

# JADROVÝ REAKTOR STARŠÍ AKO ĽUDSTVO

Sme na území Afriky pred takmer 2 miliardami rokov. Vyzerá tu omnoho nehostinnejšie ako dnes – žiadne rastliny ani živočíchy, len skaly, voda a ľudskému oku neviditeľné baktérie. Pred približne 300 miliónmi rokov sa udiala veľká zmena, ktorá výrazne ovplyvnila všetky nasledujúce udalosti na Zemi – v atmosfére sa začal vyskytovať kyslík. Ten zapríčinil okrem iného aj vznik jedného jedinečného fenoménu. Enrico Fermi v roku 1942 totiž nebol prvý, kto zostrojil funkčný jadrový reaktor. Predbehla ho sama príroda asi o 1,8 miliardy rokov. Niekoľko prírodných jadrových reaktorov pracovalo už v dobách, keď baktérie ani len netušili, že niekedy budú po zemi chodiť mnohobunkové stvorenia. Všetko sa to odohralo v oblasti Oklo neďaleko mesta Franceville na juhovýchode Gabonu v rovníkovej Afrike.



Gabon na mape Afriky a približné vyznačenie oblasti Oklo na mape Gabonu

## Náhodné odhalenie

V roku 1956, keď bol Gabon ešte francúzskou kolóniou, boli na jeho území nájdené obrovské zásoby uránu. Ihneď ich začali ťažiť. Všetko vyzeralo v poriadku až do roku 1972. Vtedy si francúzsky analytický chemik Bouzigue pracujúci v závode na výrobu paliva pre atómové elektrárne všimol niečo nezvyčajné – v jednej zo vzoriek bolo množstvo izotopu uránu  $^{235}\text{U}$  o niečo nižšie ako obvykle. V prírode by totiž zloženie uránovej rudy malo byť vždy konštantné, pretože všetok urán vznikol naraz a všade by sa jednotlivé izotopy mali rozpadáť rovnakou rýchlosťou. Izotop  $^{238}\text{U}$  tvorí 99,27 % a izotop  $^{235}\text{U}$  0,7202 % prírodného uránu. V tejto vzorke však bolo izotopu  $^{235}\text{U}$  len 0,7171 %. Na pohľad je to malý rozdiel, len o 0,0031 percentuálneho bodu, ale je významný, pretože mohol znamenať, že niekto niekde vyrába alebo používa jadrové zbrane, pretože takéto množstvo uránu sa nachádza vo vyhorenom jadrovom palive. Zistilo sa, že skúmaná vzorka pochádza z lokality Oklo v Gabone a po objave, že všetok urán v baniach v tejto oblasti má rovnaké zvláštne zloženie, bolo prekvapenie vedcov pomerne veľké. Prečo práve na tomto mieste má uránová ruda iné zloženie izotopov uránu ako všade inde na svete?



Uránová ruda

Vysvetlenie bolo na prvý pohľad jednoduché, ale pomerne kontroverzné – musela tam prebehnúť reťazová jadrová reakcia, taká, aká sa dnes využíva v jadrových elektrárnach na výrobu elektrickej energie. Metódy založené na rozpadoch jadier s dlhým polčasom rozpadu zaradili túto udalosť do obdobia pred približne 1,8 miliardami rokov. Čiže vtedy na východe Afriky fungoval prírodný jadrový reaktor! A keby len jeden – zatiaľ ich objavili 17, pričom 16 z nich sa nachádza v spomínanej oblasti Oklo a jeden v 30 km vzdialenom Bangombe (ale aj tento reaktor býva radený k ostatným do oblasti Oklo).

## Čo sa deje v jadrovom reaktore?

V každom reaktore, či je prírodný alebo vytvorený človekom, sa odohráva reťazová reakcia, počas ktorej dochádza k štiepeniu jadier nestabilných atómov pomocou cudzorodej častice, zvyčajne neutrónu, na dva ľahšie produkty (dva atómy s menším počtom protónov a neutrónov v jadre), pričom sa do prostredia vyžiaria dva až tri neutróny a určité množstvo energie (0,03 nJ energie pri každom štiepení). V tomto prípade dochádza k štiepeniu nestabilného izotopu uránu  $^{235}\text{U}$ , ktorému v porovnaní so svojím stabilným „bratom“ izotopom  $^{238}\text{U}$  chýbajú tri neutróny. Do jadra  $^{235}\text{U}$  sa dostane cudzí neutrón (musí byť tzv. pomalý – musí mať malú energiu), dodá mu energiu a ono sa rozpadne na dve menšie jadrá a uvoľnia sa dva až tri neutróny. Môže to vyzeráť napríklad takto:

