

2.3 JADERNÉ REAKCE

V této kapitole se dozvíte:

- co je to jaderná reakce a kterými zákony se řídí;
- za jakých podmínek probíhá štěpná řetězová reakce a kde se tato reakce využívá;
- co je to jaderná syntéza a kde ji můžeme pozorovat;
- z jakých představ vychází různé modely jader a kde se tyto používají.

Budete schopni:

- vysvětlit pojem jaderná reakce;
- porozumět schématu jaderné reakce;
- třídít jaderné reakce do jednotlivých skupin podle různých kritérií;
- ověřit platnost zákonů zachování v jaderných reakcích, popřípadě využít tyto zákony k určení vlastností částic, které se příslušné reakce účastní;
- uvést výchozí předpoklady vybraných modelů jader, předpovědi a oblast použití těchto modelů.

Klíčová slova této kapitoly:

jaderná přeměna, jaderná reakce, energie reakce, štěpná reakce, slučovací reakce, řetězová reakce, moderace, jaderný reaktor, modely jader



Čas potřebný k prostudování učiva kapitoly:

3 + 2 hodiny (teorie + řešení úloh)

Jaderná přeměna

(též transmutace atomového jádra) je proces, při němž dochází, ať už samovolně nebo vnějším zásahem, buď ke změně ve složení atomového jádra, tzn. změni se hodnota protonového nebo neutronového čísla, popř. obou těchto čísel, nebo alespoň ke změně vnitřního pohybového stavu jádra, tzn. klidové energie jádra.



Poznámka:

- V případě změny protonového čísla se hovoří o *transmutaci prvku*.



Jaderná reakce

je jadernou přeměnou, která je vyvolána vnějším zásahem - zpravidla interakcí s další částicí (např. lehké jádro, proton, neutron, foton). Může docházet jak ke změně struktury zúčastněných jader (změna nukleonového či protonového čísla), tak ke změně pohybového stavu zúčastněných částic (změna klidových a kinetických energií).

Poznámky:

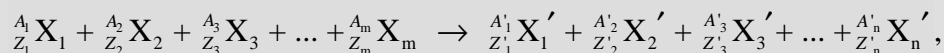
- Podle této definice můžeme považovat za **jadernou reakci** i **nepružný rozptyl** (změna vnitřního pohybového stavu jádra), byť není jadernou přeměnou ve smyslu transmutace, u které dochází ke změně Z či A .
- Z praktických důvodů se pak formálně označuje za jadernou reakci rovněž **pružný rozptyl**.
- Dominující interakcí v jaderných přeměnách je **silná interakce**, podstatný vliv však může mít i **slabá interakce** (např. přeměna β) nebo **elmg. interakce** (např. potenciálový val atomového jádra).
- Jaderné reakce můžeme dělit podle různých hledisek: **štěpná jaderná reakce** a **jaderná syntéza**, **exoenergetická reakce** a **endoenergetická reakce**. Tyto pojmy objasníme dále.
- **Jaderné reakce** spadají spolu s **radioaktivními přeměnami** pod **jaderné přeměny**.

2.3.1 ZÁKONY ZACHOVÁNÍ V JADERNÝCH REAKCÍCH

Již dříve jsme využívali schematický popis (schéma) reakcí a přeměn, který je analogií popisu chemických reakcí. Pokud do jaderné reakce vstupuje m částic, obecně X_1, X_2, X_3, \dots ; a výsledkem reakce je n částic X'_1, X'_2, X'_3, \dots , můžeme takovou rovnici zapsat následujícím schématem.



Obecné schéma jaderné reakce



kde $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m; X'_1, X'_2, X'_3, X'_n$ jsou pro konkrétní jadernou reakci značky jader nebo částic, **zobecněná protonová čísla** Z_i jsou elektrické náboje částic vyjádřené v jednotkách e , **zobecněná nukleonová čísla** A_i jsou rovna v případě jader jejich nukleonovému číslu, pro nukleony nabývají hodnoty 1 a pro ostatní částice hodnoty 0.

Poznámky:

- V případě *jaderné reakce* musí být alespoň jedna z částic atomovým jádrem.
- *Zobecněné nukleonové číslo* odpovídá *baryonovému číslu*, které se definuje ve *fyzice elementárních částic*.
- Ve většině *jaderných reakcí* vystupují na levé straně pouze dvě částice.
- V *jaderných reakcích* se často lehčí jádra nalétávají na nepohyblivé tzv. **terčíkové jádro** označují jako částice (viz tabulka).

lehké jádro				částice shodná s jádrem	
název prvku	značka nuklidu	název izotopu	značka izotopu	název částice	značka částice
vodík	${}^1_1\text{H}$	hydrogenium	${}^1_1\text{H}$	proton	${}^1_1\text{p}$
	${}^2_1\text{H}$	deuterium	${}^2_1\text{D}$	deuteron	${}^2_1\text{d}$
	${}^3_1\text{H}$	tritium	${}^3_1\text{T}$	triton	${}^3_1\text{t}$
hélium	${}^4_2\text{He}$		${}^4_2\text{He}$	částice alfa	${}^4_2\alpha$

Jaderná reakce, resp. každá *jaderná přeměna* může probíhat pouze v případě, že jsou splněny následující *zákony zachování*.

Zákon zachování počtu nukleonů

říká, že počet nukleonů se v jaderných reakcích nemění, neboli

$$\sum_{i=1}^m A_i = \sum_{j=1}^n A_j'$$

**Poznámky:**

- Zákon je důsledkem obecnějšího zákona zachování *baryonového čísla*.
- V případě, že se reakce účastní *antinukleony*, zachová se v ní rozdíl mezi počtem *nukleonů* a antinukleonů.

Zákon zachování elektrického náboje

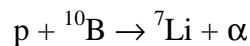
říká, že celkový elektrický náboj systému reagujících částic se během jejich reakce nemění, neboli

$$\sum_{i=1}^m Z_i = \sum_{j=1}^n Z_j'$$



**Úkol k textu**

Na základě zákona zachování elektrického náboje a počtu nukleonů rozhodněte, zda je možná níže uvedená jaderná reakce.

