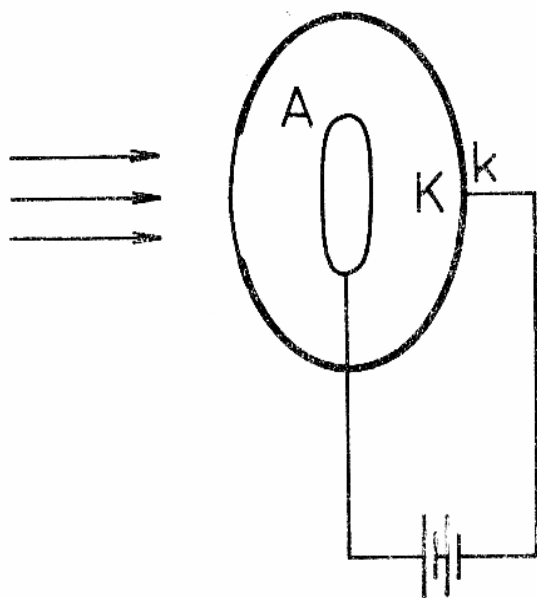
Ing. Stanislav Jakoubek

Název školy	Střední škola technická AGC a.s.
Název a číslo OP	OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost, CZ. 1.5 Název projektu: Výuka atraktivně a efektivně, č.p.: CZ.1.07/1.5.00/34.0057
Název šablony klíčové aktivity	III/2 Zvyšování kvality výuky prostřednictvím ICT
Tematická oblast (předmět)	Fyzika
Název sady vzdělávacích materiálů	Vybrané partie z fyziky pro IV. ročník středních technických škol
Jméno tvůrce vzdělávací sady	Ing. Stanislav Jakoubek
Číslo sady	III/2-1-3
Číslo DUMu	III/2-1-3-4
Anotace	Seznámíme se s faktem, že fotoelektrický jev existuje ve dvou variantách – vnější a vnitřní. Protože má své praktické aplikace, ukážeme si, kde se s ním můžeme setkat.

Využití vnějšího fotoelektrického jevu

- ▶ V dnešní době již není příliš běžné
- ▶ Častěji se v praxi využívá vnitřní fotoelektrický jev
- ▶ Fotonky
- ▶ Fotonásobiče elektronů
- ▶ ...

Fotonka

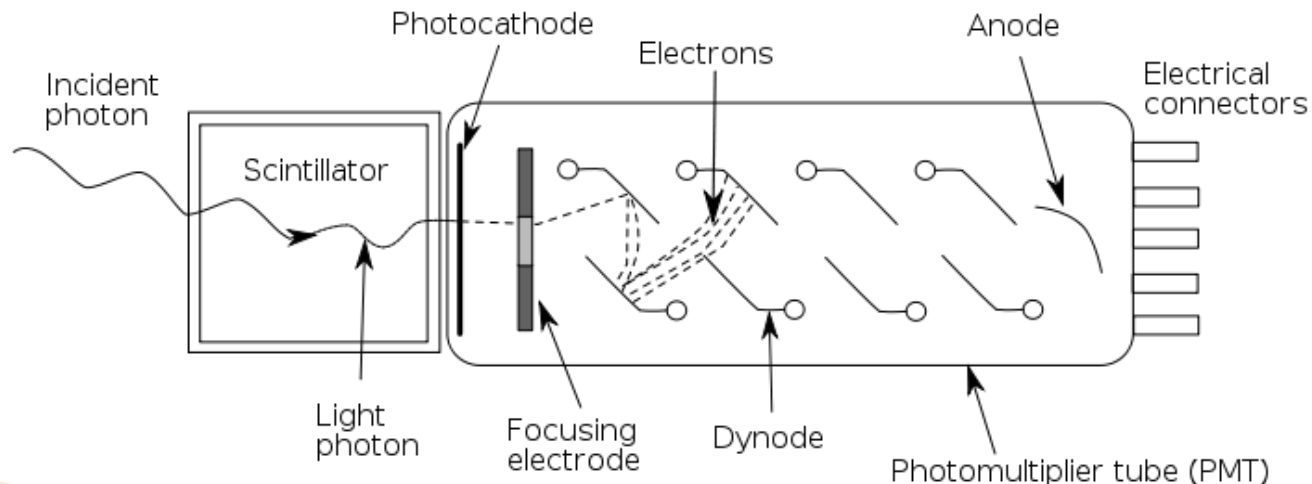


- Postříbřená skleněná baňka s vysokým vakuem
- Na stříbře je vrstvička alkalického kovu (např. cesium), které tvoří fotoelektrickou vrstvu
- Tato vrstva je katodou
- Drátěná smyčka – tvoří anodu

