B8-Základy kvantové mechaniky, princip laseru, pásová teorie pevných látek, úvod do jaderné fyziky. (Fyzika

2)

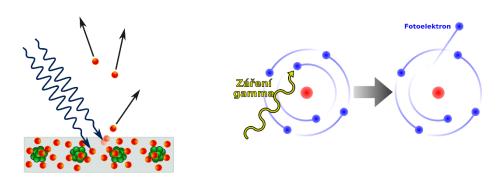
Základy kvantové mechaniky

Absolutně černé těleso = AČT

- Ideální těleso pohlcující veškeré dopadající záření (všech vlnových délek) na jeho povrch.
- Zároveň je ideálním zářičem tj. vyzařuje největší množství zářivé energie.
- Záření AČT experimenty souhlasí s teoretickým popisem

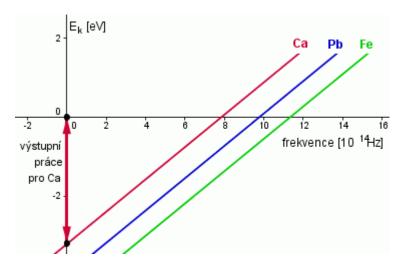
Fotoelektrický jev (= fotoefekt)

- Za objevitele považován Heinrich Hertz (1887)
 - o experimentální prokázání existence Maxwellem předpovězených elektromagnetických vln
- Joseph John Thomson (1899)
 - o 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)
- Pomocí klasické fyziky nesrovnalosti → kvantová fyzika
- 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 = fotoelektrony jejich uvolňování se označuje jako fotoelektrická emise (fotoemise)



- Druhy fotoefektu
 - o vnější fotoelektrický jev jev probíhá na povrchu látky, elektrony se uvolňují do okolí
 - o vnitřní fotoelektrický jev uvolněné elektrony zůstávají v ní jako vodivostní elektrony (např. polovodiče, v nichž jsou tímto způsobem uvolňovány elektrony zejména z přechodu PN)
- Vysvětlení:
 - Ke srážce dochází na úrovni jednoho fotonu a jednoho elektronu
 - S rostoucí frekvencí fotonu roste jejich energie a tím i energie uvolněných elektronů (nemá-li foton dostatečnou energii, nemůže dojít k fotoefektu)
 - Vyšší počet dopadajících fotonů → více srážek a více uvolněných elektronů

Grafické znázornění závislosti kinetické energie elektronů na frekvenci



- $\bullet \quad E_{k_{\max}} = \, h\!\!\left(\vartheta \, \, \vartheta_m\right) \, \leftarrow \text{lineární závislost na kmitočtu} \, \vartheta \, nebo \, f$
- Odtud můžeme určit výstupní práci a Planckovu konstantu
- Planckova konstanta: h = 6,6·10⁻³⁴ [J·s]
- Vysvětlil to Einstein (1905)
 - Pokud $h\vartheta>h\vartheta_{_{m}}$ ightarrowdojde k fotoefektu bez ohledu na intenzitu
 - Einsteinova rovnice pro fotoefekt

$$h\vartheta = A_v + E_k$$

$$A_v = h\vartheta_m = v \acute{y} stupn \acute{u} pr\acute{a} ce$$

- Hybnost p pro daný kmitočet θ

$$p = \frac{h\vartheta}{c}$$

$$E = p c = h \vartheta$$

$$\vartheta = \frac{c}{\lambda} \to p = \frac{h}{\lambda} \ nebo \ p = \frac{2\pi h\vartheta}{2\pi c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \hbar k = p$$

k = vlnové číslo

 \hbar = redukovaná Planckova konstanta $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 10^{-34} J \cdot s$