**Zákon zachování energie**

říká, že celková energie systému reagujících částic se během jejich reakce nemění.

Pokud nás zajímají pouze stavy na začátku a konci reakce, kdy částice již na sebe nepůsobí, tj. interakční energie je nulová, lze celkovou energii vyjádřit jako součty klidových a kinetických energií jednotlivých částic. Energie i -té částice je tak

$$E_i = m_{0,i} c^2 + E_{k,i},$$

kde $m_{0,i}$ je klidová hmotnost příslušné částice. Pak lze zákon zachování energie napsat ve tvaru

$$\sum_{i=1}^m E_i = \sum_{j=1}^n E'_j.$$

**Úkol k textu**

Deuteron v klidu se rozpadá vlivem záření gama se známou energií E_γ (2.62 MeV) na proton a neutron. Určete celkovou kinetickou energii obou vzniklých částic (E_2) za předpokladu, že klidové hmotnosti všech částic můžete získat v tabulkách. Náповěda: Odvoďte nejdříve příslušný vztah pro E_2 .

**Zákon zachování hybnosti**

říká, že celková hybnost se během reakce nemění, neboli

$$\sum_{i=1}^m \vec{p}_i = \sum_{j=1}^n \vec{p}'_j,$$

kde \vec{p}_i je hybnost i -té částice.

Mezi energií a hybností i -té částice musí platit vztah $E_i = \sqrt{p_i^2 c^2 + m_{0,i}^2 c^4}$.

**Úkol k textu**

Určete velikost celkové (úhrnné) hybnosti protonu a neutronu (p_2) z předchozího příkladu.

Zákon zachování momentu hybnosti

říká, že celkový moment hybnosti se během reakce nemění.

V kvantové mechanice není možno určit všechny složky vektoru momentu hybnosti, a tak se v případě celkového momentu hybnosti určuje pouze velikost a z-tová komponenta:

$$|\vec{J}| = \sqrt{J(J+1)}\hbar \quad \text{a} \quad J_z = M\hbar,$$

kde J a M jsou příslušná kvantová čísla. Navíc platí vztah $J_z = \sum_{i=1}^m J_{z,i}$,

kde $J_{z,i} = M_i\hbar$ je z-tová komponenta momentu hybnosti i -té částice.

Můžeme proto psát

$$J = J' \quad \text{a} \quad \sum_{i=1}^m M_i = \sum_{j=1}^n M'_j.$$

Zákon zachování izospinu

říká, že celkový izospin se během jaderné reakce ovlivněné pouze silnou interakcí nemění, tedy

$$T = T' \quad \text{a} \quad \sum_{i=1}^m T_{z,i} = \sum_{j=1}^n T'_{z,j},$$

kde $T_{z,i}$ je izospin i -té částice.

Probíhá-li jaderná reakce pod vlivem *slabé interakce*, nemusí se izospin zachovávat.

Zákon zachování parity

říká, že parita systému se během reakce zachovává, tj.

$$P = P'.$$

Parita P

je kvantové číslo (fyzikální veličina), která charakterizuje chování vícesložkové vlnové funkce, tzv. **spinoru**, fyzikálních systémů při *inverzi souřadnic*.

Poznámky:

- **Parita** může nabývat pouze dvou určitých hodnot: +1 (tzv. **sudá parita**) a -1 (tzv. **lichá parita**), což jsou tzv. vlastní hodnoty operátoru inverze. Dvakrát aplikovaná inverze totiž dává identitu, jejíž operátor má vlastní hodnotu 1, proto vlastní hodnota operátoru inverze je rovna ± 1 . Podrobněji to objasníme v kapitole o elementárních částicích.
- **Spinor** si můžeme formálně představit jako vektor složený ze skalárních vlnových funkcí. Pokud jej lze zapsat jako součin **konstantního spinoru** nezávislého na souřadnicích a **skalární funkce**, která je funkcí souřadnic, můžeme v obou případech určit **paritu**. V prvním případě se označuje jako **vnitřní parita** (srv. např. axiální a polární vektor), ve druhém případě jako **orbitální parita** (srv. např. sudé a liché funkce).

2.3.2 TYPY JADERNÝCH REAKCÍ

Jaderné reakce je možno třídit podle různých kritérií. Jednou z možností je třídění podle **energie reakce**.

**Energie (jaderné) reakce E_R**

je přebytek celkové kinetické energie částic po jaderné reakci nad celkovou kinetickou energií částic před reakcí, tedy

$$E_R = \sum_{j=1}^n E'_{k,j} - \sum_{i=1}^m E_{k,i} .$$

Vzhledem k platnosti **zákona zachování energie** a **Einsteinova vztahu ekvivalence** je možno určit **energii reakce** z rozdílu součtů klidových hmotností všech částic před reakcí a po reakci, tj.

$$E_R = \left[\sum_{i=1}^m m_{0,i} - \sum_{j=1}^n m'_{0,j} \right] c^2 ,$$

kde $m_{0,i}$, resp. $m'_{0,i}$ jsou klidové hmotnosti částic před reakcí, resp. po reakci.

Poznámky:

- Často se pro **energii reakce** používá méně vhodný termín „energie uvolněná při reakci“.
- Hodnota E_R se často uvádí ve schématu jaderné reakce – buď nad šipku, nebo s příslušným znaménkem za poslední symbol částice na pravé straně schématu.

Dělení jaderných reakcí podle energie reakce E_R

Je-li $E_R > 0$, hovoříme o **exoenergetické** (exotermické, exoergické) reakci.



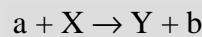
Je-li $E_R < 0$, hovoříme o **endoenergetické** (endotermické, endoergické) reakci.

Úkol k textu

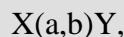
V neúplném schématu $^{14}\text{N} + n \rightarrow p + ?$ určete na základě zákonů zachování neznámou částici či jádro a vypočítejte příslušnou **energii reakce**. Jedná se o exoenergetickou nebo endoenergetickou reakci?



Speciálním typem reakcí jsou **binární srážky** popsané následujícím schématem.

