

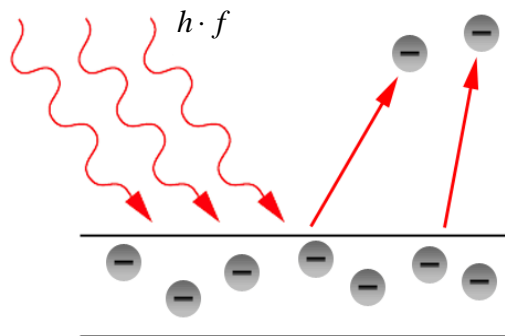
ZÁKLADNÍ POJMY KVANTOVÉ FYZIKY, FOTOELEKTRICKÝ JEV.

KVANTOVÁ FYZIKA:

- Koncem 19. století byly zkoumány optické jevy, které nelze vysvětlit jen vlnovými vlastnostmi světla => vznikly nové fyzikální teorie, které jsou součástí kvantové fyziky.
- Zakladatelem kvantové teorie byl německý fyzik **Max Planck**.
- V roce 1900 dospěl k závěru, že zářící těleso nevyzařuje (nepohlcuje) svoji energii spojitě, ale po určitých dávkách, tzv. kvantech (Planckova kvantová hypotéza). Pro označení této dávky zavedl název **kvantum**.
- Dále dospěl k závěru, že kvantum energie závisí na frekvenci záření nebo na jeho vlnové délce.
- Energie kvanta se vypočítá podle vztahu $E = h \cdot f$, f je frekvence záření, h je Planckova konstanta, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.
- Bylo třeba opustit představu klasické fyziky, podle níž všechny fyzikální děje probíhají spojitě.
- Kvantová teorie je dnes chápána jako velice úspěšná vědecká teorie. Max Planck získal v roce 1918 Nobelovu cenu za fyziku.
- Následovníci Maxe Plancka:
 - Albert Einstein* - ukázal, že existence kvant by mohla pomoci vysvětlit starou záhadu fotoelektrického jevu.
 - Niels Bohr* v roce 1913 přišel s novou teorií struktury atomů, která vycházela právě z kvantové teorie.
 - Arthur Compton* v roce 1923 experimentálně prokázal, že rentgenové záření má kvantovou podstatu.
 - Louis de Broglie* roku 1924 přišel s důkazem, že hmota má vlnové vlastnosti.
- V letech 1925-1926 se zrodil nový obor fyziky, kvantová mechanika, u jehož vzniku byli *Erwin Schroedinger*, *Werner Heisenberg*, *Max Born* a *Paul Dirac*.

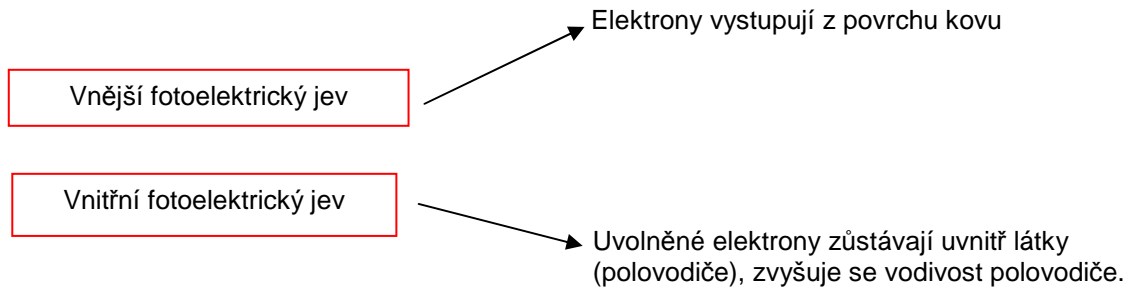
FOTOELEKTRICKÝ JEV:

- Je důkazem kvantové povahy elektromagnetického záření.
- Na konci 19. století bylo zjištěno, že lze z povrchu kovů uvolnit elektrony i při nízkých teplotách. (Doposud bylo známo uvolňování elektronů z kovů, které je podmíněno vysokou teplotou kovu, tzv. termoemise).
- Jestliže dopadá na povrch kovu světelné záření s dostatečně velkou frekvencí, jsou z jeho povrchu vyraženy elektrony. Tento jev se nazývá fotoelektrický jev.

