

*Nejraději lidem objasňuji, co je pro ně temné, a zatemňuji, co je jim jasné.  
Edward Teller (stvořitel vodíkové bomby)*

## Jaderné reakce

V sedmdesátých letech 20. století přijel do Příbrami, na tehdejší Ústřední správu uranového průmyslu, ing. N. S. Zontov. Údajně měl zkoumat stáří našich uranových rud, a to přesto, že výzkum v tomto směru u nás průběžně probíhal už řadu let. Zontov objížděl všechny naše uranové doly i průzkumné rudní výskyty a odebíral z různých míst dolových polí rudní vzorky s pečlivě označenou lokalizací. Desítky takto odebraných vzorků odesílal průběžně do SSSR na izotopický výzkum. Je pravděpodobné, že u nás hledal uranovou rudu, která by již primárně obsahovala zvýšený podíl izotopu  $^{235}\text{U}$ . O její nalezení se totiž pokoušeli výzkumní pracovníci po celém světě. Český masiv, známý různými genetickými typy uranových ložisek a velmi různorodým složením uranových minerálů, byl ideálním územím pro takové zkoumání. Zontovovi se však optimální uranovou rudu nalézt nepodařilo, protože, podobně jako jinde ve světě, je poměr izotopického složení uranu velmi stabilní. Proč tedy to pachtění?

Fermiho jaderná řetězová reakce z roku 1942 totiž nebyla první na Zemi. Nejméně o dvě miliardy let dříve samočinně proběhla na ložisku uranové rudy Oklo v africkém Gabonu (na západě rovníkové Afriky). Izotopové složení přírodního uranu je dnes všude na světě přibližně stejné, 99,3 %  $^{238}\text{U}$  a 0,7 procenta  $^{235}\text{U}$ . Nepatrný obsah nevýznamného  $^{234}\text{U}$  nebereme v potaz. Přesto na Oklo bylo nalezeno pouze 0,3 %  $^{235}\text{U}$ , tedy jako by byl „spotřebován“. V okruhu asi 200 m bylo zjištěno 13 přírodních „reaktorů“, ve kterých došlo ke štěpení velkého množství uranu (asi 12 tisíc tun), které probíhalo asi 500 000 let. Předpokládá se, že k řetězové reakci mohlo dojít proto, že místní uranová ruda byla velmi bohatá na uran  $^{235}\text{U}$ , kterého obsahovala asi 3 % (což odpovídá dnešnímu obohacenému palivu používanému v lehkovodních reaktorech atomových elektráren).

Základní podmínkou pro vznik řetězové štěpné reakce je, aby uran  $^{235}\text{U}$  (jediný v přírodě rozšířený izotop, který je potenciálně schopen „zmáknout“ řetězovou štěpnou reakci) měl dostatečnou koncentraci a patřičný objem. Koncentrace  $^{235}\text{U}$  je dnes příliš nízká (cca 0,7 %), takže zdaleka nedostačuje k vyvolání řetězové reakce ani v nejbohatších uranových ložiskách. Uran  $^{235}\text{U}$  se však rozpadá asi šestkrát rychleji než uran  $^{238}\text{U}$ , takže ve vzdálené minulosti mohlo být zastoupení uranu  $^{235}\text{U}$  podstatně vyšší. To si uvědomil japonský jaderný fyzik P. Kurota, který již v roce 1956 upozornil na možnost vzniku řetězové štěpné reakce na přírodních ložiskách uranu. (Nyní se zamysleme i nad tím, že nejen soudruh Zontov, ale všichni bez rozdílu příliš často nedáváme ve škole pozor. A bude to čím dál horší, neboť matematika, a tím i logika, překotně mizí z našich školních lavic.)

V roce 1940 G. N. Flerov a K. A. Petržak dokonce zjistili, že uran ( $^{235,238}\text{U}$ ) se kromě radioaktivity  $\alpha$  v určitém velmi malém počtu případů rozpadá také samovolným štěpením na dvojice středně těžkých jader, přičemž se uvolňují neutrony. Je to proces, který probíhá s mizivou intenzitou a ve srovnání s ostatními druhy radioaktivity je prakticky zanedbatelný. K účinnému štěpení těžkých jader dochází až při pohlcení neutronu, ale to už se nejedná o radioaktivitu, nýbrž o jadernou reakci. Malé množství neutronů, pocházejících ze spontánního štěpení, pak může iniciovat řetězovou štěpnou reakci při dosažení tzv. kritického množství štěpného materiálu. Toto samovolné štěpení je charakteristické pro všechny transurany, kde se uplatňuje ještě výrazněji, např. u kalifornia  $^{252,254}\text{Cf}$ , u něhož je spontánní štěpení běžným procesem, konkurujícím i radioaktivitě alfa.