Binární srážky

nebo v ekvivalentní kompaktní formě



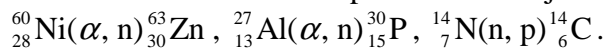
kde **a** je nalétávající částice (nebo lehké jádro), **X** je terčíkové jádro, **Y** je dceřinné jádro a **b** je emitovaná částice.

Poznámky:

- Taková reakce probíhá obvykle přes složené jádro, které je nestabilní.
- Reakce s nabitými částicemi probíhají hůře v důsledku Coulombické odpudivé interakce.
- Dobře naopak probíhají reakce s neutrony, které nemusí překonávat Coulombické síly.

Příklad binární srážky

Binárními srážkami to například následující reakce:



Speciálním typem binárních srážek je **rozptyl**, při němž se nemění typy zúčastněných částic, tedy $X(a,a)X$. Rozptyl může být **pružný** (elastický) nebo **nepružný** (neelastický).

Pružný rozptyl

je rozptyl, během něhož se nemění vnitřní pohybový stav zúčastněných částic, tj. nedochází k excitaci či deexcitaci částic.

Může docházet tedy pouze k předání translační kinetické energie mezi částicemi a vzájemné transformaci interakční a translační kinetické energie během interakce částic.



Nepružný rozptyl

je rozptyl, v jehož průběhu dochází ke změně vnitřního pohybového stavu částic (tj. k excitaci či deexcitaci), nedochází však k přeměně částic (na jiné typy částic).

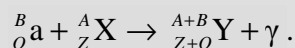
U *nepružného rozptylu* tedy může docházet k vzájemné transformaci jednotlivých složek energie, tj. kinetické translační, kinetické rotační, klidové a interakční energie částic.

Dalším typem binárních srážek jsou reakce s účastí *fotonu*, mezi něž patří *radiační záchyt* a *jaderný fotoefekt*.



Radiační záchyt

je jaderná reakce, při níž dochází k pohlcení lehké částice **a** jádrem a následnému uvolnění energie ve formě kinetické energie záření γ , tedy

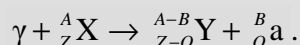


Zachycenou částicí **a** může být např. neutron, elektron slupky K (radiační záchyt elektronu, nebo těž radiační K záchyt) i jiné částice.



Jaderný fotoefekt

(též fotojaderná reakce) je jaderná reakce, při níž dochází k pohlcení kvanta záření γ (fotonu) a následnému uvolnění lehké částice **a** (např. p, n, α aj.), tedy



Jedná se o *endoenergetické reakce*.



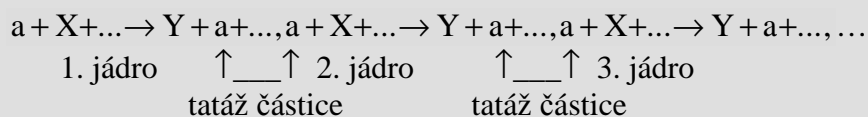
Příklad radiačního záchytu a jaderného fotoefektu

Radiačním záchytem jsou například některé reakce, které jsou součástí tzv. *uhlíkového cyklu*: ${}^{13}_6\text{C}(p, \gamma){}^{14}_7\text{N}$ a ${}^{14}_7\text{N}(p, \gamma){}^{15}_8\text{O}$. Příkladem *jaderného fotoefektu* je fotodisociace deuteronu: ${}^2_1\text{D}(\gamma, n){}^1_1\text{H}$.

Jaderné reakce mohou též probíhat jako tzv. *řetězové reakce*.

Řetězová reakce

je sled na sebe navazujících jaderných reakcí stejného typu, u kterých část produktů (částic) uvolněných při předchozí jaderné reakci vstupuje opět do reakce s dalšími jádry.



Do reakce s částicí a , která vznikla předchozí reakcí, vstupuje vždy další jádro X .

Poznámky:

- Jádra X tedy představují „palivo“ a jádra Y „popel“ jaderné reakce.
- Jedná se vlastně o analogii *katalýzy* v chemii.
- Někdy může jít též o sekvenci či cyklus opakujících se reakcí.

V případě, že v jednotlivé reakci vzniká více částic a potřebných pro iniciování nové reakce, může v případě dostatečného počtu terčíkových jader Y a při splnění dalších nutných podmínek dojít k lavinovitému nárůstu (geometrickou řadou) počtu jednotlivých reakcí, které probíhají v daném časovém okamžiku. Hovoříme pak o **lavinovité řetězové reakci**.

Jednou iniciovaná řetězová reakce může probíhat *samovolně* pouze v případě, že je tvořena sledem *exoenergetických reakcí*. Samozřejmě v závislosti na typu reakce musí být opět splněny i další podmínky nutné pro uskutečnění jednotlivé reakce v řetězu.

Dalším způsobem klasifikace *jaderných reakcí* je dělení jaderných reakcí na reakce *štěpné* a *slučovací*. Podívejme se nejdříve na *reakci štěpnou*.

2.3.3 REAKCE ŠTĚPNÁ

Štěpná jaderná reakce

je jadernou reakcí, při níž dochází k rozdělení (tj. rozštěpení) původního atomového jádra na nejméně dvě částice či nová lehčí jádra, tzv. fragmenty.



Poznámky:

- Ke „štěpení“ jádra může docházet i samovolně (radioaktivní přeměna). Nejčastěji se ale termín štěpná reakce používá pro štěpení jader vyvolané vnějším zásahem, tj. interakcí štěpeného jádra s jinou částicí (fotonom, protonem, neutronem, částicí α aj.).
- Je to v současnosti jediný typ jaderné reakce, který je zvládnut po technické stránce jako tzv. *řízená řetězová reakce*.

- Probíhá při běžných teplotách a nízkých **aktivačních energiích**.
- **Štěpná reakce** může být **endoenergetická** nebo **exoenergetická**.
- **Exoenergetické štěpné reakce** mohou probíhat pouze pro jádra těžší, než jsou jádra Fe a Ni. To je dáno průběhem závislosti vazebné energie na jeden nukleon ε_v na počtu nukleonů A . Pro Fe a Ni pozorujeme maximum $|\varepsilon_v(A)|$.
- Připomínáme, že jedině **exoenergetické řetězové reakce** mohou probíhat **samovolně** (po iniciaci prvotní reakce).
- Rovněž z hlediska praktického využití je zajímavější **exoenergetická štěpná reakce**.