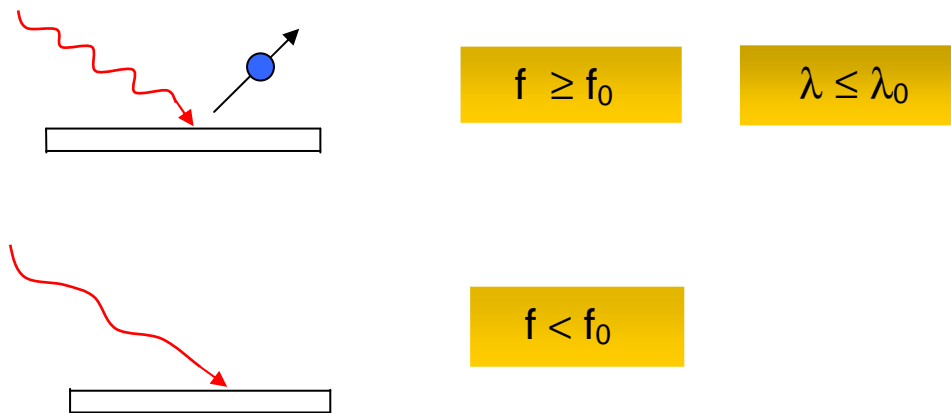


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- Za objevitele fotoelektrického jevu je považován německý fyzik **Hertz**.
- Fotoelektrický jev pozorujeme hlavně u pevných látek (kovů a polovodičů) a dělíme ho na vnější a vnitřní.



- Experimentálně byly zjištěny (na konci 19. století) **zákony vnějšího fotoelektrického jevu** (fotoefektu):
 - Pro každý kov existuje určitá **mezní frekvence f_0** , při níž dochází k fotoemisi. Jestliže je frekvence f záření menší než frekvence mezní, fotoelektrický jev nenastane.



- Pokud nastane fotoelektrický jev, potom je **elektrický proud** (počet emitovaných elektronů) **přímo úměrný intenzitě** dopadajícího záření.
 - **Energie** (a tím i rychlost) emitovaných elektronů **je přímo úměrná frekvenci** dopadajícího záření, závisí na materiálu katody a **nezávisí na intenzitě** dopadajícího záření.
- **Einsteinova teorie fotoelektrického jevu:**
 - Klasická fyzika nedovedla vnější fotoelektrický jev vysvětlit. Vysvětlení podal v roce 1905 Albert Einstein, který za to obdržel Nobelovu cenu.
 - Při objasňování jevu vyšel z kvantové teorie. Předpokládal, že elektromagnetické záření je soubor částic – světelných kvant, které nazval **fotony**.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- Každý foton má svou energii, hmotnost a hybnost.

Energie fotonu:

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

Hmotnost fotonu:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot c^2} = \frac{h}{\lambda \cdot c}$$

Hybnost fotonu:

$$p = m \cdot c = \frac{h}{\lambda}$$

- Einsteinova fotoelektrická rovnice:

$$h \cdot f = W_0 + \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$$

Při fotoelektrickém jevu každý foton předá svou veškerou energii jen jednomu elektronu, a tím zanikne. Část této energie elektron spotřebuje na vykonání **výstupní práce** W_0 , tj. práce potřebné k uvolnění elektronu z kovu, a zbytek využije na zvýšení své kinetické energie.

Výstupní práci můžeme vyjádřit ve tvaru: $W_0 = h \cdot f_0$

Z Einsteinovy rovnice plyne experimentálně zjištěný fakt, že pro $f < f_0$ fotoelektrický jev nenastává, protože energie fotonů v tom případě nestačí k uvolnění elektronů z kovu.

- *Poznámka:*

Různé kovy mají různou hodnotu výstupní práce a tím i různé hodnoty mezní frekvence. Malou výstupní práci mají kovy se slabě vázanými elektrony (například cesium, k uvolnění elektronů stačí již červené světlo). Nejmenší výstupní práci mají alkalické kovy => pouze u nich dochází k fotoemisi působením viditelného záření. Zinek má výstupní práci větší a k fotoefektu dochází teprve působením ultrafialového záření.

OTÁZKY:

1. Může fotoemise nastat při dopadu záření na kuchyňskou sůl nebo diamant?
2. Nastává fotoemise pouze při dopadu viditelného záření?
3. Skleněná baňka fotonky musí být vyrobena ze speciálního křemenného skla. Proč?
4. Má výstupní práce všech kovů stejnou hodnotu?
5. Zapište Einsteinovu rovnici fotoelektrického jevu. Jaký je její charakter?

