

Interakce ionizujícího záření

Při průchodu ionizujícího záření hmotou dochází k interakci mezi částicemi nebo fotony záření a strukturami okolních atomů, tedy jádrem a elektronovým obalem. Samotný průběh interakce závisí na **charakteru záření**, jeho **kinetické energii** a **složení látky** ve které interakce probíhá.

Interakce je hodnocena ze dvou pohledů:

- **z pohledu záření** – změny energie, počtu částic a směru procházejícího záření;
- **z pohledu prostředí** – přesuny subatomárních částic a na ně navazující reakce.

Podle **interakce** rozdělujeme ionizující záření na:

- **přímo ionizující** – elektricky nabitě částice – záření α , β^- a β^+ , protony, jaderné fragmenty;
- **nepřímo ionizující** – elektroneutrální záření – RTG, záření γ , neutronové záření.

Podle **místa interakce** dělíme na:

- interagující s **jádrem**;
- interagující s **atomovým obalem**.

Celkově lze tedy ionizující záření rozdělit do tří skupin:

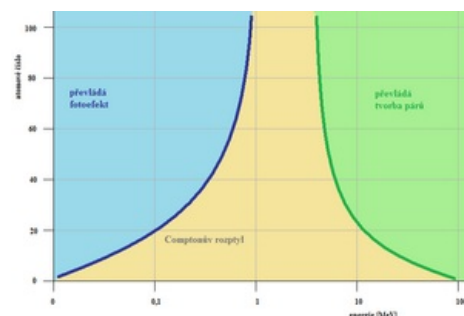
- **elektromagnetické** (fotonové) záření – RTG a γ záření;
- **nabitě částice** – p , α , β ;
- **nenabitě částice** – neutrony.

Interakce elektromagnetického záření

K interakci dochází v jádru a jeho elektromagnetickém poli nebo v obalu atomu. Interakce obou druhů záření (RTG a γ) jsou si velmi podobné, liší se místem vzniku (RTG z obalu, γ z jádra) a frekvencí.

Celkově rozlišujeme šest typů interakcí fotonového záření s hmotou (viz tabulka). Podrobněji budou rozebrány jen tři nejvýznamnější: fotoelektrický jev, Comptonův rozptyl a tvorba elektron-pozitronových párů.

	absorbce	pružná srážka	nepružná srážka
elektronový obal	fotoelektrický jev	Rayleighův rozptyl	Comptonův rozptyl
atomové jádro	fotojaderná interakce		jaderný rezonanční rozptyl
EMG pole	tvorba elektron-pozitronových párů		



Pravděpodobnost jednotlivých typů interakce fotonového záření.

Fotoelektrický jev

Úvod

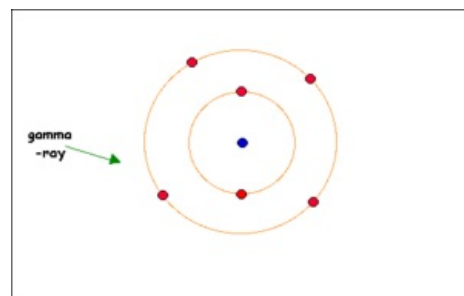
Fotoelektrický jev (fotoefekt) je jednou ze tří možných interakcí γ záření s elektronovým obalem atomu. Z těchto tří interakcí má **foton** zpravidla nejslabší energii. Je to fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány (vyzařovány, emitovány) z látky (nejčastěji z kovu) v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Elektrony emitované z jaderného obalu jsou pak označovány jako **fotoelektrony**. Jejich uvolňování se označuje jako **fotoelektrická emise (fotoemise)**.

Historie

Za objevitele fotoelektrického jevu je považován **Heinrich Hertz**, který si při svých pokusech (roku 1887), jejichž cílem bylo experimentální prokázání existence Maxwellem předpovězených elektromagnetických vln, všiml, že ozáření jiskřiště ultrafialovým zářením usnadňuje přeskok jiskry – tj. přenos elektrického náboje mezi elektrodami.