Podmínky pro uskutečnění štěpné reakce

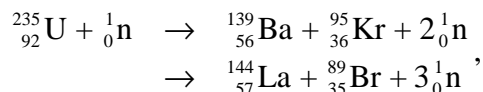
Aby proběhlo štěpení, je nutné jádru dodat určitou minimální energii, tzv. **aktivační energii štěpení**. Kromě toho musí být v konkrétním případě reakce splněny další podmínky.

Podrobněji rozebereme problematiku **štěpné reakce** na příkladu **štěpení uranu**.



Štěpení uranu

Štěpení uranu ^{235}U může být vyvoláno pohlčením pomalého neutronu. Při této reakci vznikají dva fragmenty a dva až tři neutrony. Uvedme příklad dvou kanálů:



kde kromě neutronů vznikají i fotony gama záření. Při reakci jsou splněny příslušné zákony zachování.

Energie reakce v případě štěpení uranu je průměrně 200 MeV.

Pro štěpení jádra musí být dodána **aktivační energie**. Na druhou stranu se **štěpení uranu** uskuteční pouze tehdy, zachytí-li se neutron v jádře. To je možné pouze pro tzv. **pomalé neutrony**, které mají kinetické energie nižší než 0,3 eV. Podmínkou vzniku štěpné řetězové reakce uranu je proto tzv. **moderace neutronů**.

Moderace neutronů

Neutrony vzniklé při štěpné reakci jsou tzv. **rychlé neutrony** s kinetickou energií okolo 5 MeV. Takové neutrony nemohou být zachyceny jádrem a nevyvolají tudíž štěpení. Musejí být tedy nejdříve zpomaleny neboli **moderovány** (sníží se jejich kinetická energie). Ke zpomalení neutronů se používá jejich průchodu vhodnou látkou, tzv. **moderátorem**.

Příklady moderátorů

Ke zpomalování neutronů se používá například *grafit*, (*lehká*) *voda* H_2O nebo *těžká voda* D_2O .



Jaderné štěpení může probíhat jako řetězová reakce, hovoříme pak o **štěpné řetězové reakci**.

Řízení řetězové reakce

Za vhodných podmínek může probíhat řetězová reakce jako lavinovitá reakce. V případě, že vhodným způsobem zajistíme, aby počet reakcí za časovou jednotku byl v čase konstantní, případně jej ovlivňujeme žadáním směrem, hovoříme o řízení štěpné řetězové reakce.

V našem příkladu *štěpení uranu* máme vždy dva až tři rychlé neutrony. Pokud budou všechny moderovány, bude *řetězová reakce* lavinovitě narůstat. V takovém případě postačí započít u lavinovitě narůstající řetězové reakce pohlcovat nadbytečné *neutrony* vzniklé štěpením pomocí vhodných látek - *absorbátorů neutronů*.

Příklady absorbátorů neutronů

Neutrony jsou pohlcovány například jádry *bóru* a *kadmia*. V případě bóru se řízení provádí změnou koncentrace kyseliny borité, kadmium se používá ve formě tyčí a řízení se provádí tak, že měníme počet zasunutých tyčí nebo hloubku jejich zasunutí do *jaderného reaktoru*.



Jaderný reaktor

je zařízení, ve kterém se uskutečňuje řízená *štěpná řetězová reakce*. Využívá se jako zdroj tepelné a zprostředkovaně elektrické energie (v *jaderných elektrárnách*), zdroj ionizujícího záření nebo jako zdroj radionuklidů. Podle různých hledisek rozlišujeme mnoho *typů jaderných reaktorů*.

Typy reaktorů:

- podle *způsobu využití* (např. výzkumný reaktor, energetický reaktor),
- podle *uspořádání* (homogenní, heterogenní),
- podle typu *chlazení* (např. lehkou vodou, těžkou vodou, tekutým kovem, plynem),
- podle použitého *moderátoru* (grafitové reaktory, těžkovodní reaktory s D_2O , lehkovodní reaktory s H_2O),
- podle použitého *paliva* (např. přírodní uran, obohacený uran, plutonium),
- podle *rychlosti neutronů* (tepelné reaktory, rychlé reaktory),
- podle schopnosti *reprodukce paliva* (bez reprodukce, množivý reaktor).

Štěpných jaderných reakcí se využívá v *jaderné elektrárně* a v *jaderné bombě*.



Průvodce studiem

Nyní se podíváme na dvě základní možnosti využití štěpné jaderné reakce. Určitě jste o nich slyšeli ve sdělovacích prostředcích, i když pravděpodobně spíše v negativním smyslu. Po pravdě řečeno v případě jaderné bomby je přesnější mluvit o zneužití, a tak si to zaslouží. Druhou aplikací je jaderná elektrárna, její hodnocení už tak snadné není. Má na jedné straně své nesporné výhody, na straně druhé skrývá v sobě určité nebezpečí a zatím nevyřešené problémy. My ale zůstaňme především na půdě fyziky.

Jaderná elektrárna

je elektrárna, ve které se jako zdroj energie používá jaderný reaktor. Teplo vzniklé při štěpení jader v reaktoru je využíváno k výrobě páry pro parní turbíny pohánějící generátor elektrické energie.

Poznámky:

- Mimo odbornou literaturu se stále často užívá nevhodného označení atomová elektrárna.
- V České republice fungují 2 jaderné elektrárny: v Dukovanech na Třebíčsku a v Temelíně v jižních Čechách. S výstavbou dalších se nepočítá.



Úkol k zamyšlení

Srovnajte si jadernou elektrárnu s tepelnou elektrárnou. Co mají společného a kde je hlavní rozdíl?



Srovnání spotřeby paliva v jaderné a tepelné elektrárně

Energie získaná z 1 kg uranu odpovídá přibližně energii, kterou bychom dostali spálením 3 000 000 kg uhlí.