Dřívější využití: fotometrie, zabezpečovací zařízení

Fotonásobič elektronů

- ▶ Schopnost i velmi slabý světelný signál převést na elektrický proud
- ▶ Využití v jaderné fyzice a při konstrukci velmi citlivých fotometrů

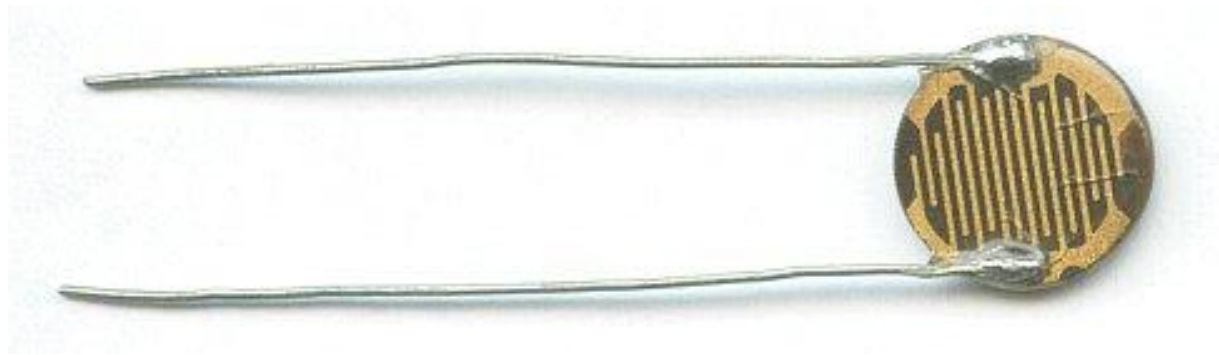


Využití vnitřního fotoelektrického jevu

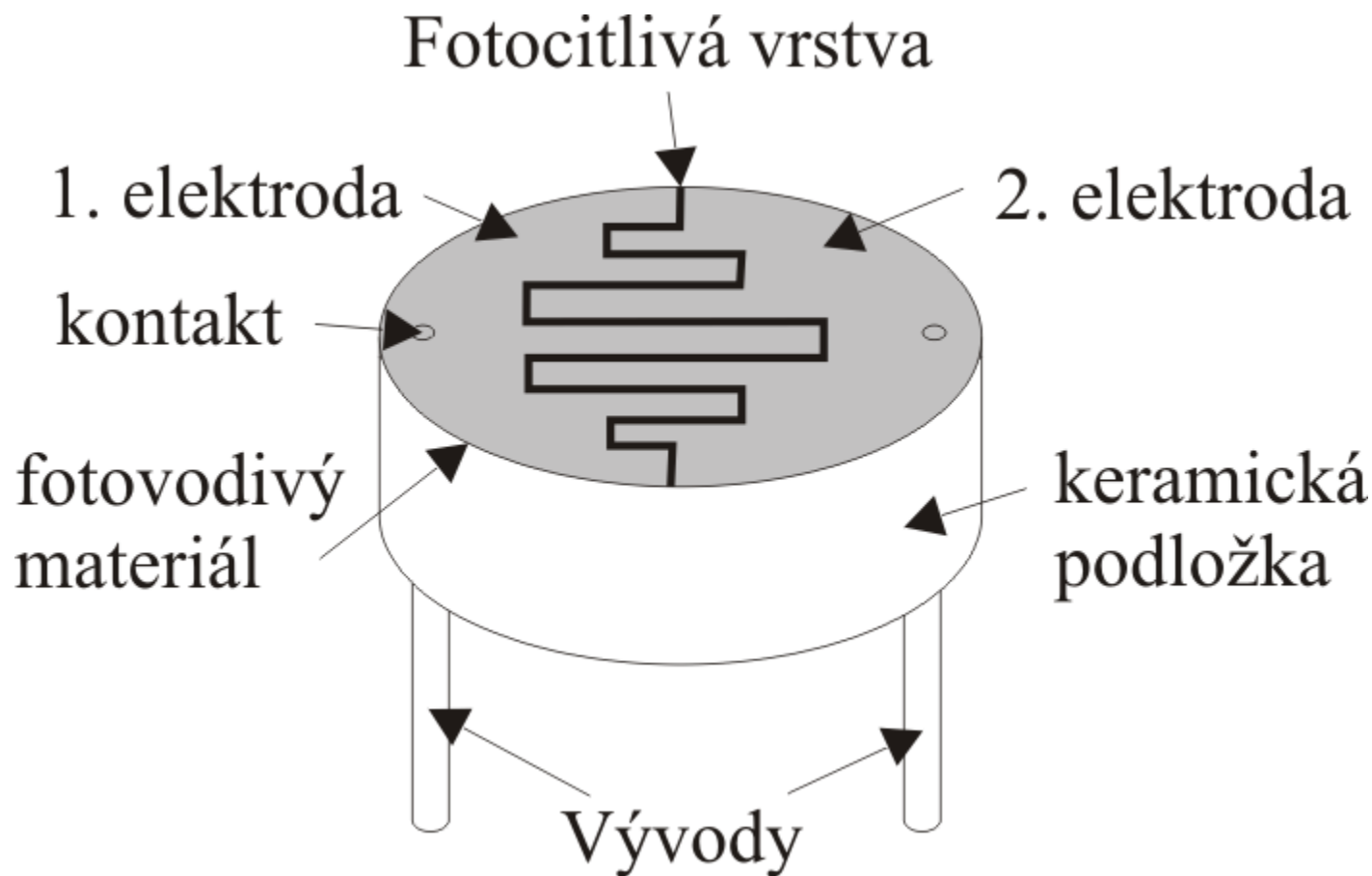
- ▶ Fotony dopadající na **polovodič** jsou pohlcovány elektrony
- ▶ Pokud mají dostatečnou energii, mohou elektrony překonat vazebné síly v krystalové mřížce
- ▶ Vznikne pár elektron – díra a tím pádem klesá odpor polovodiče