Roku 1899 **Joseph John Thomson** udělal rozhodující krok k objasnění podstaty jevu. Thomson experimentálně identifikoval v nositelích záporného náboje unikajících z ozařovaného kovového vzorku elektrony.

Vlastní podstatu fotoelektrického jevu popsal v roce 1905 **Albert Einstein** (Nobelovu cenu za tento objev získal v roce 1921).



Fotoelektrický jev

Popis jevu

Fotoelektrický jev nastává, když se **celá energie kvanta záření γ** předává některému **elektronu** z elektronového obalu absorbujícího materiálu nebo případně volnému elektronu (např. v kovech). Část energie se spotřebuje na **uvolnění elektronu** (vykonáním tzv. **výstupní práce W_v**) a část se přemění na **kinetickou energii E_k** vzniklého **fotoelektronu**. Foton záření γ tímto zaniká a jeho energii přebírá fotoelektron, který ionizuje své okolí.

Einsteinova rovnice pro fotoefekt vyjadřuje **zákon zachování energie**.

$$hf = W_v + E_k \quad (h \text{ je Planckova konstanta})$$

Atom, kterému byl vyražen elektron je v excitovaném stavu a přechází do základního stavu emisí elektromagnetického záření o frekvenci odpovídající rozdílu energie excitovaného a základního stavu.

(Volné místo po elektronu je zaplněné jiným elektronem, který sem přeskočil z jiné slupky atomového obalu. Při tomto přeskočení se vyzáří energie ve formě charakteristického záření. Místo charakteristického záření může dojít k alternativnímu jevu - energie se předá některému elektronu na vyšší slupce, který se pak uvolní a vyzáří jako tzv. Augerův elektron.)

Foton interaguje s elektronem na slupkách K, L a M. Tedy s elektrony, které leží blízko jádru atomu. Nejčastěji probíhá na slupce K (80% pravděpodobnost).

Fotoefekt je pravděpodobnější v materiálech s vyšším protonovým číslem absorpčního materiálu (kost, kontrastní látka).

Podle představ *klasické fyziky* by elektronům měla být předána kinetická energie dopadajícího elektromagnetického vlnění. Energie elektromagnetických vln souvisí s intenzitou záření, tzn. energie vyzařovaných elektronů by měla záviset na intenzitě dopadajícího záření. Experimenty však ukázaly, že **kinetická energie vyzařovaných elektronů je závislá na frekvenci** a nikoliv na intenzitě dopadajícího záření.

Pro každý kov existuje určitá **mezní frekvence f_0** taková, že elektrony se uvolňují pouze při frekvenci f_0 a frekvencích vyšších. Na frekvenci použitého elektromagnetického záření závisí také energie emitovaných elektronů. Pokud je frekvence f dopadajícího záření vyšší než mezní frekvence f_0 , mají fotoelektrony energii v rozmezí od nuly do určité maximální hodnoty E_{max} .

$$E_{max} = h(f - f_0) = hf - hf_0$$

Závislost pozorovaného jevu na frekvenci záření nebylo možné vysvětlit klasicky.

Druhy fotoefektu

Podle způsobu vzniku elektronů vlivem dopadajícího elektromagnetického záření můžeme rozlišit:

1. **vnější fotoelektrický jev** – jev probíhá na povrchu látky, elektrony se uvolňují do okolí
2. **vnitřní fotoelektrický jev** – uvolněné elektrony zůstávají v ní jako vodivostní elektrony (např. polovodiče, v nichž jsou tímto způsobem uvolňovány elektrony zejména z přechodu PN)

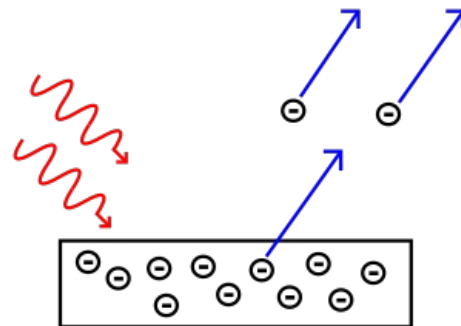
Inverzní fotoelektrický jev

Inverzní (obrácený) fotoelektrický jev je jev, kdy na látku dopadají elektrony, které způsobují **vyzařování fotonů**.