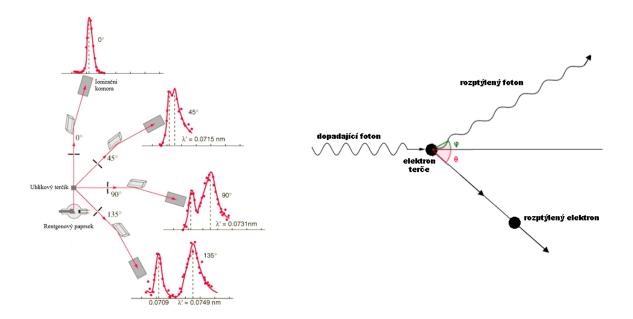
• duální char. světla: vlnění / částice

Comptonův jev (= Comptonův rozptyl)

• jev, při kterém se při interakci elektromagnetického záření s atomy pevné látky mění vlnová délka záření v důsledku předání části své energie atomům nebo jejich elektronům

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_c c} (1 - \cos\Theta),$$

kde $\Delta\lambda$ je Comptonův posun, $\frac{h}{m_c c}$ je Comptonova vlnová délka, c rychlost světa a Θ uhel odrazu záření.



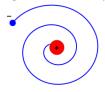
Produkce elektronového pozitronového páru

- podstata:
 - k tvorbě páru elektor-pozitron dochází při interakci vysokého energetického γ záření
 s elektronovým obalme atomu
 - energie fotonu > 1,02 MeV

Foton v tíhovém poli zemi

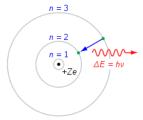
Rutherfordův planetární model atomu

- elektrony popisuje na příkladu sluneční soustavy ("planetární model")
- Rutherfordův planetární model předpokládá, že přitažlivá (Coulombova) síla mezi jádrem a elektronem kompenzuje odstředivou sílu elektronu
- Problém: stabilita atomu (podle modelu je vodík nestabilní, experimentálně je stabilní)
- Podle tohoto modelu by elektron ztrácel energii a následně spadnout do jádra (to se však nestane)



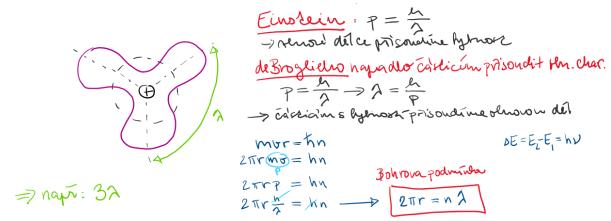
Bohrův model atomu

- 1913 Bohr navrhl jiný model a vyřešil problém Rotherfordova planetárního modelu
- Bohrovy postuláty
 - 1. Elektrony se pohybují po stabilních drahách (hladinách), na nichž nevyzařují žádnou energii.
 - 2. Pouze při přechodu z jedné hladiny na druhou se vyzáří/pohltí právě jeden foton.
 - 3. Jsou povoleny trajektorie, jejichž, moment hybnosti L je L = $n\hbar$, kde n = 1, 2, 3, ... a \hbar je redukovaná Planck. konstanta.

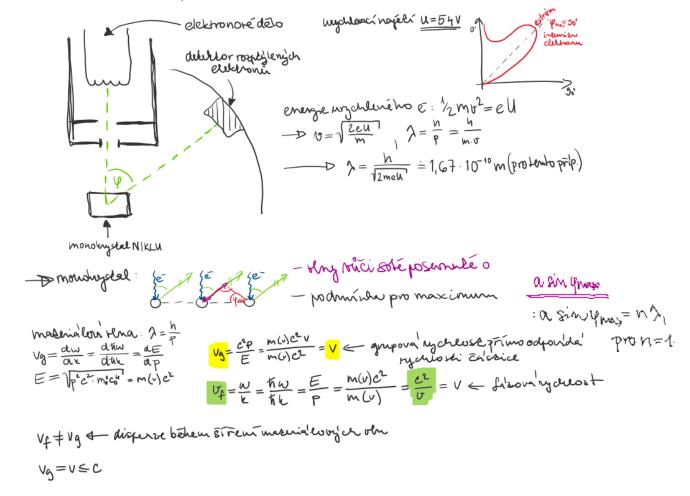


Materiálové vlny = de Broglieovy vlny

• Přiřazuje částicím látky nejen vlastnosti částic ale i vlnové



Davissonův-Germerův experiment



Schrödingerova rovnice

nestacionární (časová):