Před cca 2 miliardami let tedy bylo zastoupení  $^{235}\text{U}$  asi 3 %, což za příznivých podmínek je již postačující ke spuštění řetězové štěpné reakce. Touto „příznivou podmínkou“ je vedle patřičného obohacení i přítomnost moderátorů neutronů – tj. látek, které zpomalují neutrony emitované při štěpení tak, aby umožnily štěpení dalších jader. V přírodních podmínkách by

takovou moderující látkou mohla být spodní voda, prosakující tektonickými poruchami uranovým ložiskem.

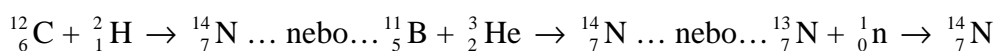
Zpět do Oklo. Analýza vzorků z tohoto povrchového dolu dále zjistila (1972), že v některých částech ložiska se ve zvýšené míře vyskytují některé lehčí prvky, především xenon, které vznikají při rozpadu těžkého jádra  $^{235}\text{U}$  na dvě části. Tato okolnost rovněž nasvědčuje tomu, že zde v dávné minulosti došlo ke spontánnímu zapálení řetězové štěpné reakce, při níž část  $^{235}\text{U}$  „vyhořela“ (rozštěpila se na lehčí prvky). Při vzrůstu teploty, vlivem energie uvolňované štěpením, se spodní voda vypařila a ztrátou tohoto moderátoru se reakce zastavila. Po vychladnutí a opětném prosáknutí vody se jaderná štěpná reakce mohla znovu rozeběhnout a takto cyklicky mohla být zapalována po dobu mnoha tisíc let. Protože nebyly nalezeny žádné patrné známky tavení horniny či výbuchu, muselo se jednat o „řízený“ přírodní reaktor.

(Takovýchto míst zvýšené koncentrace uranu mohlo být v zemské kůře více, takže ve vzdálené minulosti se některá ložiska uranu mohla chovat jako přírodní obdoba jaderných reaktorů. Nyní, po uplynutí tak dlouhé doby, jsou však veškeré stopy po činnosti těchto přírodních jaderných reaktorů již téměř zahlazeny. Radioaktivní zplodiny štěpení se dávno rozpadly, další dceřiné prvky odplavila podzemní voda, integrita ložisek byla porušena při následných geologických procesech. Některé dávné přírodní reaktory by se snad mohly prozradit zvýšeným výskytem xenonu v plynech unikajících z podzemí...?)

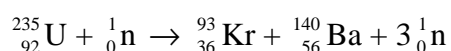
V ještě dávnějších dobách – při formování planet a celé Sluneční soustavy po výbuchu mateřské supernovy – se pravděpodobně často vyskytovala místa se zvýšenou koncentrací  $^{235}\text{U}$  či dalších štěpných materiálů. Tehdy asi docházelo k řadě mohutných vzplanutí řetězových štěpných reakcí, nezřídka velkého rozsahu a explozivního charakteru. Před více než dvanácti miliardami let docházelo ve vesmíru – a dochází dodnes – k výbuchům supernov, které vyvrhují oblaka žhavé látky obohacené o těžké prvky, mj. i o uran a transurany. V rázových vlnách v takových oblacích mohou vzniknout zhuštěniny s podmínkami pro spuštění řetězové štěpné reakce. Ve srovnání s mohutným tokem energie z výbuchů supernov však energie uvolněná při řetězové štěpné reakci nemá větší astrofyzikální význam.)

Spontánní rozpad či přeměna jader, tj. radioaktivita, je jen jedním z jaderných procesů vedoucích k transmutaci jader a emisi ionizujícího záření. Existují i další jaderné pochody spojené s přeměnami jader – jaderné reakce. Jsou dva druhy důležitých jaderných reakcí – jaderné štěpení a jaderná fúze. Obě reakce uvolňují *vazebnou energii*, která drží atomové jádro pohromadě. Atomy se nazývají *stabilní*, mají-li vazebnou energii kladnou, a *nestabilní*, je-li jejich vazebná energie záporná a při rozpadu se uvolňuje. Vazebná (též vazbová) energie se vyjadřuje v elektronvoltech (eV). Jaderné reakce jsou mj. i nejdůležitějším způsobem výroby umělých radionuklidů.

