

Atomová energia*)

BLAHOSLAV STEHLÍK

Z veľkého počtu chemických reakcií, pri ktorých je *premena molekúl* spojená s uvoľňovaním energie, používa sa na výrobu energie prevažne iba jedna. Je to *spaľovanie uhlia*. Uhlie je však vzácna surovina na výrobu rozmanitých potrieb a jeho zásoba nie je nevyčerpatelná. Nakoľko niet inej chemickej reakcie, ktorou by sa dalo spaľovanie uhlia všeobecne nahradiť, obrátila sa pozornosť od premien molekúl *k premenám atómov*, na ktoré upozornil *Becquerlov* objav *rádioaktivity* (1896). *Energia*, ktorá sa uvoľňuje pri premenách atómov, nazýva sa energia *atómová*.

Zatiaľ čo spálením 1 g uhlia sa získa asi 8 tisíc *cal*, uvoľní sa rádioaktívnou premenou 1 g uránu asi 5 miliónov *cal*. Pomer energie k hodnote, z ktorej sa energia uvoľňuje, je pri zmenách atómov veľnásobne väčší ako pri premenách molekúl. Prírodný rádioaktívny rozpad sa však nedá zužitkovať na výrobu energie, nakoľko je príliš pomalý a nedá sa nijako urýchliť. Z 1 g uránu sa uvoľní 1 *cal* asi za 1 rok.

Na technické zužitkovanie neukazovali dlho ani *umelé premeny prvkov*, započaté *Rutherfordom* (1919). Pri týchto premenách sa najprv používaly kladne nabité hmotné častice, a to alebo prirodzené alfa-lúče čiže *hélióny*, alebo umele vyrobené *protóny* a *deuteróny*, ktoré vznikajú vo výbojovej trubici naplnenej vodíkom či deutériom, a ktorým sa udelí veľká rýchlosť v elektromagnetickom poli cyklotrónu. Premena atómu nastane iba vtedy, keď rýchla častica zasiahne jadro. Pravdepodobnosť zásahu je však veľmi malá, nakoľko jadro atómu je pomerne malým terčom a jeho kladný náboj odpudzuje kladne nabitú strelu.

Významným objavom boli preto elektricky nenabitú hmotné častice zvané *neutróny*, ktoré získal *Chadwick* (1932) pôsobením alfa-lúčov z rádia na berýlium. Lepším zdrojom neutrónov je deutérium ostreľované deuteronmi z cyklotrónu. Pri premenách prvkov sú neutróny veľmi účinné, nakoľko nie sú odpudzované kladným nábojom jadra.

Je pozoruhodné, že rýchle neutróny majú všeobecne malú účinnosť. Rýchly neutrón vletí do jadra a vyletí z neho zasa von, pravdaže, už s menšou rýchlosťou. Hovorí sa, že neutrón prestrelí jadro atómu a pritom ho nepoškodí. Rýchlosť vyrobených neutrónov sa preto vopred spomaľuje prechodom cez vhodnú látku zvanú *moderátor*. Najlepším moderátorom bol by vodík podľa fyzikálneho pravidla o výmene rýchlostí pri srážke dvoch rovnako ťažkých guľí. Vodík však s neutroňom reaguje za vzniku deutéria. Najlepším moderátorom je deutérium alebo ťažká voda, avšak aj tuha robí dobré služby. Veľmi pomalé neutróny sú však opäť málo účinné, nakoľko nemajú dost kinetickej energie, aby vznikly do jadra.

Účinnosť neutrónov je preto mimoriadne veľká iba pri určitej rýchlosti, ktorá závisí na akosti ostreľovaného jadra.

Pri umelých premenách neboly výhľady na ich použitie na výrobu atómovej energie, lebo energia potrebná na získanie rýchlych častíc bola veľanásobne väčšia ako energia uvoľnená pri premenených prvkoch. Získaly sa však predbežné znalosti o *jadre atómov*. Tieto znalosti sú doteraz veľmi neúplné a možno aj nie vo všetkom správne.