ŘEŠENÉ PŘÍKLADY**Hodnoty některých konstant:**Planckova konstanta: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ Hmotnost elektronu: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ Rychlost světla: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ **Příklad 1:**

Nastane vnější fotoelektrický jev, jestliže měděnou elektrodu osvětlíme světlem o vlnové délce 400 nm? Výstupní práce mědi je 4,47 eV.

Řešení:

$$\lambda = 400 \text{ nm} = 400 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$W_0 = 4,47 \text{ eV} = 4,47 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Převédeme jednotky!

$$\lambda_0 = ?$$

$$W_0 = h \cdot f_0$$

$$f_0 = \frac{W_0}{h}$$

$$f_0 = \frac{4,47 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,626 \cdot 10^{-34}}$$

$$f_0 = 1,08 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

Ze vztahu pro výstupní práci vyjádříme mezní frekvenci.

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$$

Vztah pro výpočet mezní vlnové délky.

$$\lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{1,08 \cdot 10^{15}} = 2,777 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda_0 = 277,8 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 277,8 \text{ nm}$$

Podmínka pro fotoelektrický jev: $\lambda \leq \lambda_0$

Vnější fotoelektrický jev nenastane.

Aby nastal tento jev, musela by být vlnová délka dopadajícího záření menší nebo rovna hodnotě 277,8 nm, což neodpovídá zadání.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Příklad 2:

Zinková elektroda je ozářena ultrafialovým zářením o vlnové délce 320 nm. Jakou největší rychlost mají elektrony uvolněné ze zinku při vnějším fotoelektrickém jevu? Výstupní práce zinku je 3,74 eV.

Řešení:

$$\lambda = 320 \text{ nm} = 32 \cdot 10^{-8} \text{ m}$$

$$W_0 = 3,74 \text{ eV} = 3,74 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 5,984 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Převědeme jednotky!

$$v_{\text{max}} = ?$$

$$h \cdot f = W_0 + \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$$

Einsteinova fotoelektrická rovnice.

$$\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 = h \cdot f - W_0$$

Z rovnice vyjádříme rychlost.

$$m_e \cdot v^2 = 2(h \cdot f - W_0)$$

$$m_e \cdot v^2 = 2(h \cdot f - W_0)$$

$$v = \sqrt{\frac{2(hf - W_0)}{m_e}} = \sqrt{\frac{2\left(h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_0\right)}{m_e}}$$

Dosadíme vztah pro frekvenci $f = \frac{c}{\lambda}$

$$v = \sqrt{\frac{2\left(6,626 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{32 \cdot 10^{-8}} - 5,984 \cdot 10^{-19}\right)}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,0216 \cdot 10^{-18}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = \sqrt{4,75 \cdot 10^{10}} = \sqrt{4,75} \cdot 10^5$$

$$v = 2,18 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Maximální rychlost elektronů může být $2,18 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Příklad 3:

Vysílač s výkonem 1kW pracuje na kmitočtu 880 kHz. Kolik fotonů vysílá za 1s?

Řešení:

$$P = 1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$$

$$f = 880 \text{ kHz} = 880 \cdot 10^3 \text{ Hz} = 88 \cdot 10^4 \text{ Hz}$$

Převědeme jednotky!

$$n = ?$$

$$n = \frac{E'}{E}$$

$E' = P \cdot t$ energie vyzařená laserem za 1 s

$$n = \frac{P \cdot t}{h \cdot f}$$

$E = h \cdot f$ energie fotonu

$$n = \frac{P \cdot t}{h \cdot f}$$

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$n = \frac{1000}{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 88 \cdot 10^4}$$

$$n = \frac{10^3}{583 \cdot 10^{-30}} = 1,72 \cdot 10^{33}$$

Vysílač vysílá za 1 sekundu $1,72 \cdot 10^{33}$ fotonů.

