

29. Atomové jádro a jaderné reakce

Atomové jádro je složeno z nukleonů, což jsou protony (p^+) a neutrony (n^0). Průměry atomových jader jsou řádově $10^{-15} m$.

Poznámka: Poloměr atomového jádra je dán vztahem: $R=R_0 \cdot A^{1/3}$, $R_0=1,3 \cdot 10^{-15} m$, A je nukleonové číslo.

Jádro ${}^A_Z X$ je charakterizováno třemi čísly:

- **Protonové** (atomové) číslo Z – udává počet protonů v jádře
- **Nukleonové** (hmotnostní) číslo A - udává počet nukleonů v jádře, tj. protonů a neutronů.
- **Neutronové** číslo N – udává počet neutronů v jádře

Mezi uvedenými čísly platí vztah: $A=Z+N$

Mezi protony v jádře působí elektrostatické odpuzivé síly, mezi nukleony působí slabé přitažlivé gravitační síly, ale především silné přitažlivé krátkodosahové jaderné síly, jejichž dosah je řádově $10^{-15} m$. Kvůli jaderným silám je odtržení nukleonu od jádra mnohem těžší než odtržení elektronu od atomu.

K rozložení atomového jádra na jednotlivé volné nukleony, je třeba dodat tzv. **vazební energii** E_v , přičemž podle Einsteinova vztahu platí:

$$E_v = B \cdot c^2$$

Dodáním energie vzroste také hmotnost o tzv. hmotnostní schodek B .

Proto je hmotnost volných nukleonů větší než hmotnost jádra z nich vytvořeného!

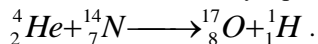
To lze zapsat ve tvaru:

$$B = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_j$$

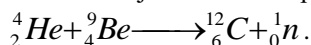
V jaderné fyzice se setkáváme s různými jadernými reakcemi, což jsou reakce, vyvolané srážkou jádra s jiným jádrem nebo částicí. Při jaderných reakcích se uplatňují:

- zákon zachování energie
- zákon zachování hmotnosti (relativistické)
- zákon zachování hybnosti
- zákon zachování počtu nukleonů
- zákon zachování elektrického náboje

Poznámka: Na Zemi byla první umělá jaderná reakce uskutečněna Ernestem Rutherfordem v roce 1919:



Další umělá jaderná reakce pak vedla v roce 1932 k objevu neutronu Jamesem Chadwickem:



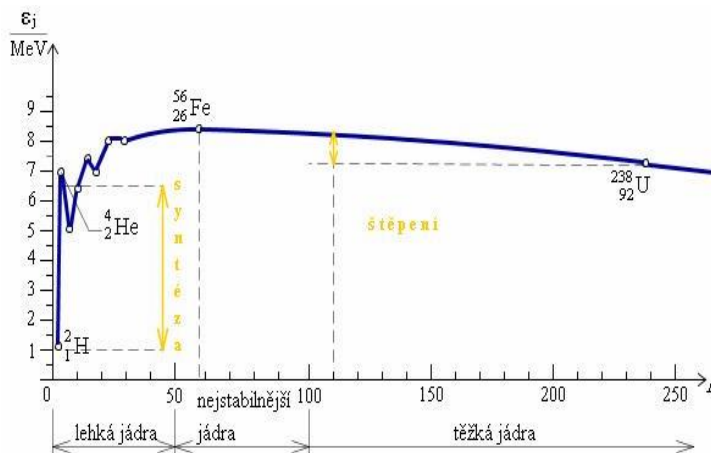
Pro posouzení kompaktnosti jádra je výhodné zavést **vazební energie vztaženou 1 nukleon**:

$$\varepsilon_j = \frac{E_v}{A}$$

Poznámka: Jestliže chceme v jakékoliv soustavě docílit slabší silové vazby (např. oddálení tělesa od Země), musíme konat práci a energii soustavě dodávat. Při opačném ději, při němž pevnost vazby roste, můžeme naopak energii odebírat.

Z následujícího grafu je zřejmé, že:

- Nejkompaktnějším ze všech jader je jádro železa.
- Jadernou energii lze při splnění podmínky růstu hodnoty ε_j odebírat dvěma způsoby:
 - 1) **Slučováním** lehkých jader na jádra těžší (např. slučování jader vodíku).
 - 2) **Štěpením** těžkých jader těžkých na jádra lehčí (např. štěpení jader uranu).