Podľa *Ivanenka* (1932) je jadro atómu složené z protónov a neutrónov. Tieto dve častice sú iba dvoma rôznymi stavmi častice jedinej, zvanej *nukleón*. Počet protónov v jadre súhlasí s *atómovým číslom* izotópu. Pomerné zastúpenie protónov v jadre ľahkých prvkov sa riadi zásadou parity, u ťažších prvkov sa však posunuje v prospech neutrónov. U prvkov umele vyrobených sa často složené jadro samovoľne upravuje premenou protónu na neutrón alebo opačne, pričom sa rádioaktívne vyžiarí elektrický náboj, a to alebo kladný *pozitrón*, alebo záporný *negatrón*.

Atómová hmota izotópu je vždy menšia ako súčet hmôt nukleónov, lebo pri vzniku jadra z protónov a neutrónov *energia E*, zvaná *väzbová*, ktorá podľa *Einsteinovej teórie* má hmotu $m = E/c^2$, kde *c* je rýchlosť svetla.

Podstata väzby medzi nukleónmi je doteraz záhadná. Nie je povahy elektrickej ani gravitačnej. Pravdepodobne sa na nej zúčastňujú častice, ktoré majú hmotu 100 až 25.000 ráz väčšiu ako elektrón, a ktoré môžu byť elektricky záporné, kladné aj neutrálne. 16 druhov takýchto častíc, zvaných *varitróny*, objavili *Aličaňan* a *Aličanov*, (1949) v kozmických lúčoch. Predtým opisované dva druhy *mezónov*, ktoré aj u nás na Lochmickom štíte pozoroval *Bečvář*, sú iba dvoma druhmi varitrónov. Ohromná energia varitrónov sa prejavuje tým, že atóm, na ktorý narazia, sa rozbiť na niekoľko častí. Na fotografickej platni sa to prejaví tak, že dráha varitrónu sa zakončí hviezdicou, ktorá predstavuje stopy úlomkov. Keďže jeden druh varitrónov sa už vyrába aj umele napr. pôsobením heliónov na uhlík, je nádej, že sa čoskoro objasní aj energia a že sa potom nájde aj nová cesta na výrobu atómovej energie.

Doteraz poznáme iba jednu cestu. Je to *štiepanie ťažkých atómov*, na ktoré sa prišlo — ako zvyčajne — náhodou. Starým ideálom chemikov, ktorí sa chceli presláviť, bolo objavovanie nových prvkov. Dnes už takej príležitosti nemáme, nakoľko všetky miesta v Mendelejevovej tabuľke sú už obsadené a ešte aj 4 prístavky sa urobili. Tieto prístavky plánoval pôvodne *Fermi* (1934). Ostreľoval prirodzený urán neutrónmi a zistil, že vznikly rádioaktívne prvky, ktoré vyžiarovali negatróny so štyrmi rôznymi dobami polovičného rozpadu. Vysvetľoval si to tak, že U 238 sa slúčil s neutrónom na U 239, ktorý sa podľa posunového zákona premenil na prvky s atómovým číslom 93 až 96. Keď však *Curie* (1938) upozornila, že v uráne ožiarenom neutrónmi sa vyskytuje

lantán, zistili *Hahn* a *Strassmann* (1939) podrobnejším štúdiom, že sa tu vyskytujú celé skupiny prvkov, ktoré sú v periodickej tabuľke alebo v okolí kryptónu, alebo xenónu. Dokázali tak, že urán sa neutrónmi štiepa na dve časti síce rozličnými spôsobmi, avšak vždy tak, že atómové hmoty odštiepkov sa majú k sebe v približnom pomere 2:3. O vlnovo-mechanické vysvetlenie tohto nesúmerného štiepania sa pokúsil sovietsky fyzik *Frenkel* (1946). Je pozoruhodné, že súčasne sa odštiepujú 2 až 3 neutróny. Štiepanie uránu sa deje aj samovoľne, lenže nesmierne pomaly, ako upozornil *Petržak* a *Flerov* (1940).

Prirodzený urán obsahuje 99,3% ťažšieho izotópu U 238 a 0,7% ľahšieho U 235, ktorý sa dá oddeliť difúziou a termodifúziou plynného fluóridu. Zatiaľ čo U 238 sa štiepa iba veľmi rýchlymi neutrónmi, štiepa sa U 235 neutrónmi ľubovoľnej rýchlosti.