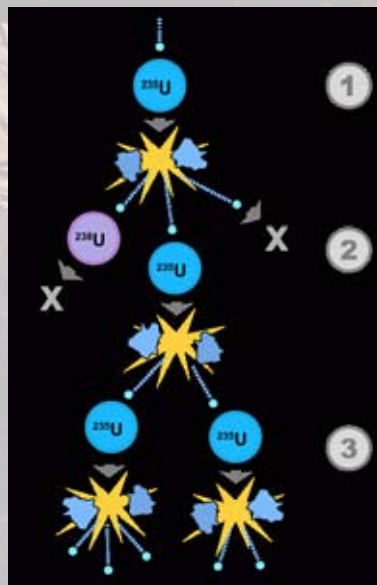
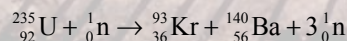


Schéma reťazovej štiepnej reakcie

Tie neutróny, ktoré sa uvoľnia, sú tzv. rýchle, majú veľkú energiu. Ale ak má reakcia pokračovať (aby bola reťazová), musia sa spomaliť odobratím energie, aby sa zvýšila pravdepodobnosť ich zrážky s ďalším atómom uránu. Spomalenie sa odohráva pomocou zrážok s okolitými atómami – u riadených reťazových reakcií v jadrových elektrárnach ide o atómy tzv. moderátora, pričom ním môže byť voda, ťažká voda alebo grafit. Voda zároveň slúži na chladenie, pretože pri štiepných reakciách sa uvoľňuje teplo.

Ak by ale neutróny boli len spomaľované a nereguloval by sa ich počet, došlo by k rýchlemu vzrastu počtu štiepení. Každé rozštiepené jadro uránu by vyprodukovalo dva až tri nové neutróny, čiže by pomocou rozštiepenia jedného jadra došlo k rozštiepeniu ďalších dvoch až troch jadier. Aby sa v elektrárnach situácia nevymkla spod kontroly a nedošlo k výbuchu, počet neutrónov musí byť regulovaný, aby jedno rozštiepené jadro vyprodukovalo len jeden neutrón schopný rozštiepiť iné jadro. Nadbytočné neutróny sú preto odoberané z reakcie napr. pomocou atómov bóru, ktorý je pridávaný vo forme kyseliny borickej alebo pomocou regulačných tyčí, ktoré sú zliatinami ocele a kadmia, prípadne bóru.

## Náročné pre človeka, hračka pre prírodu

Na vznik a priebeh reťazovej štiepnej reakcie treba splniť tri základné podmienky. Musí tam byť dostatočné množstvo izotopu uránu  $^{235}\text{U}$ , moderátor spomaľujúci neutróny a regulátor odoberajúci nadbytočné neutróny. Je takmer nepredstaviteľné, že takéto podmienky mohli nastať v prírode samovoľne, keď pre človeka to ani teraz nie je jednoduché.

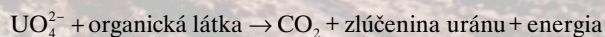


Prírodný jadrový reaktor zblízka

Prvým problémom vyzerá byť množstvo uránu potrebné na spustenie a udržanie reakcie. Nesmieme zabúdať na to, že urán podlieha aj samovoľnému rádioaktívnemu rozpadu, pričom izotop  $^{235}\text{U}$  má polčas rozpadu 0,7 miliardy rokov a izotop  $^{238}\text{U}$  takmer 5 miliárd rokov, čo je doba porovnateľná s vekom Zeme. Preto sa časom znižuje množstvo izotopu uránu  $^{235}\text{U}$  v porovnaní s izotopom  $^{238}\text{U}$ . Preto pred 2 miliardami rokov bolo izotopu  $^{235}\text{U}$  viac ako dnes, tvoril približne 3 % uránovej rudy (v porovnaní so súčasným 0,72 %). A pri takomto množstve už reťazová štiepna reakcia prebiehať môže, pretože aj urán, ktorý je využívaný ako palivo v jadrových elektrárnach, je obohatený izotopom  $^{235}\text{U}$  zvyčajne na úroveň 5 %. Ďalej sa ukázalo, že jadrové reaktory si časť paliva vyrábali sami, a preto mohli využiť viac uránu  $^{235}\text{U}$ , ako tam v skutočnosti bolo. Ak totiž neutrón, ktorý vznikne štiepením, pohltí izotop  $^{238}\text{U}$ , vznikne urán  $^{239}\text{U}$ , ktorý sa premení na plutónium. To má polčas rozpadu približne 24 rokov a mení sa na  $^{235}\text{U}$ .