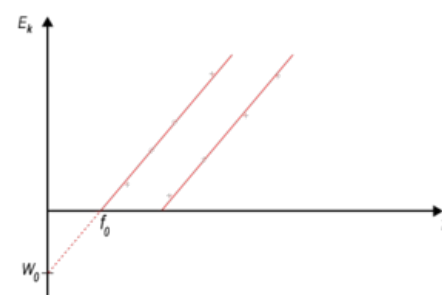
Vysvětlení jevu

V roce 1905 **Albert Einstein** vyšel z **Planckovy kvantové hypotézy** a z představy, že elektromagnetická vlna o frekvenci f a vlnové délce λ se chová jako **soubor částic (světelných kvant)**, z nichž každá má svou energii a hybnost. Tyto částice mají zvláštní vlastnosti, především se stále pohybují rychlostí světla a nelze je žádným způsobem zastavit, zpomalit ani urychlit. Podle teorie relativity musí mít nulovou klidovou hmotnost. Tyto částice byly v roce 1926 nazvány **fotony**. Velikost kvanta energie závisí na frekvenci (vlnové délce) elektromagnetického záření, přičemž platí: **$E = hf$**

Světlo při dopadu na povrch látky **předává energii** povrchovým **elektronům** zkoumané látky. K uvolnění elektronu z vazby v atomu je potřeba tzv. ionizační energie. Tato nutná energie k uvolnění elektronu může vzniknout, jestliže je **vlnová délka světla dostatečně malá**. V tom případě může frekvence a energie dosáhnout dostatečně vysoké hodnoty. Předáním takové energie elektronům je možné překonat tzv. **fotoelektrickou bariéru** k uskutečnění



Dopad na povrch látky



Závislost kinetické energie elektronu na frekvenci dopadajícího světla

výstupní práce. Minimální frekvence, při níž dopadající fotony předávají elektronům výstupní energii se označuje jako **prahová frekvence**. Jestliže je energie předaná elektronu větší než energie potřebná k jeho uvolnění, pak fotoelektronu zůstane část energie jako **kinetická energie**.

Rovnice fotoelektrického jevu: $hf = hf_0 + E_{max}$ (hf je energie dopadajícího fotonu, hf_0 je výstupní práce – minimální energie potřebná k uvolnění elektronu, E_{max} je maximální možná energie uvolněného elektronu) Z této rovnice vyplývá, že **energie uvolněného elektronu závisí pouze na frekvenci dopadajícího záření**, a nikoliv na intenzitě tohoto záření.

Využití

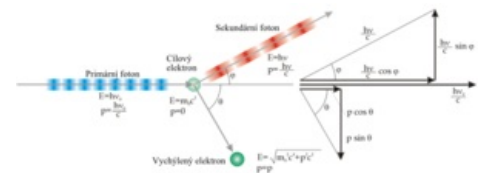
Fotoelektrický jev hraje významnou úlohu na poli biofyziky. Příkladem je uplatnění těchto jevů při radiačních vyšetřeních pacienta. Rentgenové snímky vznikají na principu obráceného fotoelektrického jevu, kdy se povrch ostřeluje elektrony a uvolňují se paprsky X. Různé tkáně mají jinou absorpci, proto můžeme na snímcích rozeznat struktury. Elektron zcela pohltí foton a Rtg foton zaniká. Absorbce fotoelektrického jevu je na rozdíl od Comptonova rozptylu, který probíhá také, žádoucí. Při Comptonově jevu zůstávají volné elektrony a foton nezaniká, dochází tedy ke srážkám těles a mění se jejich směr a vlnová délka.