Aký význam má táto vlastnosť U 235? Predpokladajme pre jednoduchosť, že pri rozštiepnutí 1 atómu sa uvoľnia vždy 2 neutróny. Keď sa samovoľne rozštiepi 1 atóm, uvoľnia sa 2 neutróny, týmito sa rozštiepnu iné 2 atómy, pričom sa uvoľnia 4 nové neutróny, týmito sa rozštiepnu 4 ďalšie atómy, pričom sa uvoľní 8 nových neutrónov a tak sa štiepanie šíri *lavínovite* ďalej. Máme teda typ reakcie, ktorá sa samovoľne rozširuje,

Pri našej úvahe sme však zabudli, že časť neutrónov uniká z hmoty von a tam sa stráca jej účasť na lavínovitej reakcii. Priebeh reakcie závisí preto na *objeme* a *tvare* štiepateľnej hmoty. Pre jednoduchosť uvažujme o guľovom tvare. Množstvo tvoriacich sa neutrónov je úmerné objemu gule a teda tretej mocnине polomeru. Množstvo unikajúcich neutrónov je však úmerné povrchu gule a teda druhej mocnине polomeru. Všeobecne možno povedať, že s rastúcim polomerom gule rastie množstvo tvoriacich sa neutrónov rýchlejšie ako množstvo neutrónov unikajúcich von. Jestvuje preto určitá *kritická veľkosť hmoty*, pri ktorej prebieha reakcia rovnomernou rýchlosťou. Keby sa pri štiepaní atómu uvoľňovali vždy iba 2 neutróny, bola by kritická veľkosť hmoty tá, pri ktorej by unikalo 50% neutrónov von. Z neutrónov vzniklých pri každom štiepaní, zužitkoval by sa na ďalšie štiepadnie vždy iba 1. Môžeme sa vyjadriť tak, že pri kritickvej veľkosti hmoty majú neutróny *rozmnožovací koeficient* rovný 1, a reakcia preto prebieha rovnomerne. Pri nadkritickvej veľkosti je rozmnožovací koeficient neutrónov väčší ako 1 a reakcia sa zrýchľuje, pri podkritickvej veľkosti je rozmnožovací koeficient menší ako 1 a reakcia uhasína.

Keď chceme, aby reakcia prebiehala rovnomerne, vypočítame si vopred kritickú veľkosť hmoty. Čo sa stane, keď pri výpočte urobíme chybu 0,1% a rozmnožovací koeficient bude 1,00? Neutrón, ktorý vznikne štiepaním, reaguje s iným atómom asi za 10^{-6} sek. V každej stotisícinej sekundy vzrastie počet neutrónov $1,001^{1000} \doteq 3$ razy. V zlomku sekundy môžeme preto očakávať *výbuch* atómovej bomby, ktorú sme vyrobili nechceli.

Zľakli sme sa však zbytočne. Naozaj sa to nestane, lebo pri úvahe sme zabudli na jeden šťastný prírodný úkaz. Asi 1% neutrónov nevzniká štiepaním, ale rádioaktívnym rozpadom odštiepkov., ktorý trvá priemrne 7 sekúnd. Asi 1% neutrónov vzniká teda *oneskorene*.

Keď usporiadame štiepatelnú hmotu tak, aby rozmnožovací koeficient všetkých neutrónov bol menší ako 1,01, je rozmnožovací koeficient odštiepovaných neutrónov menší ako 1. Odštiepnuté neutróny nemôžu teda samy spôsobiť lavínovitú reakciu. Musia čakať niekoľko sekúnd na oneskorené neutróny, aby sa celková bilancia neutrónov doplnila tak, že rýchlosť reakcie môže vzrastať. Čas niekoľkých sekúnd je dostatočne dlhý, aby sme mohli regulovať rýchlosť reakcie v atómovom reaktore.

Reaktor sa skonštruuje tak, aby rozmnožovací koeficient neutrónov bol asi 1,005. Keď pozorujeme, že sa reakcia zrýchľuje, zasúvame do reaktora kadmiovú tyč, ktorá neutróny pohlcuje. Keď sa potom reakcia spomaľuje, urýchľujeme ju vysúvaním tyče. Tomu, kto má na starosti túto reguláciu, dáva sa vraj všeličo zapisovať, aby pri práci nezaspal.

U 235 je jediné prirodzené palivo pre reaktory. Nakoľko jeho izolácia je veľmi zdĺhavá a nákladná, používa sa radšej umelé palivo, ktorým je *plutónium*.