1) Slučování lehkých jader (jaderná fúze)

Aby se jádra sloučila, je nutné překonat silné elektrické odpuzivé síly mezi nimi a přiblížit je na dosah sil jaderných. Přiblížení jader vedou dvěma způsoby:

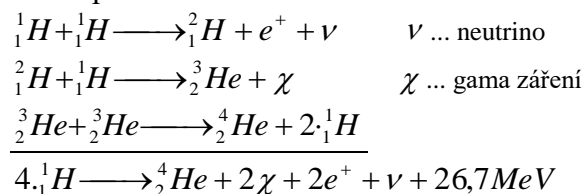
- Tlakem – tato cesta je prakticky nereálná
- Srážkou vysokorychlostních jader – k tomu je potřeba jádra „zahřát“ na řádově 10^7K (pracovní látkou je plazma) a současně zajistit jejich „dostatečnou“ hustotu, aby do sebe narazila. Proto používáme pro slučovací reakce také název **termonukleární reakce**. Problémem je, že žádná nádoba takovou teplotu nevydrží.

Poznámka: Řízená termonukleární reakce je stále ve stadiu výzkumu a experimentů. K získání horkého plazmatu se dnes užívá výkonných laserů. „Nádobou“ je tzv. Tokamak (zkratka pro název „**т**орoidalная **к**амера в **м**агнитных **к**атушках“ (toroidní komora v magnetických cívkách) - plazma je v nádobě prstencového tvaru udržováno v úzkém paprsku ve středu prstence působením silného magnetického pole. Deuterium ${}^2_1\text{H}$, (D) jako jaderné palivo je prakticky nevyčerpatelné – koncentrace D_2O v oceánech je 0,015%. Pokud by se podařilo zvládnout termojadernou fúzi, získalo by lidstvo „čistou“ energii v množství asi třikrát větší na jeden atom než jakou získává ze štěpné reakce v jaderných elektrárnách.

Termonukleární reakce jsou zdrojem energie ve vesmíru a dochází k ní v **nitru hvězd**.

Nejbližším takovým reaktorem je Slunce, v jehož nitru je dostatečná teplota a tlak, aby ke slučování jader docházelo.

Takto probíhá termonukleární reakce uvnitř hvězd:



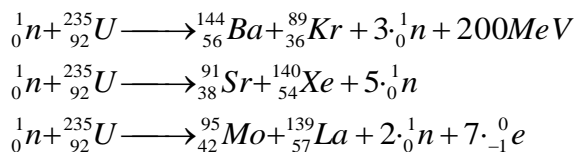
Poznámka: Neřízená termonukleární reakce na Zemi probíhá při výbuchu vodíkové bomby.

2) Štěpení těžkých jader

Ke štěpení těžkého jádra dochází po jeho zasažení „pomalým“ neutronem. Vzhledem k tomu, že neutron nemá elektrický náboj, proniká do jádra relativně snadno.

Poznámka: Pravděpodobnost rozštěpení jádra se výrazně zvětší, pokud je neutron jádrem zachycen, k čemuž dojde pouze tehdy, když je neutron dostatečně „pomalý“. „Rychlý“ neutron jádrem proletí a štěpení jádra nevyvolá.

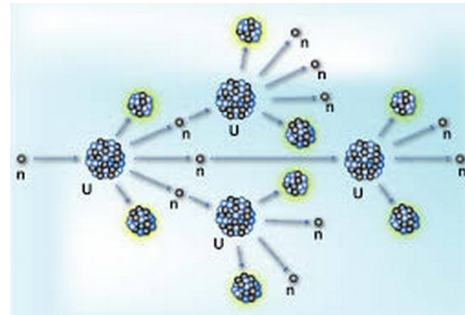
Při štěpné reakci z jednoho jádra vznikají dvě jádra s přibližně stejným protonovým číslem a uvolňuje se energie. Jádro téhož prvku lze se může štěpit různými způsoby, jak je vidět z následujících rovnic.



Neutron zpomalený vrstvou vody nebo parafínu může tedy rozštěpit jádro ${}^{235}_{92}\text{U}$ na 2 přibližně stejně těžká jádra. Nově vzniklá jádra jsou v excitovaném stavu, nestabilní (radioaktivní) a dále se rozpadají.

Pokud alespoň 2 z neutronů, které vznikly rozštěpením, budou **účinné** a rozštěpí další jádra, vznikne **štěpná řetězová reakce** (atomový výbuch). Řízená štěpná reakce se využívá v jaderných reaktorech.