Z výše uvedeného příkladu každý dokážete jistě odhadnout, že využití jaderného paliva je efektivnější než využití fosilních paliv. Určitým problémem se může zdát emise radioaktivních látek při provozu jaderné elektrárny. Ta ovšem může být kupodivu menší než v případě elektráren tepelných, které rovněž produkují určité zvýšené množství radioaktivního spadu. V každém případě je třeba vždy zvážit nakolik tyto hodnoty přesahují běžné radioaktivní pozadí (radioaktivní látky se vyskytují všude v přírodě, ale většinou v nepatrném množství). Hlavními problémy jsou nebezpečí havárie jaderné elektrárny a bezpečné uskladnění či likvidace vyhořelého paliva. Při havárii jaderné elektrárny se může uvolnit do okolí zvýšené množství radioaktivních látek. Riziko je ovlivněno především konstrukcí a dodržáním pravidel provozu konkrétní jaderné elektrárny. Jedná se pak především o statistický problém, protože každé technické zařízení podléhá poruchám. Samozřejmě, že riziko havárie nelze podceňovat, už vzhledem k tomu,

že k haváriím, včetně těch opravdu závažných, již došlo. Z dlouhodobého hlediska představuje závažný problém především vyhořelé jaderné palivo, které je vysoce aktivním materiálem, který musí být pokud možno bezpečně uskladněn po dobu, než dojde k snížení jeho aktivity na přípustnou mez radioaktivními přeměnami. Novou možností, která se ovšem teprve ověřuje, je využít přeměny radioaktivních látek na stabilní nuklidy cílenými jadernými reakcemi.

Úkol k zamyšlení

Proč je intenzivní radioaktivní záření nebezpečné živým organismům?



Jaderná bomba

(též jaderná puma) je jaderná zbraň, která využívá ničivých účinků jaderného výbuchu. Mezi tyto účinky patří účinek intenzivního světelného záblesku (zapálení látek, oslepení), účinek elmg. impulsu (poškození elektronických přístrojů), účinek tlakové vlny (mechanické demoliční účinky), účinek pronikavého ionizující záření vznikajícího při jaderném výbuchu (poškození živého organismu, ať už přímé nebo genetické), zamoření radioaktivním spadem (opět poškození živého organismu ionizujícím zářením vzniklým při přeměně radionuklidů). Pod označení jaderná bomba bývá zvykem zahrnovat jen ty jaderné bomby, které využívají **štěpné jaderné reakce**.

Poznámky:

- Mimo odbornou literaturu se stále používá nevhodný termín atomová bomba.
- Na konci 2. světové války byla poprvé použita jaderná bomba proti Japonsku (poprvé byla svržena na Hirošimu a podruhé na Nagasaki).

Průvodce studiem

Vězte, že obdobným způsobem je možné zneužít i poznatky jiných věd jako je chemie (ypetit a jiné látky) či biologie (biologické zbraně). Znovu se podívejte na začátek druhé kapitoly a připomeňte si, co je náplní jaderné fyziky.



Úkol k zamyšlení

Dovedete si představit nějakou neválečnou aplikaci jaderné bomby ?
V čem spočívá problematičnost takového využití jaderné bomby ?



2.3.4 REAKCE TERMOJADERNÁ



Jaderná syntéza

neboli **slučovací jaderná reakce** je jaderná reakce, při níž dochází ke slučování lehčích jader na jádra těžší.

Jako *exotermická reakce* může jaderná syntéza probíhat pouze pro jádra, která jsou lehčí než železo a nikl. Je to dáno tím, že železo a nikl mají v absolutní hodnotě nejvyšší *vazebné energie na jeden nukleon*.



Termonukleární reakce

(**termojaderná syntéza, termojaderná fúze**) je exoenergetická jaderná syntéza probíhající za vysokých teplot (10^6 až 10^9 K).

Pojem *termonukleární reakce* zatím většinou splývá s pojmem *jaderná syntéza*, protože při pokojových teplotách se zatím nepodařilo jadernou syntézu prokázat.

Poznámka:

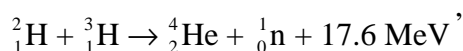
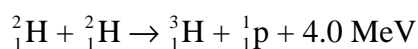
- V roce 1989 se objevila zpráva, že při elektrolýze těžké vody D_2O s použitím paládiových elektrod byla objevena tzv. studená fúze. Elektrochemiky provádějící experiment vedla k tomuto závěru skutečnost, že během pokusu se náhle uvolňovala energie, jejíž původ si nedokázali objasnit na základě známých chemických modelů. Doplnkové experimenty jaderných fyziků však jejich závěry nepotvrdily a objev studené fúze byl dementován. Nicméně fyzikálně-chemický mechanismus objasňující tento a jemu podobné experimenty nebyl zatím nalezen.

Příkladem termonukleární reakce je *slučování deuteria*.

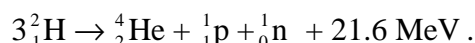


Syntéza deuteria na helium

Reakce probíhá ve dvou krocích



souhrnně pak můžeme psát



Poznámky:

- *Řízenou řetězovou termonukleární reakci* se zatím podařilo zvládnout pouze na experimentální úrovni.
- Praktické využití (např. termojaderné elektrárny) je zatím v nedohlednu z ekonomických, ale i řady technických důvodů.

- Prakticky je možno využít pouze neřízenou termojadernou reakci ve **vodíkové bombě**.
- Samovolně probíhají **termonukleární řetězové reakce** v nitrech hvězd. Protože samovolně mohou ve hvězdách za doby jejich života probíhat pouze **exoenergetické řetězové reakce**, může jadernou syntézou docházet k tvorbě pouze prvků s jádru, jež jsou lehčí než železo.