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U\psi = j\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t},$$

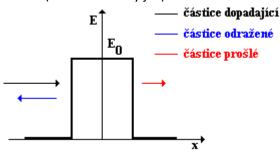
stacionární (bezčasová):

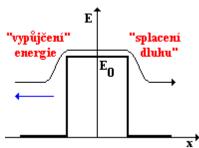
$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi + U\psi = E\psi,$$

kde ħ je redukovaná Planckova konstanta, m je hmotnost částice, $\Delta = \nabla \cdot \nabla = \nabla^2 = div \ grad$ je Laplaceův operátor, $\psi(r,t)$ je vlnová rovnice, U je potenciální energie, E je disk. energie, t je čas.

Tunelový jev

- kvantově mechanický jev, při němž subatomická částice prochází potenciálovou bariérou s vyšší energií, než má sama částice.
- Částice tak porušuje principy klasické fyziky, která neumožňuje průchod takové částice skrz barieru (pokud je energie částice menší než výška bariéry, pak by se podle klasické mechaniky měla částice od takové bariéry odrazit zpět)
- Kvantová mechanika však částici umožňuje, aby s určitou pravděpodobností prošla skrz potenciálovou bariéru (odtud tunelový jev)





Postuláty kvantové mechaniky

1. Postulát o vlnové funkci

Veškeré informace o stavu částice v kvantové mechanice jsou popsány komplexní vlnovou funkcí $\psi(x, y, z, t) = \psi(\vec{r}, t)$ (stavová fce z Hilbertova prostoru) ve tvaru

2. Postulát o operátorech

- Každé měřitelné veličině je přiřazen lineární hermitovký operátor
 - Operátor = metematický předpis, který přiřazuje jedné funkci jinou

operátor:
$$\hat{O}_f = g$$

$$nap\check{r}$$
:: $\sqrt{e} = g$, $f' = g$, $\nabla^2 = g$, atd.

Lineární operator (
$$\rightarrow$$
 lineární zobrazení)
$$\hat{O}(a_1f_1+a_2f_2)=a_1\hat{O}f_1+a_2\hat{O}f_2$$

Komutátor (aby Šly 2 veličiny měřit současně, musí spolu komutovat)

$$\left[\hat{O}_{1}, \hat{O}_{2} \right] = \hat{O}_{1} \hat{O}_{2} - \hat{O}_{1} \hat{O}_{2} = 0 \rightarrow komutuji \neq 0 \rightarrow nekomutuji$$

Hermitovký operátor

$$\langle \hat{A}g \rangle = \langle g \rangle$$
, $\hat{A} = hermitovský operátor$

- - f je vlastní fce operátoru, λ je vlatsní číslo (vždy reálné)
 - více vlastních fcí operátoru je k sobě vždy ortogonální

3. Postulát o kvantování

Pokud měříme fyz. veličinu A, jediné, co na ní můžeme naměřit jsou vlastní čísla odpovídající operátoru A.

4. Postulát o střední hodnotě

Střední hodnota $\langle A \rangle_{_{\mathrm{II}}}$ veličiny A (průměrná hodnota mnoha měření A) ve stavu ψ je rovna skalárnímu součinu (ψ, A_{η_i}) .

5. Postulát o redukci vlnové funkce

- Změřením fyzikální veličiny A, které je přiřazen operátor \hat{A} , s výsledkem a, (kde a,
- je vlastní Číslo \hat{A}), převedeme systém do stavu, který je popsán vlastní
- funkcí (vlastním vektorem) naměřené hodnoty a_i.

6. Postulát o časové Schrödingerově rovnici

Vývoj stavu v čase je popsán tzv. Schrödingerovou rovnicí

$$\hat{H} \psi = j\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

kde \hat{H} je Hamiltonův operátor. Pro systémy s klasickou analogii je \hat{H} operátor přiřazený k Hamiltonově funkci klasické mechaniky. Jako počáteční podmínku je třeba zadat stav v čase t = 0, tj. $\psi(r,t=0)$

7. Postulát o nerozlišitelnosti částic

 Systém nerozlišitelných částic lze popsat pouze stavovým vektorem: symetrickým v případě bosonů, popř. antisymetrickým v případě fermionů.