Fotorezistor

- ▶ Vyrábí se např. ze sulfidu kadmnatého CdS , který se uzavře do pouzdra s průhledným okénkem
- ▶ Využití v automatizaci, v zabezpečovacích zařízeních, v požárních hlásičích, jako snímač osvětlení, ve fotoaparátech, ...

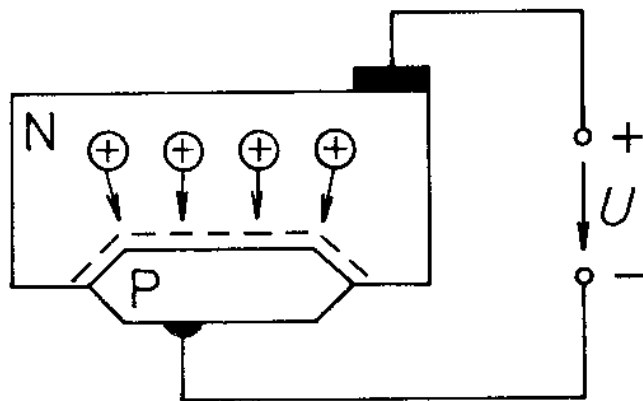


Konstrukce fotorezistoru



Fotodioda

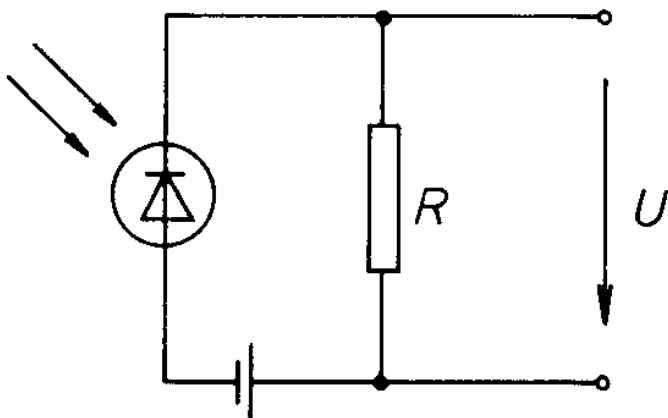
- ▶ Je tvořena krystalem s oblastmi s opačným typem vodivosti; mezi nimi je přechod PN