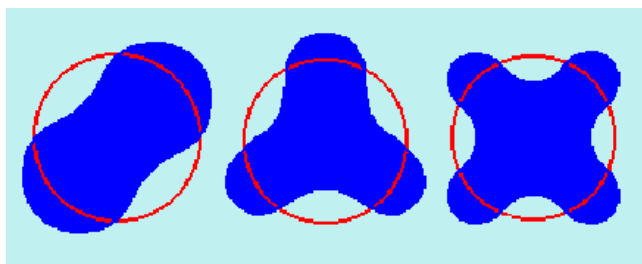
2.3.5 MODEL Y JADER

V úvodu jaderné fyziky jsme se zabývali především historickými modely **stavby jádra**. Při objasnění experimentálně zjištěných základních vlastností jádra (hmotnost, náboj, magnetický moment, spin jádra) nakonec uspěl **Heisenbergův-Ivaněnkův model jádra**. Podle tohoto modelu je jádro složeno z **nukleonů** (protonů a neutronů), které na sebe působí silnou interakcí, resp. formou jaderných sil. Dalším problémem je správný popis **dynamiky** tohoto systému (**spektrum energií** a určení **vazebné energie**) a jeho chování při přeměnách jádra (radioaktivní přeměny a jaderné reakce).

Protože přesný analytický popis **jaderných sil** není znám, je nutné vytvářet speciální **modely jader**, které vycházejí buď z fenomenologického popisu na základě určitých analogií jako je **kapkový model jádra**, nebo vycházejí z empirického tvaru efektivního potenciálu jaderných sil, jako je tomu v případě **slupkových modelů jader**.

Kapkový model atomového jádra

bývá označován také jako Bohřův (hydrodynamický) model. Vychází z analogií mezi kapkou kapaliny a atomovým jádrem. Jádro je chápáno jako kapka nukleonové kapaliny (hustoty všech jader jsou přibližně stejné), ve které se projevují objemové i povrchové síly.



Vibrační módy jádra podle kapkového modelu

Pomocí tohoto modelu lze objasnit některé členy popisující vazebnou energii (viz dále, tzv. **Weizsäckerova formule**). Model se hodí pro názorné představy průběhu **jaderných reakcí**, např. **štěpení** a **syntézy**. Jeho nedostatky plynou z nedokonalosti analogie mezi klasickou kapkou kapaliny a atomovým jádrem, a z nerespektování zákonitostí kvantové mechaniky.



Slupkový model atomového jádra

vychází z analogií mezi vlastnostmi elektronového obalu atomu a pozorovanými vlastnostmi atomového jádra. Podle tohoto modelu obsazují jednotlivé nukleony diskrétní energetické hladiny (slupky) obdobně jako elektrony v atomovém obalu. Hodnoty a pořadí energetických hladin protonů a neutronů jsou ale jiné než v případě elektronů.

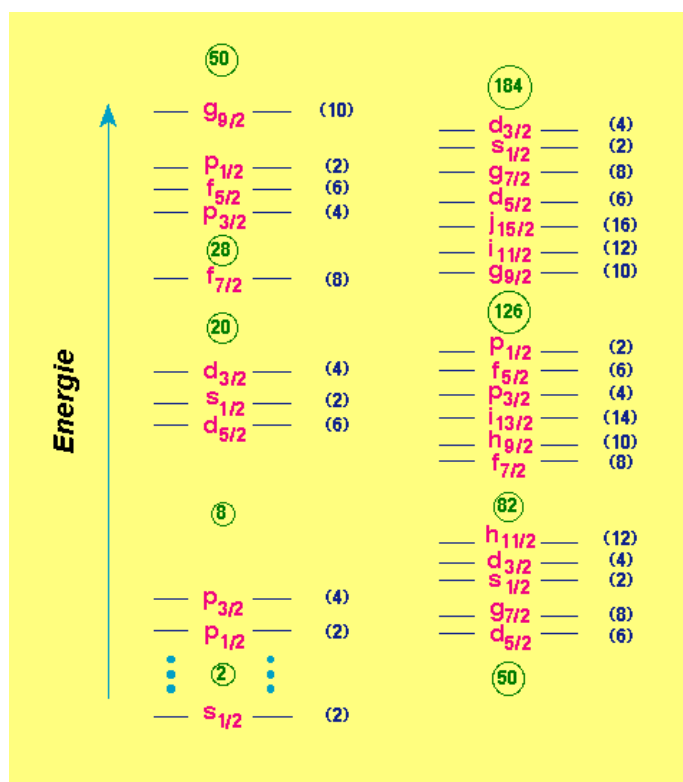
Nejedná se o čistě empirický model. Přibližné *energetické spektrum nukleonů* lze získat z kvantově mechanických výpočtů. Základem těchto výpočtů je *Schrödingerova rovnice* (SR) pro nukleony, ve které je *jaderná interakce* přibližně popsána *efektivním potenciálem*.

Efektivní potenciál jaderných sil

zahrnuje zprůměrované působení zbývajících nukleonů na jeden vybraný nukleon. SR A -částicového problému (jádra složeného z A nukleonů) se tak separací proměnných rozpadá na A identických jenočásticových rovnic.

Efektivní potenciál by bylo teoreticky možné odvodit z přesného analytického tvaru potenciálu *jaderných sil*, který ovšem dosud nebyl vytvořen. Z tohoto důvodu se tvar efektivního potenciálu volí tak, aby výsledky modelu pokud možno co nejlépe odpovídaly experimentálním poznatkům (tj. volí se „ad hoc“).

Podobně jako v rámci slupkového modelu atomu u slupkového modelu jádra dostáváme řešením Schrödingerovy rovnice *diskrétní energetické spektrum*, liší se ale pořadím a polohou jednotlivých hladin.



Spektrum jedné z variant slupkového modelu jádra

Podle tvaru zvoleného *efektivního potenciálu* rozlišujeme celou řadu *slupkových modelů*.

Nejjednodušší model používá efektivní potenciál ve tvaru *parabolické potenciálové jámy* (tj. kvadratická závislost na poloze). V tomto případě dává model pouze hrubou kvalitativní představu o energetických hladinách.

Model s potenciálem ve tvaru *pravoúhlé potenciálové jámy* nebývá označován jako slupkový, ale jako **Fermiho statistický model** či **model nukleonového plynu**.

Poznámky:

- Slupkový model patří mezi tzv. *jednočásticové modely*.
- Dobře popisuje *excitace atomových jader*, kterých se zúčastňuje jen malý počet nukleonů (jednočásticové excitace).
- S pomocí *slupkových modelů* je možné objasnit tvar *linie stability*. Propracovanější verze zahrnující spinorbitální interakci pak dovedou objasnit i *magická čísla*, která odpovídají počtu nukleonů v jádrech s plně obsazenými slupkami.