Princip laseru

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

- zesílení světla stimulovanou emisí záření
- zdroj úzkého svazku elektromagnetického záření
- **Monochromatické** = záření obsahující pouze fotony se stejnou energií, nebo z vlnového pohledu obsahující pouze vlny o stejné vlnové délce (záření jedné barvy)
- **Koherentní** = záření o stejné frekvenci, stejného směru kmitání a o stejné fázi nebo fázovém rozdílu (liší se pouze v amplitudě)
- Nízko rozbíhavé = laserový svazek je úzký i na velké vzdálenosti

Princip

- Spontánní emise (= radioaktivita)
 - Stochastický proces, nestabilní jádro ztrácí energii radiací
 - (Při deexcitaci systému dojde k uvolnění fotonu, jeho energie je dána energetickým rozdílem hladin, ale další vlastnosti, jako jsou směr šíření, fáze a polarizace nabývají náhodných hodnot.

• Stimulovaná emise

- Energie fotonu naruší elektron v metastabilním stavu, elektron emituje další foton, přejde do nižší energetické hladiny a oba fotony pokračují dále.
- (K deexcitaci systému dojde vlivem interakce s vnějším fotonem. Aby k tomu mohlo dojít musí být energie vnějšího fotonu rovna rovna rozdílu energií excitované a základní hladiny. Rozdíl oproti spontánní emisi je v tom, že všechny charakteristiky emitovaného fotonu odpovídají stimulujícímu fotonu. Tak dochází k zesílení stimulujícího záření.)
- Laserové světlo vzniká stimulovanou emisí, která ke svému vzniku vyžaduje vnější podnět. Kdyby se zdroj skládal jen z jediného atomu, byl by vznik stimulované emise velmi nepravděpodobný. Ve zdroji je však světlo vyzařováno obrovským množstvím atomů, a to stimulovanou emisi usnadňuje. Nejprve je nutné, aby se co nejvíc atomů dostalo do vybuzeného stavu a pak v něm setrvalo dostatečně dlouhou dobu. Látky, ve kterých k tomuto jevu může dojít, se nazývají aktivní prostředí. Energetickým hladinám, na kterých setrvávají atomy delší dobu, se říká metastabilní hladiny. U prvního zkonstruovaného laseru byl aktivním prostředím krystal rubínu a buzení zajišťovala výbojka, podobná jako se používá u fotografických blesků. V současné době se jako aktivní prostředí využívá nepřeberného množství látek všech skupenství.
- Základem laseru je aktivní prostředí (krystal, keramika, kapalina, plyn nebo jiné látky)
 - Toto aktivní prostředí je tvořeno atomy, které se za normálních okolností, tzn. za stavu termodynamické rovnováhy, nachází na základní energetické hladině E₀. Zde pak může dojít k absorpci záření, které je v našem případě reprezentováno tokem fotonů o energii E

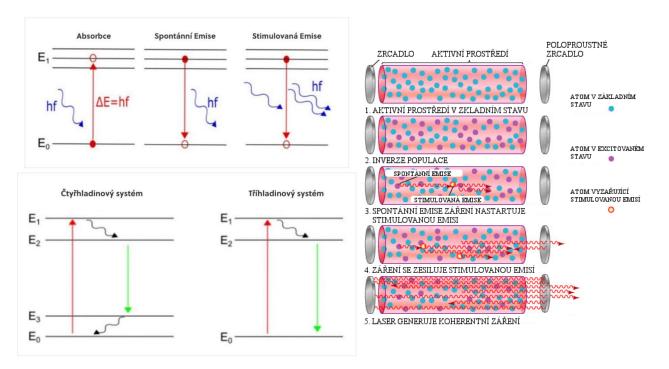
$$E = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

kde h je Planckova konstanta (h = $6,626 \cdot 10^{-34} \, \text{J·s}$), f je frekvence a λ vlnová délka.