- Dopadem světla na PN přechod v něm vznikají volné elektrony a díry
- Kladně nabitá N přitahuje elektrony, záporně nabitá P díry
- Díky tomu se rozdíl potenciálů částečně vyrovnává
- To má za následek snížení odporu fotodiody v závěrném směru

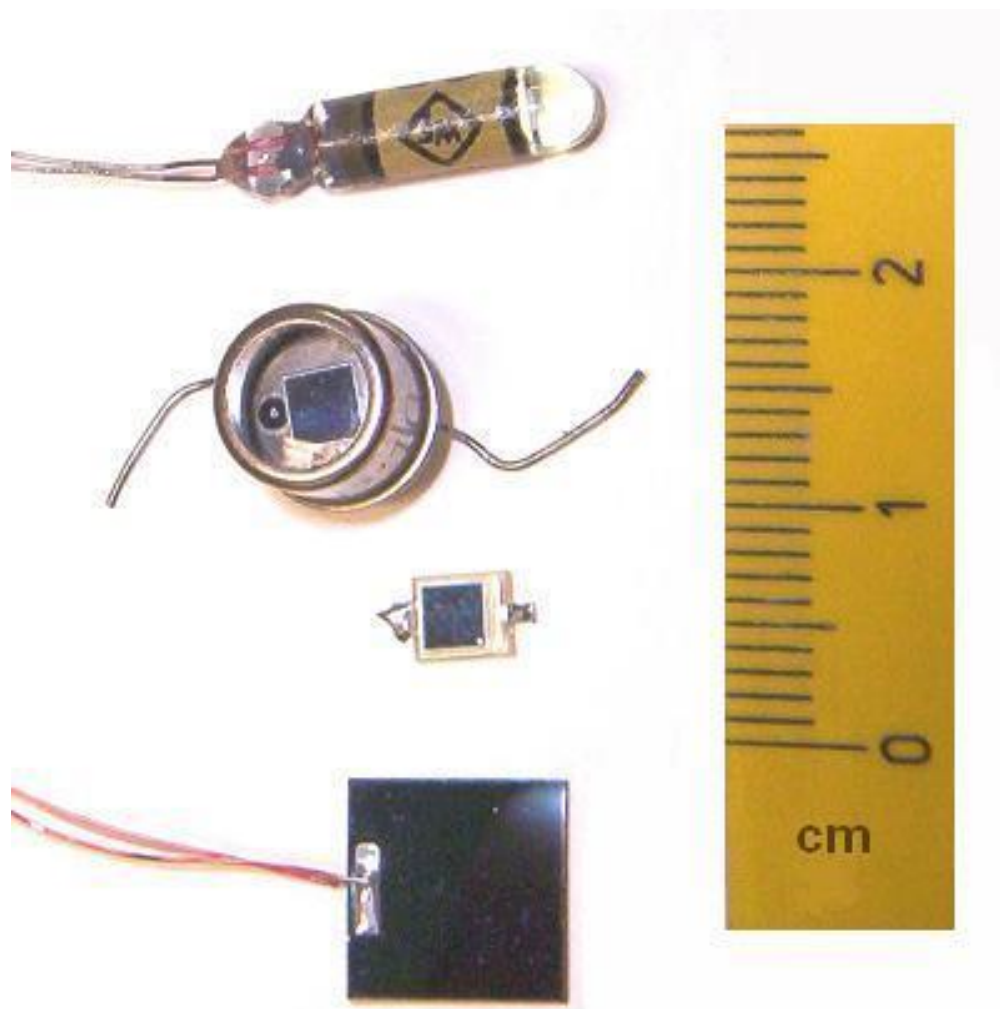
Zapojení fotodiody

- ▶ V závěrném směru



- Na zatěžovacím odporu R vzniká úbytek napětí U podle osvětlení fotodiody

Různá provedení fotodiod



Použití fotodiod

- ▶ V zařízeních pro kontrolu výrobního procesu
- ▶ Automatické ovládání svítidel
- ▶ Požární hlásiče
- ▶ V měřící technice
- ▶ ...

Fotovoltaické články

- ▶ Tzv. sluneční baterie
- ▶ Polovodičová součástka schopná přeměňovat světelné záření na elektrický proud
- ▶ Využití k napájení přístrojů (kalkulačky, hodinky, ...)
- ▶ Fotovoltaické elektrárny
- ▶ ...