Kľúčovú úlohu pri vzniku prírodných jadrových reaktorov zohrali organizmy a ich produkt, ktorý sa predtým v atmosfére nevyskytoval – kyslík. Urán je totiž vo vode rozpustný len za prítomnosti kyslíka. Preto, keď sa vo vode začal objavovať kyslík, predtým nerozpustný urán sa v nej začal rozpúšťať. Bol oxidovaný na rozpustný uranyl  $\text{UO}_4^{2-}$ , ktorý bol vyplavovaný z hornín a unášaný spolu s vodou. Na miestach, kde sa potom usadil, vznikli uránové ložiská. Jeho usádzaniu pravdepodobne pomohli organizmy, konkrétne baktérie. Začali využívať uranyl

ako zdroj energie, tak, ako sú v súčasnosti baktériami využívané napríklad sírany či dusičnany podľa schémy:



Organickou látkou bola zvyčajne glukóza a zlúčeniny uránu vznikali rôzne v závislosti od druhu baktérie. Vzniknuté zlúčeniny uránu boli nerozpustné a hromadili sa pri dne. Tak sa na určitých miestach zrazu objavilo veľké množstvo uránu s dostatočným percentuálnym zastúpením izotopu  $^{235}\text{U}$  a reakcia mohla začať.



Konštrukcia uránovej bane, Oklo

Ako moderátor na znižovanie energie neutrónov a ako regulátor na znižovanie počtu neutrónov sa použila voda. Existencia vody ako moderátora nie je prekvapivá, pretože aj v súčasných jadrových elektrárnach sa využíva na tento účel. Jej funkcia ako regulátora je už menej tradičná, fungovala na inom princípe ako klasické regulátory jadrových elektrární. Nebola schopná pohlcovať nadbytočné neutróny, preto sa rozsah reakcie exponenciálne zväčšoval a uvoľňovalo sa čoraz viac tepla. Toto teplo zohrievalo vodu, až kým sa všetka nevyparila. Keď sa vyparila, nemohla fungovať ako moderátor, preto neutróny neboli spomaľované a reakcia sa zastavila. Keď sa reaktor ochladil, aktívna zóna sa zaplnila vodou a reakcia pokračovala. Takto to fungovalo údajne viac ako milión rokov s periódami trvajúcimi 2,5 až 3 hodiny, až kým nekleslo množstvo izotopu uránu  $^{235}\text{U}$  na takú úroveň, že sa reakcia nebola schopná sama udržať.

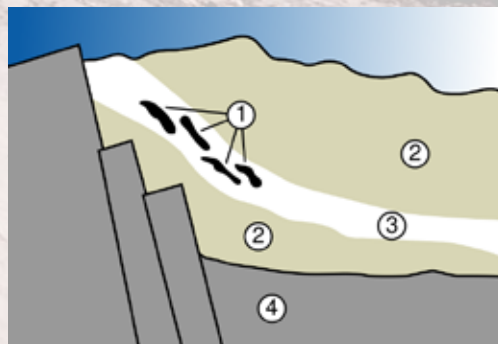


Schéma uloženia jadrového reaktora: 1. jadrový reaktor, 2. vrstvy pieskovca, 3. vrstva uránovej rudy, 4. granit

Zatiaľ je Oklo jedinou lokalitou, kde boli objavené prírodné jadrové reaktory. Nie je však vylúčené, že existovali aj na iných miestach. Je to nielen jedinečný prírodný fenomén, ale aj inšpirácia pre jadrových inžinierov, ako vyriešiť problémy so skladovaním jadrového odpadu. A tiež ukážka toho, že nie všetky ľudské vynálezy sú také unikátne, ako sa nám zdá.

Lenka Veselovská