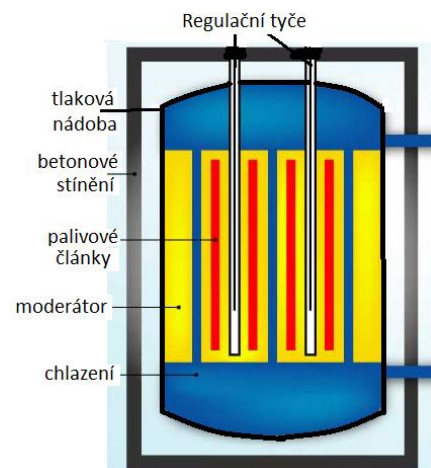
Existují pouze čtyři nuklidy, v nichž je možno uskutečnit řetězovou jadernou reakci, a které proto mohou sloužit jako **štěpné materiály** k získávání jaderné energie. Jsou to uran 235, plutonium 239, uran 233 a plutonium 241. Pouze jeden z nich se vyskytuje v přírodě. Je to uran 235, který je obsažen v přírodním uranu ve směsi s uranem 238 v množství 0,72%.



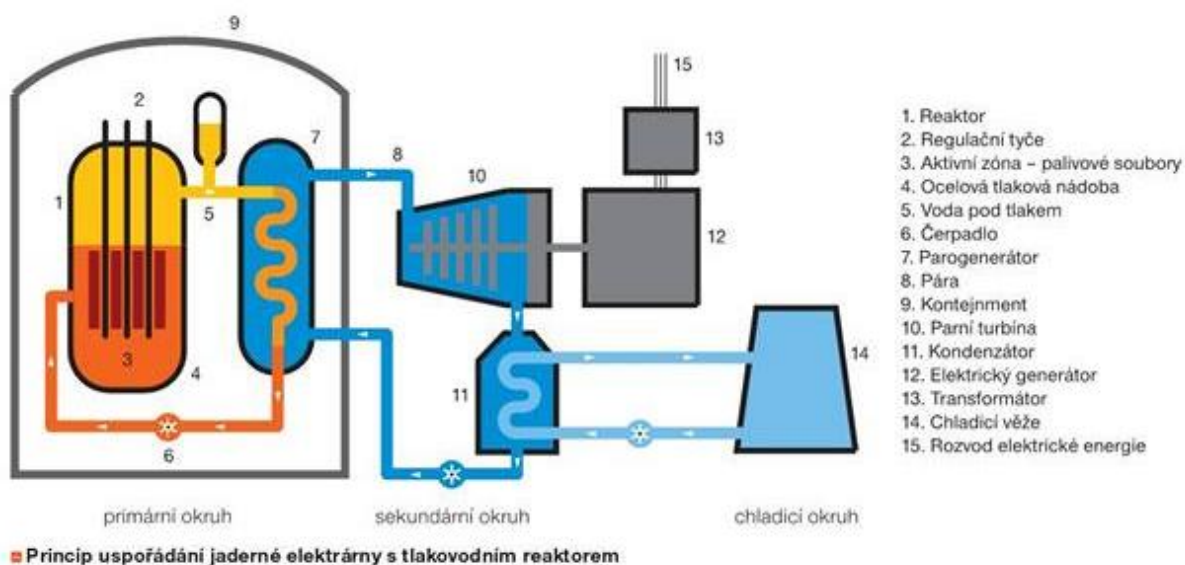
Jaderný reaktor se skládá z následujících základních částí:

- Betonový obal – tepelně odizoluje, odstiňuje vznikající záření
- Ocelová tlaková nádoba – v ní se nachází aktivní zóna reaktoru
- Palivové tyče – tablety s obohaceným uranem naskládaná do palivových proutků a ty do palivových kazet
- moderátor – slouží ke zpomalování neutronů – lehká jádra (H_2O , dřívě C)
- regulační a bezpečnostní tyče – obsahují Cd, B, které silně pohlcují neutrony a tím štěpnou reakci tlumí. V případě rychlého odstavení reaktoru jsou do něj spuštěny volným pádem. Na rozdíl od schématu jsou uloženy svisle.
- Chlazení – tlakové vodní potrubí

Poznámka: Dukovany, Temelín používají jaderné reaktory typu VVER (vodo-vodný), v nichž se voda se používá jako chladivo i moderátor (bezpečnější, protože při porušení, když by voda vytekla nebo se změnila v páru, se reakce zastaví).