Fotovoltaický článek



Solární článek
vyrobený z
monokrystalické
ho křemíkového
plátku.

Fotovoltaická elektrárna



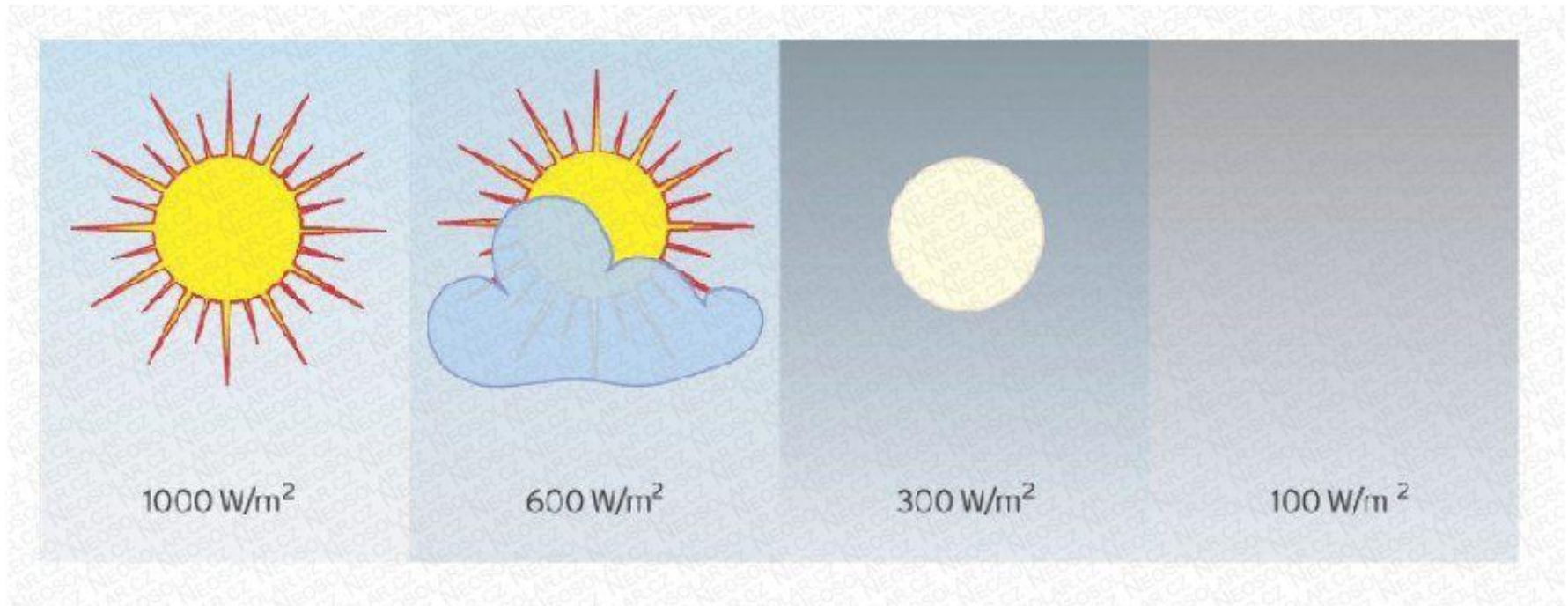
Výhody fotovoltaických elektráren

- ▶ Velké množství dopadající energie ze Slunce
- ▶ Během výroby elektřiny neznečišťuje životní prostředí
- ▶ Po instalaci vyžadují minimální údržbu
- ▶ Díky státním garancím rychlá návratnost investic (výhoda jak pro koho ☹)
- ▶ Velký růstový potenciál díky výzkumu a vývoji

(Některé) nevýhody fotovoltaických elektráren

- ▶ Velmi drahá instalace elektrárny
- ▶ Nefunguje v noci a je náchylná na počasí (zataženo, sníh,...)
- ▶ Produkuje stejnosměrný proud; jeho přeměna na střídavý ve *střídači* zvětšuje ztráty
- ▶ Panely časem snižují svoji účinnost (už tak poměrně nízkou)
- ▶ Nákladná ekologická likvidace panelů po ukončení činnosti