Comptonův rozptyl

Comptonův rozptyl popisuje srážku fotonu s např. elektronem za následné změny vlnové délky vzniklého fotonu.

Historie

V roce 1905 zavedl Albert Einstein myšlenku korpuskulárně vlnového charakteru částic pro vysvětlení fotoelektrického jevu. Vzhledem k tomu, že podle ní bylo možné foton pokládat zároveň za vlnění i částici, mělo by docházet mezi ním a například elektronem k interakcím, které by svým charakterem odpovídaly pružným srážkám, při nichž dochází v rámci izolované soustavy k zachování celkové hybnosti a energie.



Comptonův rozptyl

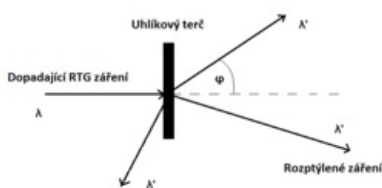
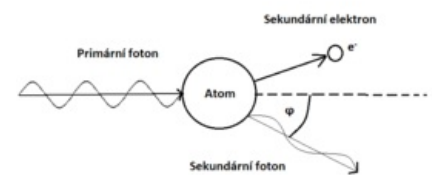


Schéma Comptonova experimentu

Avšak dle představ klasické fyziky by po srážce fotonu s elektronem měl být elektron rozkmitán frekvencí dopadajícího fotonu a následně vyslat fotony opět se stejnou frekvencí.

Roku 1922 se rozhodl tuto teorii prověřit Arthur Holly Compton. Vytvořil experiment s rozptylem rentgenového záření na volných elektronech. Bylo třeba využít dopadu záření na materiály s velmi slabě

vázanými elektrony. Rentgenové záření ($\lambda = 0,07 \text{ nm}$) dopadalo na uhlíkový terč. Compton byl schopen zachytit zdvojené spektrální čáry: jedna odpovídala původní vlnové délce (rozptyl na pevně vázaných elektronech), druhá měla vlnovou délku vyšší (rozptyl na volných elektronech). Byla tak experimentálně potvrzena správnost Einsteinovy teorie a Compton roku 1927 získal Nobelovu cenu za fyziku.



Zjednodušené schéma Comptonova jevu

Comptonův posun

Existence druhé vlnové délky byla vyjádřena rovnicí pro Comptonův posun:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \varphi).$$

λ ... vlnová délka fotonu před srážkou

λ' ... vlnová délka fotonu po srážce

φ ... úhel rozptylu

$h/m_0 c$... Comptonova vlnová délka (pro elektron = $2,4262 \cdot 10^{-12} \text{ m}$)

Dodatky k teorii

Teoreticky ke Comptonovu jevu dochází při každé srážce fotonu s elektronem, je-li však hmotnost fotonu velmi malá v porovnání s hmotností elektronu, je tento posun minimální. Vzhledem k tomu lze Comptonův jev pozorovat pouze za použití záření s vysokou hmotností fotonů, např. záření rentgenové nebo gama.

Sekundární foton se vychyluje v intervalu $0-180^\circ$ a na odchylce je závislá jeho energie. Pokud dochází ke zpětnému rozptylu (tj. 180° úhel), má foton nejmenší energii. Sekundární foton může být schopen znovu opakovat jev, pokud má dostatečnou energii, nebo zaniká fotoelektrickým jevem.

Využití

Comptonova jevu se využívá v mnoha vědních oborech. Jako příklad můžeme uvést zejména radioterapii (cílené poškození DNA např. rakovinných buněk), spektroskopii (detekce ionizujícího záření) a astronomii (Comptonova gama observatoř).

Elektron-pozitronové páry

Ke tvorbě elektron-pozitronových párů dochází při interakci vysokoenergetického γ záření s elektronovým obalem atomu. Je to energeticky nejvyšší možnost ze tří interakcí γ záření s obalem.