PŘÍKLADY K PROCVIČENÍ

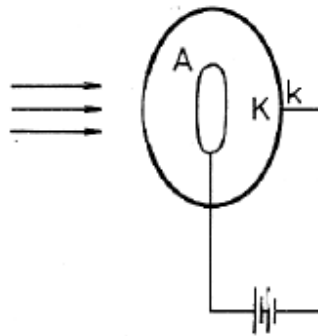
1. Určete energii a hmotnost fotonů krajních vlnových délek spektra viditelného záření (fialová barva má vlnovou délku 390 nm, červená barva 760 nm).
2. Kolik fotonů za sekundu vysílá laser o výkonu 10^{12} W pracující na vlnové délce 1000 nm?
3. Vypočítejte frekvenci a vlnovou délku fotonu s energií 100 MeV. Jaké oblasti elektromagnetického záření tento foton náleží?
4. Výstupní práce sodíku je 2,3 eV. Jaká je mezní vlnová délka světla, která způsobí emisi fotoelektronů ze sodíku? Jaká bude kinetická energie fotoelektronů, jestliže na povrch sodíku dopadne záření o vlnové délce 200 nm?
5. Jaká je frekvence a vlnová délka fotonu rentgenového záření s energií 20,7 keV?
6. Výstupní práce elektronů pro sodík je 2,28 eV. S jakou energií budou vyletovat elektrony z povrchu sodíkové katody, když na ni dopadá ultrafialové záření s vlnovou délkou 300 nm?
7. Jaká vlnová délka přísluší fotonu, jehož energie je 0,5 MeV?
8. Žárovka o příkonu 40 W vysílá zelené světlo s vlnovou délkou 550 nm. Vypočtete energii a velikost hybnosti fotonů tohoto záření a počet fotonů vyslaných žárovkou za 1s. Předpokládejte, že na energii vyzářených fotonů připadá 1% příkonu.
9. Na povrch niklu dopadá monofrekvenční záření o vlnové délce 100 nm. Mezní vlnová délka při fotoelektrickém jevu u niklu je 248 nm. Vypočtete:
 - a) Energii dopadajících fotonů.
 - b) Výstupní práci.
 - c) Kinetickou energii uvolněných elektronů.
10. Sodík má výstupní práci $3,6 \cdot 10^{-19}$ J. Určete mezní frekvenci, mezní vlnovou délku a rychlost, s jakou elektrony opouštějí katodu, dopadá-li na ni světlo frekvence $6 \cdot 10^{14}$ Hz.
11. Nastane vnější fotoelektrický jev, jestliže měděnou elektrodu osvětlíme světlem o vlnové délce 400 nm? Výstupní práce mědi je 4,47 eV.
12. Při osvětlení povrchu katody pokryté cesiem světlem o vlnové délce 500 nm získají elektrony ve fotodiodě maximální rychlost. Výstupní práce elektronu v cesiu je 1,93 eV.
 - a) Vypočtete maximální rychlost, kterou získají elektrony vystupující z kovu.
 - b) Určete mezní vlnovou délku světla, která vyvolá fotoelektrický jev.

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

13. Mezní vlnová délka záření u fotoelektrického jevu v případě rubidia je 540 nm.
- Vypočtete výstupní práci rubidia v elektronvoltech.
 - Jaká část energie fotonu se spotřebuje na výstupní práci při osvětlení rubidia světlem o vlnové délce 400 nm?
 - Vypočtete maximální rychlost elektronů, které se uvolňují z povrchu rubidia při jeho osvětlení světlem o vlnové délce 400 nm.

VYUŽITÍ FOTOELEKTRICKÉHO JEVU:

- Na principu **vnějšího fotoelektrického jevu** pracují **fotonky**, které až do nedávna sloužily jako čidla přeměňující energii světla na energii elektrického proudu (zabezpečovací zařízení). Fotonka je skleněná baňka, která je až na vstupní okénko postříbřená. Na stříbře je nanášena velmi tenká vrstva cesia. Tato vrstva je katodou. Uvnitř baňky je drátěná smyčka, která tvoří anodu. Dnes jsou fotonky nahrazovány polovodičovými součástkami (například rezistory).



Zdroj obr.: <http://ondraha.110mb.com/files/fotoelektro.pdf>



Zdroj obr.: www.kvt-elektronika.cz/elektronky.htm

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- V současné době se v technické praxi využívá především **vnitřní fotoelektrický jev**.
Fotorezistor - je polovodičová součástka, jejíž odpor závisí na osvětlení. Začloníme-li fotorezistor, proud poklesne – jeho odpor vzroste.
 - Měření osvětlení – pomocí expozimetru (např. ve fotografických přístrojích).
 - Automatické ovládání přístrojů – například sušič rukou - má na spodní straně fotorezistor nebo fotodiodu. Když pod něj dáme ruce, dopadá na součástku méně světla, zvýší se její odpor a sepne se elektrický obvod.
 - Automatické počítání výrobků (pečivo, láhve).
 - Automatické otvírání a zavírání dveří (fotobuňka).
 - Zabezpečovací zařízení – zařízení může při přerušení paprsku začít houkat, svítit apod. (Světelná závora, otevírání dveří, poplašné systémy).