Vliv oblačnosti a mlhy na množství dopadající energie



Literatura

- ▶ [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- ▶ [2] EBERHARDT, Colin; HORVATH, Arpad. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 12.11.2012]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Photomultipliertube.svg>
- ▶ [3] WIKIMAN, Ben. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 12.11.2012]. Dostupný na WWW: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/LDR.jpg>
- ▶ [4] ALBERT, Filip. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 12.11.2012]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Konstrukcni_usporadani_fotorezistoru.png
- ▶ [5] ULFBASTEL. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 12.11.2012]. Dostupný na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Fotodio.jpg>
- ▶ [6] TDANGKHOA. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 12.11.2012]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Solar_cell.png
- ▶ [7] KOZUCH. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 12.11.2012]. Dostupný na WWW: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Solarn%C3%AD_\(fotovoltaick%C3%A1\)_elektr%C3%A1rna_v_%C4%8Cesk%C3%A9_Skalici_\(okres_N%C3%A1chod\).jpg](http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Solarn%C3%AD_(fotovoltaick%C3%A1)_elektr%C3%A1rna_v_%C4%8Cesk%C3%A9_Skalici_(okres_N%C3%A1chod).jpg)
- ▶ [8] NEOSOLAR. *neosolar.cz* [online]. [cit. 12.11.2012]. Dostupný na WWW: http://www.neosolar.cz/solarni_systemy/solarni_zareni



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Dualismus vln a částic

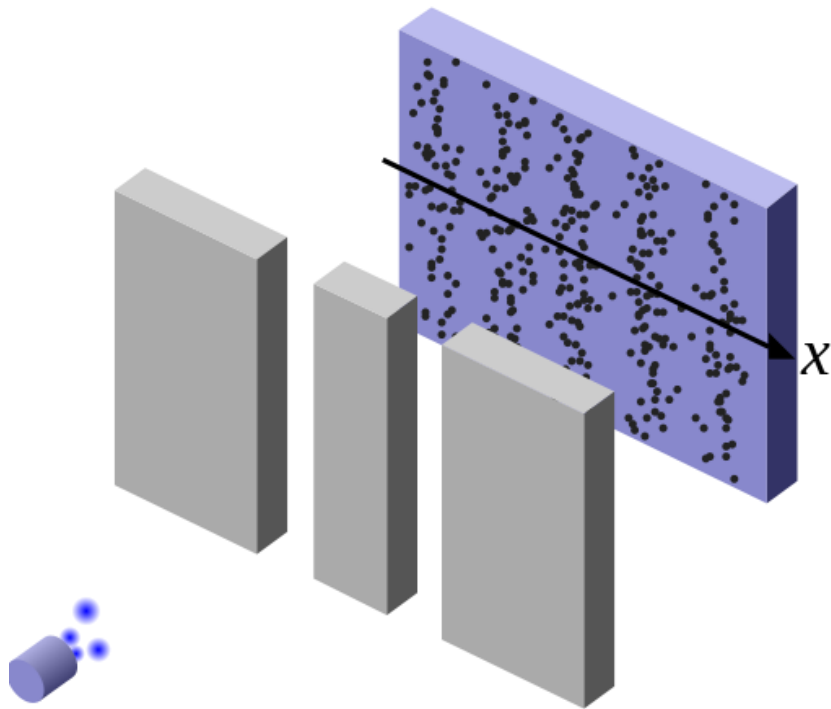
Ing. Stanislav Jakoubek

Název školy	Střední škola technická AGC a.s.
Název a číslo OP	OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost, CZ. 1.5 Název projektu: Výuka atraktivně a efektivně, č.p.: CZ.1.07/1.5.00/34.0057
Název šablony klíčové aktivity	III/2 Zvyšování kvality výuky prostřednictvím ICT
Tematická oblast (předmět)	Fyzika
Název sady vzdělávacích materiálů	Vybrané partie z fyziky pro IV. ročník středních technických škol
Jméno tvůrce vzdělávací sady	Ing. Stanislav Jakoubek
Číslo sady	III/2-1-3
Číslo DUMu	III/2-1-3-5
Anotace	Z předchozího výkladu už víme, že vlna může mít i vlastnosti částice. Prozradíme si, že to platí i obráceně, tedy že částice může mít vlastnosti vlnění. A vlna má svojí vlnovou délku. Co tedy znamená vlnová délka např. elektronu? O tom všem je tento DUM.