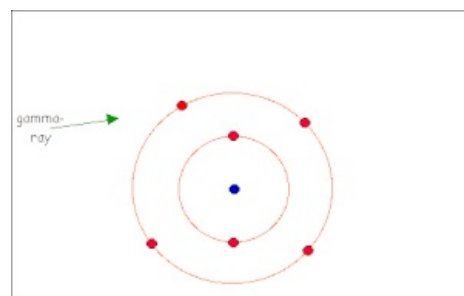
Při energiích fotonů teoreticky nad 1,02 MeV, prakticky však mnohem vyšších, dochází k **přeměně fotonu** blízko atomového jádra na **pozitron** a **elektron**. Přitom je nutné, aby se tak stalo v blízkosti atomového jádra nebo jiné částice, která může převzít část hybnosti fotonu (jelikož hybnost pozitronu a elektronu je nižší). Samovolná přeměna fotonu na elektron a pozitron není možná při jeho pohybu ve vakuu z důvodu zákona zachování hybnosti (součet hybností vzniklého elektronu a pozitronu je menší než hybnost dodaná fotonem). Samotná proměna probíhá v důsledku elektrického pole atomového jádra (čím větší náboj jádro má, tím je větší pravděpodobnost proměny). Kinetická energie vytvořeného elektron-pozitronového páru je rozdělena mezi obě částice náhodně.

Pomocí následující rovnice lze vyjádřit energetickou bilanci daného děje:

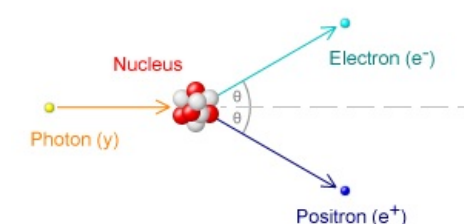
$$h\nu = E_e + E_p + 2m_e c^2$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že energie fotonu musí být větší než energie, která představuje součet dvou klidových hmotností elektronu (součet klidové energie elektronu a pozitronu jsou stále stejné).

Vzniklé částice ztrácejí svou energii při interakcích s okolním prostředím, tj. ionizací nebo excitací. Pozitron se však většinou spojuje s elektronem za procesu **anihilace** a vyzáří tak dvě kvanta elektromagnetického záření o energii 511 keV. Tato kvanta se pohybují opačným směrem.



Demonstrace Comptonova jevu při použití gama záření



Tvorba elektron-pozitronového páru

Interakce nabitých částic

Těžší částice, nesoucí náboj, interagují s hmotou nepružnými nárazy. Tím předávají okolí svou kinetickou energii. Tento děj nazýváme **srážkové ztráty energie**. Náboj se nemění.

Interakce může proběhnout také formou tzv. **radiační ztráty**, kdy spolu interagují pouze elektromagnetická pole částic. K tomu dochází často u lehkých částic, elektronů.

Částice záření nemusí předat celou svou energii najednou. Energie se v cílové struktuře projeví jako **excitace** buď jádra nebo elektronů v obalu. Vždy dochází ke ztrátám energie v podobě tepla. Pokud je předaná energie dostatečně velká, může dojít k odtržení elektronu, který se pak chová jako β^- částice, jeho kinetická energie je rovna energii předané nárazem. Toto takzvané **sekundární elektronové záření** je někdy označováno jako **záření δ** .

Těžší částice nesoucí větší náboj interagují častěji, svou energii předají okolí na krátké vzdálenosti a pak zanikají.

 *Podrobnější informace naleznete na stránce LET.*

Interakce nenabitých částic

Neutrony, jako nejvýznamnější zástupci skupiny nenabitých částic, interagují s okolní hmotou jen na základě silných a slabých jaderných sil.