Jaderná elektrárna



Jednotlivé části jaderné elektrárny jsou patrné z obrázku:

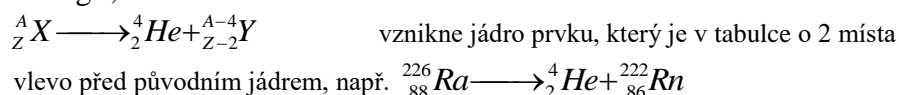
- 1) primární okruh (uzavřený): jaderný reaktor – tlakovodní potrubí s čerpadlem
- 2) sekundární okruh (uzavřený): parogenerátor – parní turbína – kondenzátor – čerpadla
- 3) terciární okruh (otevřený): chladičí věže – čerpadla - vodní zdroj

Radioaktivita

je schopnost jader některých nuklidů se samovolně rozpadat (mohou vznikat jádra jiných prvků) a přitom vysílat záření (Becquerel – objev 1896, výzkum (objev Po, Ra) – Marie a Pierre Curie).

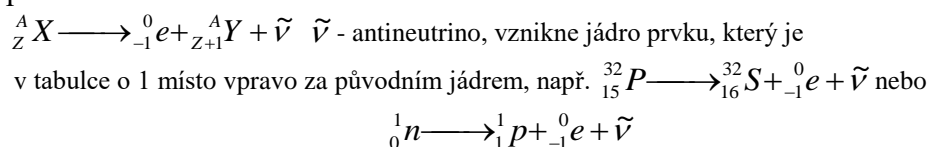
Druhy jaderného záření:

- 1) **α záření** – proud heliových jader ${}^4_2\text{He}$, má silné ionizační účinky, malou pronikavost a nesou velkou energii, k zastavení stačí oděv.

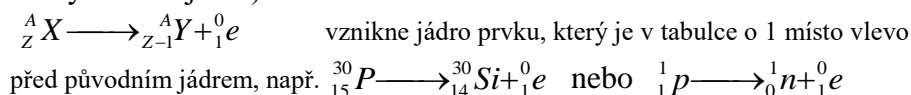


- 2) **β záření** – má větší pronikavost, menší ionizační účinky, k zastavení stačí hliníkový plech, může být dvojího druhu:

- a) β^- - je tvořeno elektrony e^- , jeho zdrojem jsou přirozená jádra – tzv. přirozená radioaktivita



- b) β^+ - je tvořeno pozitrony e^+ , vzniká při umělé radioaktivitě (uměle vytvořená jádra)



- 3) γ záření - elektromagnetické vlnění o $f \in (10^{20}, 10^{23})$ Hz, je velmi pronikavé, k zastavení je potřeba silná vrstva olova, silně ionizuje plyny, má schopnost uvolňovat z látky elektrony nebo celé ionty, doprovází α , β .

Aktivita A zářiče je fyzikální veličina udávající počet radioaktivních přeměn za časovou jednotku [A] = Bq (becquerel) = s⁻¹.

Za poločas přeměny T klesne aktivita zářiče na 1/2. Poločas přeměny T je doba, za kterou se přemění polovina jader.

$$A_{(t)} = A_{(0)} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad T \dots \text{poločas přeměny, } e \dots \text{Eulerovo číslo.}$$

Protože $\frac{1}{2} = e^{\ln \frac{1}{2}} = e^{-\ln 2}$, $A_{(t)} = A_{(0)} \cdot e^{\frac{-t \cdot \ln 2}{T}} = A_{(0)} \cdot e^{-\lambda t}$,

kde $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ je přeměnová konstanta - vyjadřuje pravděpodobnost přeměny

Zákon radioaktivní přeměny:
$$N_{(t)} = N_{(0)} \cdot e^{-\lambda t}$$

$N_{(0)}$ je původní počet jader (v čase $t = 0$) a $N_{(t)}$ je počet jader radionuklidu v čase t .

Přirozená radioaktivita – aktivita jader radionuklidů vyskytujících se v přírodě;

Umělá radioaktivita – aktivita jader radionuklidů vytvořených člověkem nebo získaných v jaderném reaktoru nebo v urychlovači částic

Využití radionuklidů:

- 1) v medicíně – diagnostické účely (sledování průtoku krve, zjišťování činnosti štítné žlázy), léčení zhoubných nádorů, revmatických chorob, výroba léčiv
- 2) jaderné baterie (v meteorologických stanicích, kosmu)
- 3) v kouřových detektorech a hlásičích požáru
- 4) k ochraně životního prostředí (sledování škodlivých exhalací, toxických látek, sledování koloběhu látek v přírodě – metoda značených atomů)
- 5) k měření stáří hornin a organických materiálů (uhlíková metoda)