 Během absorpce dochází k předání energie fotonu ve prospěch elektronu, který se díky tomu dostává na vyšší energetickou hladinu E₁, tedy do tzv. excitovaného stavu. Z hlediska zákonu zachování energie pak platí:

$$E_1 = E_0 + \Delta E = E_0 + hf$$

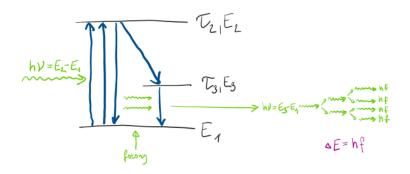
- Opačným jevem k absorpci je emise záření, při kterém se elektron dostává zpět na základní hladinu E0 a
 dochází k vyzáření nového fotonu o takové energii, aby došlo k zachování energie. Tuto emisi lze rozdělit
 na dva případy
 - Prvním z nich je tzv. spontánní emise, při níž dochází k sestupu elektronu samovolně
 - → Vzniklý foton má pak náhodný směr a fázi
 - Druhým případem je tzv. stimulované emise, při které sestup elektronu způsobí další foton nacházející se v jeho okolí.
 - → Vzniklý foton má pak směr a fázi shodnou s fotonem, který tento sestup způsobil



Jednoduché shrnutí (ze sešitu FY2)

Princip funkce laseru

- Záření emitující monochromatické koherentní záření
- Plyn laseru absorbuje radiaci. → Jeho elektrony se přesunou do vyšší hladiny energie. → Odtud padají
 do metastabilního stavu. →Když jich je tam většina, nastává populační inverze. → Kaskádově pak
 probíhá stimulovaná emise. (viz obrázek)

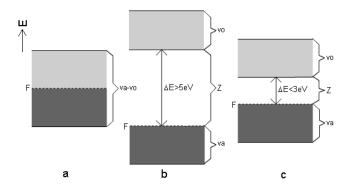


Pásová teorie pevných látek

Slouží k popisu vazby v pevných látkách.

Máme 2 atomy sodíku a přibližujeme je

- 2 možnosti podle spinu:
 - ↑↓ opačný spin ⇒ symetrická funkce ⇒ silněji vázané, vyšší energie
 - ↑↑ stejný spin ⇒ antisymetrická funkce ⇒ slaběji vázané, nižší energie



Hypotetický fázový diagram (při teplotě 0 K): a) kovu, b) izolantu, c) polovodiče.

Vybarvené oblasti pásu označují oblast plně hladin obsazených elektrony. Fermiho hladina je označena F, valenční pás – va, vodivostní pás – vo, valenčně-vodivostní pás – va-vo a zakázaný pás Z.

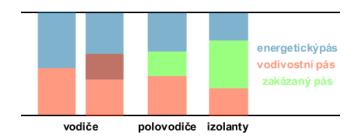
• Obr. a (KOV)

- Jestliže Fermiho hladina při teplotě 0 K leží uvnitř dovoleného pásu neboli, pokud postačuje počet elektronů přítomných v soustavě atomů jen k částečnému zaplnění dovoleného pásu, vytváří se při velmi nízkých teplotách takové uspořádání elektronů, jaké je zachyceno na obr. a
- elementární kovy, slitiny, intermetalické sloučeniny a další tuhé látky, které mají výbornou elektrickou vodivost
- Částečně zaplněný pás a relativní snížení energie valenčních elektronů, které se v pásu vyskytují je příčinou vzniku vysoce delokalizované kovové vazby, poutající celý soubor atomů v poměrně velmi pevný celek
- Pás takto obsazený elektrony bývá označován jako pás vodivostně-valenční

Obr. b (IZOLANT)