Interakce může probíhat formou **pružného a nepružného rozptylu**, **emisí nabitých částic**, **radiačního (neutronového) záchytu**, nebo dojde k **rozštěpení jádra**.

Pružný rozptyl

Nejpravděpodobnějším typem interakce je **pružný rozptyl**. Dochází k němu na velmi malých jádrech, která se svou velikostí blíží neutronu, jako například vodík. Energie, předaná neutronem, se **celá** přemění na kinetickou energii zasažené částice. Atom se neexcituje. Odražený neutron pokračuje dále se zbytkem energie. Tomuto ději se říká **moderace neutronové rychlosti**. Děj pokračuje dokud se neutron nezpomalí natolik, že může být absorbován jádrem. Moderace se využívá v ^{235}U uranových jaderných reaktorech, kdy atomy vodíku v molekule vody zpomalují rychlé neutrony, vzniklé štěpením.

 *Podrobnější informace naleznete na stránce Jaderný reaktor.*

Nepružný rozptyl

K **nepružnému rozptylu** dochází na jádrech těžkých prvků. Neutron, obdobně jako při pružném rozptylu, předá část své kinetické energie a jako zpomalený pokračuje dál. Zasažené jádro se ale excituje, část předané energie je vyzářena v podobě γ fotonu, zbytek se změní v kinetickou energii jádra.

Emise nabité částice

Neutron má tolik energie, že při zásahu jádra vyrazí jeden nebo i několik jaderných elementů. Kinetická energie neutronu je tedy spotřebována na vyražení protonu, α částice nebo deuteronu (jádro deuteria, jeden proton a jeden neutron), zbytek předané energie se změní v kinetickou energii vyražené částice. Tím může dojít ke vzniku nestabilního nuklidu a jeho dalšímu rozpadu.

Radiační záchyt

Neutron je zachycen jádrem, jeho kinetická energie je vyzářena v podobě γ fotonu.

Jaderné štěpení

Při vhodné rychlosti neutronu, v poměru k cílovému atomovému jádru, může dojít k rozštěpení jádra za vzniku **štěpných produktů**, kterými jsou většinou radioaktivní izotopy. Při štěpení se z jádra uvolní tolik energie, že vzniklé neutrony mají i **vyšší energii**, než ten, který způsobil štěpení. Obvykle je emitován foton γ záření. Pokud se uvolní víc než jeden neutron schopný štěpení, dochází k tzv. **lavinovému efektu** s exponenciálním nárůstem interakcí. Této **řetězové štěpné reakce** se využívá u jaderných zbraní. V **moderované** podobě (= ne všechny vzniklé neutrony štěpí další jádra) je základem jaderného reaktoru.

Odkazy

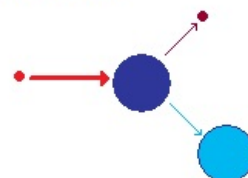
Související články

- Ionizující záření

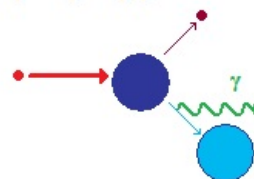
Použitá literatura

- PODZIMEK, František. *Biofyzika ionizujícího záření*. 1. vydání. Hradec Králové : Vojenská lékařská akademie Jana Evangelisty Purkyně, 1990. 119 s. ISBN 80-85109-24-7.
- BENEŠ, Jiří, Pravoslav STRÁNSKÝ a František VÍTEK. *Základy lékařské biofyziky*. 2. vydání. Praha : Karolinum, 2007. 201 s. ISBN 978-80-246-1386-4.
- NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA, et al. *Medicínská biofyzika*. 1. vydání. Praha : Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.

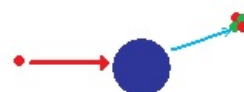
pružný rozptyl



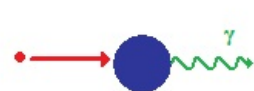
nepružný rozptyl



emise částice



radiační záchyt



štěpení jádra