Při jaderných reakcích ale může docházet i k prosté přeměně, kdy většinou vzniká dusík:



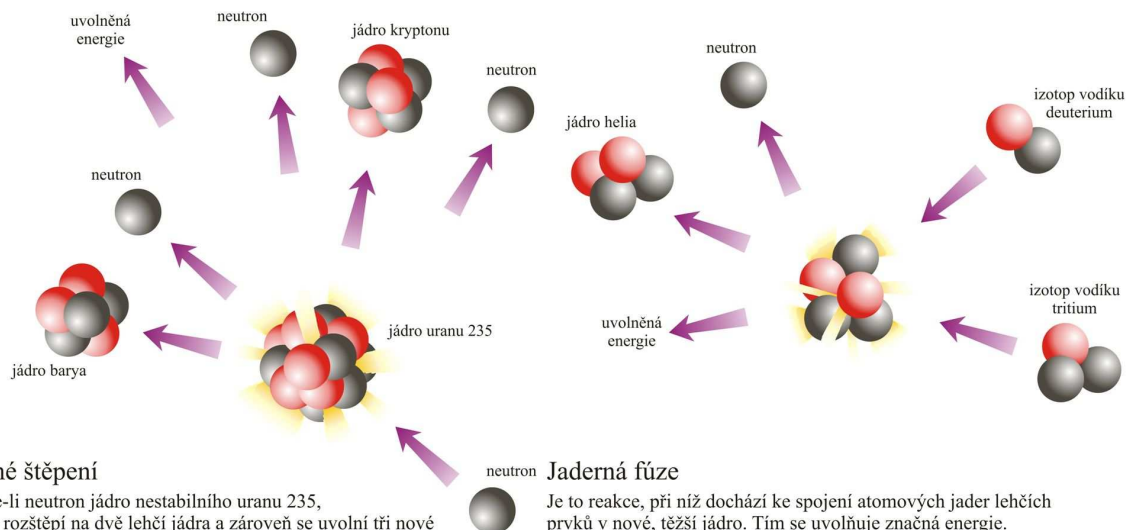
Při štěpné jaderné reakci, např. při štěpení  $^{235}\text{U}$ , se po průniku pomalého neutronu do jádra toto s velkou pravděpodobností rozpadne na dvě přibližně stejně těžké části. Při tom dojde k uvolnění dvou až třech volných neutronů, které se mohou srážkami s okolními částicemi postupně ohřívat a ztrácet tak svoji pohybovou energii až mohou vyvolat štěpení dalšího jádra uranu  $^{235}\text{U}$ . Jedno z jader vzniklých štěpením uranového jádra je nejčastěji členem skupiny lehčích prvků ( $Z = 35$ , brom, až 45, rhodium), druhé je členem skupiny těžších prvků ( $Z = 51$ , antimon, až 62, samarium). Štěpnou reakci lze znázornit rovnicí:



Štěpné produkty mají přebytek neutronů. Většina štěpných produktů je proto radioaktivní a rozpadá se dále v průměru na 2 až 3 další dceřiné izotopy. V čerstvé štěpné směsi můžeme najít zhruba 180 různých radionuklidů.

U lichých izotopů těžkých jader (jako je  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ) stačí zachycení pomalého neutronu, jehož samotná vazbová energie je dostatečná k rozkmitání jádra a jeho rozštěpení. Při shromáždění dostatečného množství takových jader v určitém kompaktním objemu, tzv. kritického množství, může dojít ke spuštění řetězové štěpné reakce.

U sudých izotopů ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ) vazbová energie zachyceného neutronu sama o sobě nestačí k potřebnému rozkmitání a rozštěpení jádra. Aby neutron takové jádro rozštěpil, musí vnést navíc určitou kinetickou energii. Taková jádra jsou štěpitelná jen rychlými neutrony. U těchto jader nedochází k řetězové štěpné reakci, většina emitovaných rychlých neutronů rychle opouští daný prostor bez interakce. Záchyt pomalých neutronů však u uranu  $^{238}\text{U}$  a thoria  $^{232}\text{Th}$  způsobí jaderné reakce, které po sérii radioaktivních přeměn nakonec vyústí ve vznik jader plutonia  $^{239}\text{Pu}$  a uranu  $^{233}\text{U}$ , která už jsou štěpitelná pomalými neutrony a umožňují tudíž vznik řetězové štěpné reakce. Toho se využívá v tzv. množivých reaktorech.



### Jaderné štěpení

Zasáhne-li neutron jádro nestabilního uranu 235, jádro se rozštěpí na dvě lehčí jádra a zároveň se uvolní tři nové neutrony a energie. Nově uvolněné neutrony bombardují ostatní jádra v řetězové jaderné reakci.

### Jaderná fúze

Je to reakce, při níž dochází ke spojení atomových jader lehčích prvků v nové, těžší jádro. Tím se uvolňuje značná energie. Na Slunci se spojují dvě jádra vodíku a vzniká jádro helia - reakce je zdrojem sluneční energie.