Objasnění linie stability

Pro lehká jádra odpovídá linie stability *symetrickým jádrům* ($Z = A$). Ve *slupkovém modelu* mají odpovídající jednočásticové hladiny pro protony i neutrony přibližně stejnou hodnotu energie. K této hodnotě přispívají především *jaderné síly*, protonové hladiny leží výše než odpovídající neutronové, což je důsledek *elektrostatické repulze protonů*. Vzhledem k tomu, že je u lehkých jader protonů málo, je posun menší než typický rozdíl mezi dvěma neutronovými hladinami.

Protony i neutrony jsou *fermiony* a mohou tak podle *Pauliho vylučovacího principu* obsadit příslušnou jednočásticovou hladinu nejvýše po dvojicích s opačným *spinem*.

Pokud je v jádře nadbytek protonů nad neutrony, musí zaplňovat protony ve srovnání s neutrony vyšší energetické hladiny. Jádro jako celek se snaží přejít do stavu s nejnižší energií, a to tak, že protony se přemění *přeměnou beta plus* na neutrony a poté přejdou na neutronové hladiny s nižší energií.

Analogicky to platí v případě nadbytku neutronů v jádře. Neutrony opět mohou přejít tentokrát *přeměnou beta minus* na protony. Nejmenší energii má tedy skutečně *symetrické jádro*.

Pro těžší jádra se začíná více projevovat elektrostatická repulze protonů. Protonové hladiny se posunou o jednu či více hladin výše než odpovídající neutronové hladiny. Pro jádro je tak výhodnější malý nadbytek protonů nad neutrony.

Slupkové modely selhávají v případě jaderných reakcí, protože při nich dochází k excitaci jádra jako celku (kolektivní excitace).

Nedostatky slupkového modelu (jednočásticový kvantový model) a kapkového modelu (kolektivní, ale nekvantový model) atomového jádra odstraňuje zobecněný model atomového jádra, jehož základem je spojení výhod obou modelů.



Zobecněný model atomového jádra

V rámci tohoto modelu je jádro popisováno jako systém skládající se ze dvou podsystemů nukleonů. Jsou to **kolektivní podsystem** a **jednočásticový podsystem**.

- **Kolektivní podsystem** zahrnuje nukleony, jejichž počet nejčastěji odpovídá *magickému číslu*, které je nižší než příslušný počet nukleonů daného jádra a je mu nejbližší. Tento podsystem se popisuje jako *kapka kvantové kapaliny*.
- **Jednočásticový podsystem** je tvořen zbývajícími nukleony v jádře. Tyto nukleony se popisují analogicky jako ve *slupkovém modelu*. Na vybraný nukleon jednočásticového podsystemu působí *efektivní potenciál*, který nahrazuje působení ostatních nukleonů tohoto podsystemu a také nukleonů kolektivního podsystemu.

Popis kolektivního podsystemu

Kapka kvantové kapaliny může vibrovat a rotovat pouze v dovolených kvantových stavech (tzn. je zahrnut kvantový popis). Tímto způsobem je pro nukleony kolektivního podsystemu, tzn. pro většinu nukleonů v jádře, zahrnuta i část interakce (tzv. *zbytková interakce*), kterou není možno zahrnout do *efektivního potenciálu* v rámci jednočásticového přiblížení jako je tomu u *slupkového modelu jádra*. Tato interakce souvisí se vzájemnou korelací pohybu nukleonů.

Popis jednočásticového podsystemu

V rámci jednočásticového podsystemu korelace zahrnuty nejsou. Pro zmenšení počtu nukleonů jednočásticového podsystemu na 1 až 3 se často při volbě kolektivního podsystemu vychází místo z magického jádra z *jádra sudo-sudého* (jádro se sudým počtem protonů a sudým počtem neutronů).

Zobecněný model uspokojivě vysvětluje jak excitace malého počtu nukleonů, tak kolektivní excitace většího počtu nukleonů, ke kterým dochází při jaderných reakcích.

Z výsledků *kapkového* a částečně i *slupkového modelu* vychází *Weizsäckerova-Fermiho formule*, někdy označovaná jen jako Weizsäckerova formule, což je empirický vztah pro výpočet vazebné energie jádra E_V určeného protonovým číslem Z a nukleonovým číslem A ($|E_V| = f(Z, A)$).

Funkce $f(Z, A)$ je tvořena součtem pěti členů:

- První člen, tzv. **objemový člen**, souvisí s nasyceností jaderných sil (možnost interakce nukleonu jen s omezeným počtem jiných nukleonů), je úměrný objemu jádra a tedy A .
- Druhý člen, tzv. **povrchový člen**, je úměrný povrchu jádra a tedy $A^{2/3}$, vyjadřuje skutečnost, že povrchové nukleony jsou vázány menší silou.

Oba tyto členy byly navrženy na základě představ **kapkového modelu jádra**.

- Třetí člen, tzv. **Coulombický člen**, započítává elektrostatickou repulzi protonů v jádře, vychází z představy rovnoměrně nabitě koule o poloměru jádra, je úměrný podílu čtverce náboje a poloměru jádra a tedy $Z^2/A^{1/3}$.
- Čtvrtý člen, tzv. **energie asymetrie**, vyjadřuje skutečnost, že symetrická jádra ($Z = N$) jsou stabilnější a tedy mají vyšší $|E_V|$ než jádra nesymetrická.
- Pátý člen zahrnuje fakt, že nejstabilnější jsou sudo-sudá jádra, následují sudo-lichá a lichó-sudá jádra, nejméně stabilní jsou lichó-lichá jádra (viz kap. 2.1.4).

Poslední členy je možno teoreticky zdůvodnit až v pokročilejších modelech atomového jádra, např. slupkovém.

Uvádíme jednu z verzí **Weizsäckerovy-Fermiho formule**.