Plutónium sa vyrába pôsobením neutrónov na U 238 v *uránovo-tuhovom reaktore*. Tyče z prirodzeného uránu sa zasunú do tuhového muriva a reakcia prebieha samovoľne. O jej započatie sa postará neutrón, ktorý vznikol samovoľným štiepaním.

Keby v reaktore nebolo tuhy, zmenšovali by neutróny svoju rýchlosť srážkami až na hodnotu 38 eV, pri ktorej by potom všetky reagovaly s U 238 za konečného vzniku plutónia. Srážky so vzácnym U 235 boly by málo pravdepodobné. A tieto srážky práve potrebujeme na výrobu ďalších neutrónov.

Aby sme pochopili význam tuhového muriva, sledujeme osudy neutrónov pri rozbitej reakcii! Keď neutróny vzniknú štiepaním, majú rýchlosť síce veľkú, ale nie natoľko, aby sa nimi rozštiepil U 238. Tieto neutróny vyletia z tyče do tuhy, kde sa ich rýchlosť spomalí natoľko, že pri opätovnom vniknutí do uránovej tyče iba ich časť spôsobuje premenu U 238 na plutónium. Druhá časť má rýchlosť už takú malú, že s jadrami U 238 vôbec nereaguje a odráža sa od nich tak dlho, až sa stretne alebo so vzácnnejším U 235, alebo s vytvoreným už plutóniom. Spôsobí tak jeho rozštiepnutie za vzniku nových neutrónov, ktoré majú ten istý osud, aký sme práve opísali.

Na priebehu reakcie je pozoruhodné to, že štiepaniu podlieha aj plutónium. Výťažok plutónia sa však tým mezmenšuje, ale naopak zväčšuje sa, lebo za 1 rozštiepnutý atóm dostaneme napokon 2 až 3 atómy nové. Keby nebolo tohto *samoplodenia* plutónia, získali by sme z prirodzeného uránu najviac toľko plutónia, koľko

bolo U 235, t. j. 0,7%. Samoplením sa však výtazok plutónia zvýši päťnásobne, t. j. na 3,5%. Plutónium sa potom od uránu oddeľ chemicky.

Uránovo-tuhový reaktor je pozoruhodný tým, že atómová energia sa tu uvoľňuje spôsobom, pri ktorom sa atómové palivo nespotrebuje, ale naopak, tvorí sa.

Atómová energia, ktorá sa v reaktoroch uvoľňuje, vzniká z rozdielu medzi väzbovou energiou jadier paliva a splodín štiepania. Väzbová energia E je u všetkých prvkov približne úmerná počtu nukleónov v jadre, čiže hmotovému číslu A . Pomer $E \times A$ je teda približne konštantný. Jestvujú však menšie rozdiely. Jadrá počtu nukleónov v jadre, čiže hmotovému číslu A . Pomer $E \times A$ 8,5 MeV. zatiaľ čo urán asi 7,5 MeV. Pri štiepaní uránu sa teda uvoľňuje energia asi 1 MeV na 1 nukleón. Výpočet ukazuje, že rozštiepaním 1 g U 235 sa uvoľní asi 20 miliárd cal.

Svetová spotreba tepelnej energie za 1 rok sa odhaduje na 300 miliónov ton uhlia. Túto spotrebu by uspokojilo asi 150 ton atómového paliva. Pri terajšom spôsobe výroby plutónia by sa spotrebovalo 4000 ton prirodzeného uránu. Je to už pokrok oproti používaniu U 235, ktoré vyžadovalo spotrebu 20.000 ton prirodzeného uránu.

Konajú sa pokusy aj o využitie väčších zásob tória, z ktorého možno vyrobiť iné atómové palivo U 233.

Reaktory, ktoré doteraz bežia, slúžia jednak na výrobu plutónia, jednak ako výborný zdroj neutrónov na výrobu rozmanitých rádioaktívnych izotópov. Tieto izotópy sa používajú v lekárstve na miestne ožarovanie, v biológii na stopovanie výmeny látok a v analytickej chémii ako indikátory pri rádiometrickej metóde.