- Jestliže Fermiho hladina při teplotě 0 K leží na horním okraji dovoleného pásu, pás je pak elektrony právě zcela naplněn (obr. 3b)
- V takovémto pásu nejsou elektrony volně pohyblivé, mřížka není elektricky vodivá
- Snížení energie elektronů umístěných do pásu je příčinou vazebné soudržnosti atomů
- Takto obsazený pás se nazývá valenční
- Pokud je energetický rozdíl mezi horním okrajem valenčního pásu a dolním okrajem nejbližšího energeticky vyššího prázdného dovoleného pásu větší než 5 eV, pak ani značný tepelný pohyb v mřížce nedokáže excitovat elektrony z valenčního do prázdného pásu. Materiál s takto uspořádanými pásy je izolant a to i za vysokých teplot. I v tomto případě se neobsazený dovolený pás nazývá pás vodivostní a energetický interval mezi jeho dolním okrajem a Fermiho hladinou se označuje jako šířka zakázaného pásu.

- Obr. c (POLOVODIČ)
 - Jestliže Fermiho hladina splývá při teplotě 0 K s horním okrajem valenčního pásu, avšak vodivostní
 pás je vzdálen méně než 3 eV, dochází vlivem tepelného pohybu, příp. jiné excitace k přechodu elektronů z valenčního pásu do pásu vodivostního
 - Takovéto materiály se nazývají polovodiče



Z pásové teorie pevných látek vyplývá, že elektrony v pevných látkách se mohou nacházet jen v dovolených pásech energií, jež jsou odděleny zakázanými pásy. Je-li plně obsazený pás oddělen širokým zakázaným pásem od nejbližšího dovoleného pásu, nemůže v takové látce docházet k přenosu elektrického náboje, látka je izolátorem. U kovů jsou dovolené (tzv. vodivostní) pásy velmi blízko u sebe, popřípadě nejsou zcela zaplněny, takže je možný snadný přechod elektronů, což vysvětluje vysokou elektrickou vodivost kovů. U polovodičů jsou zaplněný a prázdný pás blízko u sebe, takže je možný přechod elektronů do prázdného pásu (elektronová a děrová vodivost polovodičů). Polohu a obsazení pásů ovlivňují kromě teploty též různé poruchy a nečistoty (viz též příměsové polovodiče). Pásová teorie pevných látek kromě elektrické vodivosti vysvětluje další vlastnosti, například optickou absorpci, luminiscenci, fotovodivost.

Úvod do jaderné fyziky

- Atomové jádro
 - Soustava částic, z nichž nejzákladnější jsou protony a neutrony.



$${}_{1}^{1}H$$
 ${}_{2}^{4}He$
 ${}_{238}^{238}U$

- Z ... protonové číslo
- N ... neutronové číslo (udává počet neutronů v jádře)
- A=Z+N ... nukleonové číslo (udává počet všech nukleonů v jádře)
- Nuklid = látka složená z atomů totožného prvku, které mají stejná nukleonová čísla (se stejným Z i A)
- Prvek = látka složená z atomů se stejným protonovým číslem Z, nukleonové číslo se může lišit,
 všechny tyto atomy mají stejné chemické vlastnosti
- Izotopy = nuklidy, které mají stejné protonové ale rozdílné neutronové číslo
- Jaderné síly
 - o (V jádře jsou stejně nabité protony ⇒ odpuzují se)
 - o Jaderné síly jsou přitažlivé (drží jádro pohromadě)
 - o Nezávisí na druhu nukleonu (jsou stejné mezi dvěma protony, dvěma neutrony i mezi protonem a neutronem)
 - o Mají velmi krátký dosah (řádově 10-15 m)

Empiricky zjištěný vztah pro poloměr

$$R_{j\acute{a}dra} \doteq 1,3.10^{-15}.\sqrt[3]{A}$$

kde A je nukleonové číslo

$$R_{atmou} = 10^{-10} m$$

Vazebná energie nuklidů (min energie potřebná k rozbití jádra na jeho komponenty)

o
$$E = mc^2 \rightarrow E_j = Bc^2$$

E_i ... vazebná energie jádra

B... hmotnostní schodek

(Díky této energii drží jádro pohromadě)