Weizsäckerova-Fermiho formule

$ E_V(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C Z^2 / A^{1/3} - a_A (A - 2Z)^2 / A + \delta(A, Z) / A^{3/4}$					
a_V	a_S	a_C	a_A	$\delta(A, Z)$	
15,75	17,80	0,71	23,70	34	0 -34
Hodnoty koeficientů jsou uvedeny v MeV a výsledná energie je tedy rovněž v MeV. Hodnoty $\delta(A, Z)$ jsou uvedeny postupně pro sudo-sudá jádra , jádra s lichým počtem nukleonů a lichó-lichá jádra .					

Maximální odchylky od skutečné hodnoty vazebné energie činí 20 MeV (odpovídají jádrům s magickými čísly 28, 50, 82, 126 pro neutrony).



Otázky

- 1. Jaderné reakce.** Objasněte pojem jaderná reakce. Napište obecné schéma zápisu jaderné reakce. Uveďte zákony zachování, které musí být splněny u jaderných reakcí. Uveďte znění každého zákona a zapište jej pomocí rovnice. U každého zákona zachování uveďte definici zachovávaných se veličiny a její jednotku. Dále uveďte podmínky platnosti jednotlivých zákonů.
- 2. Typy jaderných reakcí.** Definujte energii reakce. Uveďte dělení reakcí z hlediska hodnoty energie reakce. Vysvětlete pojem aktivační, resp. prahová energie reakce. Vysvětlete pojem binární reakce a uveďte alternativní schéma zápisu binární reakce. Uveďte dělení reakcí z hlediska hmotnosti reaktantů a produktů jaderné reakce.
- 3. Reakce štěpná a slučovací.** Definujte pojmy štěpná jaderná reakce a slučovací jaderná reakce. Uveďte alternativní pojmenování slučovací reakce. Načrtněte graf závislosti vazebné energie na nukleon v závislosti na nukleonovém čísle a objasněte na něm, v jakých případech budou tyto typy reakcí exoenergetické. Uveďte podmínky, za kterých mohou uvedené typy reakcí probíhat a proveďte jejich srovnání. Popište princip řetězové štěpné reakce na příkladu štěpení uranu. Za jakých podmínek reakce probíhá lavinovitě? Objasněte pojem řízená řetězová reakce. K čemu se používá moderátor? Uveďte příklady moderátorů a látek, které pohlcují neutrony. Uveďte alespoň řádovou hodnotu energie reakce. Stručně popište princip jaderného reaktoru a jaderné elektrárny. Popište princip slučovací reakce na příkladu slučování deuteria. Je v současnosti slučovací reakce zvládnuta po technické stránce tak, aby mohla být využita např. v energetice? Uveďte, kde v přírodě probíhají slučovací jaderné reakce a jaký to má pro nás význam.
- 4. Modely atomového jádra.** Stručně popište kapkový model jádra a jeho použití. Napište Weizsäckerovu formuli pro výpočet vazebné energie jádra a objasněte původ jednotlivých členů v této formuli. Popište slupkový model atomového jádra. Uveďte experimentální východiska slupkového modelu a jeho základní předpoklady. Na základě slupkového modelu objasněte, proč pro lehká jádra leží linie stability v blízkosti přímky $N = Z$ a proč pro stabilní těžší jádra začíná převažovat počet neutronů. Uveďte některé další modely atomového jádra.



Korespondenční úkol

Zpracujte písemně otázky zadané tutorem, řiďte se přitom jeho pokyny.

Shrnutí kapitoly

Jaderné reakce jsou jaderné přeměny vyvolané vnějším zásahem, většinou nalétávající částicí. Obvykle mezi ně ale zařazujeme též rozptyl, při němž nedochází k přeměně jádra v jádro jiné. Exoenergetické řetězové reakce pak mohou po prvotní iniciaci probíhat samovolně za splnění příslušných podmínek a dostatku „jaderného paliva“, tedy jader vstupujících do reakce.

Při jaderných reakcích a dalších jaderných přeměnách musí být splněny příslušné zákony zachování. Některé z těchto zákonů jsou známy již z klasické nekvantové fyziky, jiné byly odvozeny v rámci kvantové fyziky nebo objeveny v experimentech s přeměnami jader a elementárních částic.

Důležitou veličinou charakterizující energetický zisk je tzv. energie reakce. Reakce s kladnou, resp. zápornou energií reakce označujeme jako exoenergetické, resp. endoenergetické.

Pokud se slučují lehčí jádra na jádro těžší, hovoříme o reakci slučovací neboli jaderné syntéze. Naopak pokud se těžší jádro štěpí na lehčí, jde o štěpnou jadernou reakci.

V některých případech je produkt reakce totožný s částicí, která reakci vyvolává, za splnění vhodných podmínek pak může iniciovat další reakce jader stejného druhu, která představují „palivo reakce“. Reakce se tak může při dostatku jaderného paliva opakovat, hovoříme pak o řetězové reakci. Z předchozí kapitoly víme, že po „nastartování“ může samovolně probíhat pouze exoenergetická jaderná reakce. Zisk energie při reakci je zajímavý také z hlediska praktického využití.

Příkladem štěpné reakce je štěpení uranu. Tato reakce může probíhat jako řetězová, pokud jsou neutrony emitované při reakci zpomaleny vhodným moderátorem. Řídit reakci je možné pohlcením neutronů. Zařízení pro uskutečnění jaderné reakce se označuje jako jaderný reaktor. Lze jej využít např. při výrobě elektrické energie v elektrárnách, ale také jako zdroj záření.

Jaderná syntéza probíhá pouze za vysokých teplot, např. ve hvězdách včetně našeho Slunce.

Pro řešení problémů z oblasti jaderné fyziky, ale také pro objasnění některých vlastností jader, byly vytvořeny různé modely, které ovšem ale vycházejí spíše z empirických poznatků než z přesného kvantového popisu nukleonů vázaných silnou interakcí. Jedná se např. o model kapkový a slupkový. Kapkový model vhodný pro popis průběhu jaderných reakcí vychází z analogie mezi kapkou kapaliny a jádrem atomu. Slupkový model je inspirován kvantovými metodami, které byly použity pro popis elektronového obalu atomu, a uplatňuje se při popisu jaderných spekter.