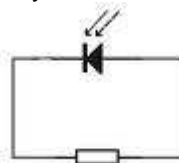


Zdroj obr.: www.tme.eu/.../ramka_4032_CZ_pelny.html

Fotodioda – polovodičová dioda, která je citlivá na osvětlení PN přechodu světlem určité vlnové délky. Pokud dojde v polovodiči k pohlcení fotonu, může dojít k vnitřnímu fotoelektrickému jevu. Fotodioda může pracovat jako fotovoltaický článek nebo jako fotoodpor.

Fotodioda zapojená jako hradlová:

- Spojíme-li konce fotodiody přes rezistor, začne rezistorem protékat proud. Na PN přechodu (je-li stále osvětlen) se generují páry elektron-díra.



- Dopadá-li na fotodiodu světlo, pak dojde v oblasti přechodu k uvolňování valenčních elektronů, tím vzroste počet volných elektronů a děr. Změnami osvětlení fotodiody můžeme měnit velikost proudu v obvodu. Osvětlený přechod PN je vodivý i v závěrném směru a fotodioda se chová jako zdroj stejnosměrného napětí, aniž je připojena k jinému zdroji.
- Fotodioda v tomto zapojení se nazývá **solární (fotovoltaický) článek**. Je to polovodičový prvek, který přeměňuje sluneční energii na elektrickou. V současné době se na jejich výrobu používá především křemík (je nejen hojně zastoupen v zemské kůře, ale je i nejlépe prozkoumaným polovodičem. Účinnost vyráběných solárních článků je asi 10-14 %).
- Použití fotodiody jako zdroje napětí:
 - ◆ Solární kalkulačky.
 - ◆ Napájení malých spotřebičů.
 - ◆ Výroba elektrické energie pro domácnost (solární panely na střeše rodinného domku).
 - ◆ Napájení malých spotřebičů.



evropský
sociální
fond v ČR



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- ◆ Soustavy solárních článků jsou nepostradatelným zdrojem energie v kosmické technice, například v umělých družicích.
- ◆ Sluneční elektrárny.
- ◆ Využívá se v místech, kde není k dispozici zdroj elektrické energie ze sítě.

Fotodioda zapojená jako odporová:

- Pokud fotodioda není osvětlena, má velký odpor. Odpor fotodiody zapojené v závěrném směru se při osvětlení zmenšuje. Velikost elektrického proudu závisí na osvětlení fotodiody. Je součástí například zabezpečovacích zařízení.



Zdroj obr.: www.directindustry.de/prod/perkinelmer-optoel..

- Poměrně malá energie je potřebná k vyvolání fotoelektrického jevu v polovodičích, kdy ke vzniku volných nosičů náboje dochází už po ozáření infračerveným zářením. Toho se využívá u různých zařízeních:
 - Dálková ovládání přístrojů spotřební elektroniky.
 - Dalekohledy umožňující pozorovat za tmy objekty, které vyzařují infračervené záření.
 - Různá zabezpečovací zařízení.

Ukázky využití fotoelektrického jevu

Solární článek:



Zdroj obr.: <http://www.apinsolar.cz/apin-solar>

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Solární panely:



Zdroj obr.: <http://technet.idnes.cz>

Fotovoltaická solární farma pro Kalifornii:



Zdroj obr.: www.solarpanel.cz/.../

Solární automobil:



Zdroj obr.: www.hybrid.cz/novinky/venturi-astrolab-solarn...

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

PRACOVNÍ LIST:

1. Kdo je považován za zakladatele kvantové fyziky?
2. Co znamená, že má elektromagnetické záření kvantovou povahu?
3. Uveďte vztah pro výpočet energie kvanta. Na čem závisí?
4. Vysvětlete, k čemu dochází při fotoelektrickém jevu.
5. Jaký je rozdíl mezi vnitřním a vnějším fotoelektrickým jevem?
6. Jaká je podmínka, aby nastal fotoelektrický jev?
7. Na čem závisí počet emitovaných elektronů při fotoelektrickém jevu?
8. Na čem závisí rychlost emitovaných elektronů? Na čem naopak nezávisí?
9. Uveďte vztah pro výpočet energie fotonu. Na čem závisí?
10. Uveďte vztahy pro hmotnost a hybnost fotonu.
11. Vysvětlete Einsteinovu fotoelektrickou rovnici.
12. Co je to výstupní práce?
13. Uveďte příklady využití fotoelektrického jevu.