- Základní interakce
 - Silná jaderná interakce (v jádře atomu)
 - Slabá jaderná interakce (působí na částice)
 - Elektromagnetická síla (silná i ve větších vzdál.)
 - Gravitace (největší dosah, nejslabší)
- Leptony = částice, na které nepůsobí silná jaderná síla (nemají vnitřní strukturu, jsou nedělitelné)
 - Nabité náboje (elektrony, miony, taurony)
 - Neutrina
- Hadrony = Částice, které se skládají silnou jadernou interakcí z kvarků (nebo gluonů)
 - Baryony poločíselný spin (fermiony) ← ze 3 kvarků
 - Mezony celočíselný spin (bosony) ← ze 3 kvarků
- Radioaktivita neboli radioaktivní přeměna = jev, při němž dochází k vnitřní přeměně složení nebo energetického stavu atomových jader, přičemž je zpravidla emitováno vysokoenergetické ionizující záření
- Radionuklid = nuklid s nestabilním jádrem, která má excesivní množství nukleární energie, která se může přeměnit na gama záření nebo uvolnit jako alfa nebo beta Částice.

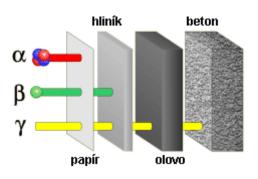
Záření
$$\alpha$$
: ${}_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{2}^{4}He + {}_{Z-2}^{A-4}Y$

- Alfa α radiace = ztrácí 2 p⁺ a 2 n⁰
- Beta β radiace = ztrácí 1 e⁻ nebo 1 e⁺

Gama γ radiace = deexcitace jádra doprovázena uvolněním γ zářením (foton)

Záření β⁻:
$${}_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{-1}^{0}e + \overline{\upsilon} + {}_{Z+1}^{A}Y$$

Záření β⁺: ${}_{Z}^{A}X \rightarrow {}_{1}^{0}e + \upsilon + {}_{Z-1}^{A}Y$



• Poločas rozpadu

- o T ... je to doba, za kterou se z počátečního počtu atomů radionuklidu přemění právě polovina.
- o λ ... přeměnová konstanta

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

Reakce

- o Jaderná = radioaktivní přeměna atomových jader vyvolaná působením jiného jádra nebo částice
- o Řetězová = sled reakcí, při kterých reaktivní produkt (meziprodukt) vyvolá následující reakci
- o **Štěpná jaderná** = dochází k rozbití jádra nestabilního atomu vniknutím cizí částice (neutronu) za uvolnění energie
- o Štěpná řetězová = produkující se neutrony, které vyvolají další štěpení

• Štěpná reakce nuklidů v energetice

- o Reaktor uzavřen ve vodní lázni pro velkým tlakem, což zpomalí volné n⁰ a ty pak Štěpí další jádra paliva → řetěz.
- 1. První Štěpení, vzniknou dva rychlé neutrony
- 2. Rychlé neutrony se zpomalí srážkami v moderátoru
- 3. Štěpení uranu, další generace rychlých
- 4. Zpomalení neutronů, jeden je moderátorem
- 5. Další štěpení a pokračování řetězové reakce

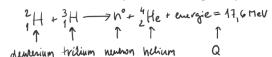
neutronů

• Řízená / neřízená štěpná reakce

- **o** Aby byla udržena řízená reakce, může ze 2-3 uvolněných neutronů pouze jeden kolidovat s dalším uranovým jádrem
- o Je-li jich méně, dojde k zastavení
- **o** Je-li jich více, dojde k atomové explozi.
- Řízená = pro následnou reakci se použije jen jeden neutron

Termojaderná fúze

- o proces, při kterém dochází ke sloučení atomových jader (jaderné fúzi) za pomoci vysoké teploty
- o kombinace lehčích jader → těžší jádro
- o překonání velkých Coulombovských sil, které brání ve slučování (potřeba energie-tepelné)
- o např. fúze jádra deuteria a tritia:



Lawsonovo kritérium

o Kritérium pro udržení termojaderné řetězové reakce