Nás však najviac zaujíma *technické zužitkovanie atómovej energie*, ktoré mie je doteraz vyriešené. Pri odvádzaní tepla vedným vzniká ťažkosť v tom, že technik by rád umiestil potrebné potrubie do vnútra reaktora, čo sa však nepáči nukleonikovi, nakoľko by za to zasahovalo do jeho hospodárenia s neutrónmi. Ideálnejší spôsob bol by ten, že by potrubím cirkuloval kvapalný reaktor, napr. roztok soli plutónia v ťažkej vode, ktorá by mala úkol moderátora. Keby sa použitím karbidu plutónia a tuhy podarilo zostrojiť reaktor pracujúci pri vysokej teplote, mohlo by sa teplo odvádzat' sálaním.

Elektrické náboje odštiepkov umožňujú priamo vyrábať elektrický prúd. Prvý pokusný generátor, ktorý zostrojili Lobanov a Belakov (1945), vyrába však prúd s intenzitou iba 10^{-9} ampérov. Ťažkosť je v tom, že sa zužitkuje iba povrch reaktora, nakoľko vo vnútri majú odštiepky dráhu doletu iba 0,006 mm a preto sa pohlcujú.

Dokonalú centrálu atómovej energie máme doteraz iba jednu. Volá sa *Slnce*. Prebieha tu kruhová reakcia, ktorú možno opísať tak, že 4 vodíky sa slučujú na hélium za katalytického pôsobenia uhlíka. Pretože štvornásobok atómovej hmoty vodíka je 4,032,

zatial čo atómová hmota hélia je 4,004, potom hmota vyjadrená rozdielom 0,028 prislúcha uvoľnenej energii. Výpočet podľa Einsteinoého vzorca ukazuje, že premenou 1 g vodíka na hélium sa uvoľní 630 miliárd *cal*, t. j. 130 ráz viacej ako rozštiepaním 1g uránu.

Keby sa podarilo napodobiť slnečný spôsob výroby atómovej energie, malo by to veľké výhody. Zásoba vodíka je nevyčerpatelná. Pre vyrobené hélium by sa našlo dost použitia. Ani surovina ani výrobok by neohrozovaly ľudské zdravie rádioaktívnym žiarením, ako je to pri štiepaní ťažkých atómov.

Reťazová reakcia na Slnce je umožnená ohromne vysokou teplotou, pri ktorej majú vodíkové jadrá taký prudký tepelný pohyb, že sú reaktívne. Nakoľko však nemáme možnosť pracovať pri takých vysokých teplotách, bude treba nájsť pre premenu vodíka na hélium iný vhodnejší reakčný mechanizmus. Podľa novinových správ prišli už na čosi v Amerike. Keďže však svoj objav súčasne zneužili konštrukciou vodíkovej bomby, nemôžeme ich pochváliť.

Vedci celého sveta stoja pred významným problémom *mirového využitia* atómovej energie. Úsilie vynikajúcich vedcov v kapitalistických krajinách je však hatené jednak usmernením ich práce na výrobu bômb pre americkú zastrašovacíu politiku, jednak nezáujmom priemyslu ovládaného vykorisťovateľskou triedou. Mierové využitie atómovej energie môže viesť k zvýšeniu všeobecnej životnej úrovne iba v socialistickom štáte. Preto sa vo výskumoch tohto využitia ujali vedenia sovietskí vedci, ktorí si síce tiež už búchli, lenže nie preto, aby hromadne zabíjali ľudí, ale preto, aby obrátili tok sibírskych riek a zúrodnili zakaspickú púšť. Aj v našej republike máme uránové ložiská. A sme šťastní, že toto bohatstvo nám umožňuje, aby sme prispeli k pokroku v tábore mieru.

NOVÉ KNIHY A ČASOPISY

Zo zahraničnej literatúry.

An Introduction to chromatography. (Úvod do chromatografie.) Trevor I. Williams, str. 96, Cena Kčs 80.—

Blackie and Son, Ltd, London—Glasgow 1948.

Knižka, ktorá prístupným spôsobom podáva základy praktickej a teoretickej chromatografie. Určená hlavne študentom a výskumným pracovníkom ako základ k ďalšiemu štúdiu.

Úvodom autor oceňuje zásluhy geniálneho ruského botanika Michaila Semenoviča Cvjeta, ktorý svojimi prácami pri štúdiu listovej zelene položil základ klasickej chromatografii. Ďalej opisuje základné princípy chromatografie, používané, rozpúšťadlá a