Zásadní otázka

- ▶ Víme, že vlny (elektromagnetické) se za určitých okolností nechovají jako vlny, ale jako částice (fotony). Viz. fotoelektrický jev.
- ▶ Nemohlo by to fungovat i obráceně? Tedy – nechovají se někdy hmotné částice (třeba elektrony, protony,...) jako vlny?

Dvouštěrbinový experiment



- **Předpoklad:** elektrony jsou „kuličky hmoty“ a při tomto uspořádání nemohou za překážku projít.
- **Skutečnost:** elektrony překážkou procházejí a statistika dopadů má stejný průběh, jako optický dvouštěrbinový experiment

Závěr experimentu

- ▶ Pohybující se částice s nenulovou klidovou hmotností (elektron, proton,...) mají nejen **částicový charakter**, ale i **vlnový charakter**
- ▶ Louis de Broglie – 1924
- ▶ Dualismus – „dvojjakost“ – vyjádření, že mají obě povahy

Louis de Broglie (1892–1987)



- Francouzský kvantový fyzik
- 1929 – Nobelova cena za fyziku za objev vlnových vlastností částic

De Broglieova vlnová délka

- ▶ Pokud se bavíme o vlnovém charakteru částice, má smysl se ptát po její vlnové délce

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

h ... Planckova konstanta

p ... hybnost částice

m ... hmotnost částice

v ... rychlost částice

Charakter De Broglieova vlnění

- ▶ Není to elektromagnetické vlnění
- ▶ Jsou to tzv. pravděpodobnostní vlny
- ▶ Velikost amplitudy této vlny určuje pravděpodobnost výskytu částice v určitém místě prostoru
- ▶ Je to jedna ze základních myšlenek kvantové fyziky

Hmotnost pohybujícího se fotonu

- ▶ Víme: klidová hmotnost fotonu $m_0=0$ kg
- ▶ Pohybující se foton:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mc} \Rightarrow m = \frac{h}{c\lambda}$$

Poznámka:

$$m = \frac{h}{c \frac{c}{f}} = \frac{h}{\frac{c^2}{f}} = \frac{hf}{c^2}$$

Závěr

- ▶ Představa částic jako „kuliček hmoty“ je zcela chybná
- ▶ Někdy se více projevují částicové vlastnosti, někdy vlnové
- ▶ Lidé jako živočichové mají zkušenost s malými rychlostmi a s tělesy střední velikosti; nemusí nás překvapovat, že mikrosvět se chová jinak

Příklad

- Vypočtete vlnovou délku protonu pohybujícího se rychlostí $3 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}$.

$$v = 3 \cdot 10^7 \text{ m.s}^{-1}, m_p \doteq 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; \lambda = ?$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{1,672 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^7} \text{ m} \doteq 1,32 \cdot 10^{-14} \text{ m}$$

Poznámka: jde o pravděpodobnostní vlnu; její velikost koresponduje s velikostí atomového jádra, tedy s místem, kde se proton vyskytuje.

Příklad

- Vypočtete vlnovou délku kamene o hmotnosti 1 kg, který se pohybuje rychlostí 1 m.s⁻¹.

$$m = 1\text{kg}, v = 1\text{m.s}^{-1}; \lambda = ?$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{1 \cdot 1} \text{ m} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

Poznámka: Tělesa střední velikosti, na která jsme zvyklí, mají neměřitelně malé vlnové délky. To znamená, že těleso je prostě těleso ☺ a dualismus nás pro něj nemusí zajímat.

Příklad

- ▶ Spektrální čára sodíku má vlnovou délku 589,3 nm. Určete hmotnost fotonu tohoto záření.

$$\lambda = 589,3 \text{ nm} = 589,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}; m = ?$$

$$m = \frac{h}{\lambda c} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{589,3 \cdot 10^{-9} \cdot 3 \cdot 10^8} \text{ kg} \doteq 3,75 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

Literatura

- ▶ [1] BEHN, Trutz. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 9.11.2012]. Dostupný na WWW:
http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Soubor:Doubleslit_experiment.svg&page=1
- ▶ [2] AUTOR NEUVEDEN. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 9.11.2012]. Dostupný na WWW:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Broglie_Big.jpg
- ▶ [3] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- ▶ [4] BARTÁK, František a kol. *Sbírka úloh z fyziky pro studijní obory SOU a SOŠ*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství Praha,n.p., 1988, ISBN 14-423-88.