

obyčajných vodíkových atómov, protónov. Mnohokrát opakovanou elektrolyzou vody podarilo sa neskoršie získať väčšie množstvo ťažšieho izotopu vodíka a zistilo sa, že má síce rovnaké chemické vlastnosti ako obyčajný vodík, ale že jeho fyzikálne vlastnosti aj fyzikálne vlastnosti jeho zlúčenín sú zreteľne odlišné. Dostal preto osobitné meno *deutérium* (chem. značka D) a jadrá jeho atómov sú tzv. deuteróny. V obyčajnom vodíku 1 atóm D pripadá asi na 6 000 atómov H. Neskoršie sa zistilo, že vodík má ešte jeden izotop H_1^3 alebo T_1^3 , nazývaný tritium, významný najmä pri umelých premenách prvkov, čím sa budeme zaoberať v niekoľkých ďalších paragrafoch.

16.9. Umelá premena prvkov, objav neutrónu a pozitronu. Po objavení (prirodzenej) rádioaktivity prvkov nachádzajúcich sa na posledných miestach v periodickej sústave prvkov konali sa rozličné pokusy, ktoré mali ukázať, či možno mať vplyv na rýchlosť a priebeh samovoľného rozpadu nestálych a preto rádioaktívnych atómových jadier. Zistilo sa, že na rýchlosť rádioaktívneho rozpadu nemá pozorovateľný vplyv ani použitie veľmi vysokých tlakov a teplôt, ani veľmi silných elektrických alebo magnetických polí. Pre túto príčinu v prvých dvoch desaťročiach nášho storočia rádioaktivita sa síce považovala za veľmi zaujímavý a pre poznanie zloženia hmoty veľmi významný prírodný jav, ale súčasne prevládalo presvedčenie, že pre nemožnosť ovládania rádioaktívnej premeny prvkov nemôže mať tento jav nijaký pozoruhodnejší praktický význam. V tejto situácii neobyčajným prekvapením bol objav Rutherfordov, ktorý r. 1919 po prvý raz pozoroval ovládateľnú premenu atómových jadier, v tomto prípade prvku o malej atómovej hmotnosti, dusíka.

Pri svojich pokusoch vzťahujúcich sa na dobeh α -žiarenia v rôznych plynch Rutherford zistil, že keď sa vhodný zdroj rádioaktívneho α -žiarenia nachádza v dusíku, pomocou spintariskopu možno pozorovať scintilácie vo vzdialenosti aj podstatne väčšej ako v prípade, keď spintariskop pri rovnakej teplote a tlaku je naplnený kyslíkom alebo kysličníkom uhličitým. Rutherford vyslovil hneď domnienku, že príčinou týchto scintilácií je nové žiarenie, vznikajúce pri zrážkach α -častíc s jadrami dusíka. Pokusy vykonané vo Wilsonovej komore za použitia aj magnetického poľa domnienku Rutherfordovu potvrdili a ukázali, že pri bombardovaní dusíkových jadier α -časticami uvoľňujú sa z jadier dusíka protóny podľa rovnice



Medzi veľkým počtom fotografií dráh α -častíc v dusíku našli sa ojedinelé prípady, keď koniec stopy α -častice bol rozvetvený a bolo možné dokázať, že dlhšia vetva takejto vidlice je stopa protónu, takže kratšia mohla značiť len

dráhu jadrovou reakciou vytvoreného a do mohutného pohybu uvedeného kyslíkového jadra O_8^{17} . Doba takto vznikajúcich protónov vo vzduchu za normálnych podmienok je asi 40 cm.

Podobné jadrové reakcie boli neskoršie objavené pri väčšom počte ľahkých prvkov. Prebiehajú podľa rovnice $P_Z^a + \alpha_2^4 = P_{Z+1}^{a+3} + p_1^1$.

Je veľmi významné, že pri týchto a podobných jadrových reakciách nie je prakticky nikdy splnený zákon rovnosti pokojovej hmotnosti do jadrovej reakcie vstupujúcich a reakciou vznikajúcich častíc. Táto okolnosť v zmysle princípu ekvivalencie hmotnosti a energie značí, že vo všeobecnosti pri umeľých, t. j. nie samovoľných jadrových reakciách, energia sa alebo uvoľňuje, alebo sa spotrebuje, kým pri samovoľne prebiehajúcich jadrových reakciách energia sa pochopiteľne vždy uvoľňuje. Každá jadrová reakcia, samovoľná i vynútená, vyznačuje sa teda tzv. hmotnostným úbytkom $-\Delta m$, rovnajúcim sa rozdielu celkovej hmotnosti pred jadrovou reakciou a po nej. Pri jadrovej reakcii sa uvoľňuje energia, ktorá je s týmto hmotnostným úbytkom rovnocenná. Pri úplnom písaní rovnice jadrovej reakcie treba ju v rovnici vyznačiť.

Ako príklad vyšetříme energetické zafarbenie E prvej umele uskutočnenej jadrovej reakcie $N_7^{14} + \alpha_2^4 = O_8^{17} + p_1^1 + E$. Pri počítaní tejto energie bude ľahostajné, či budeme počítat s hmotnosťami jadier alebo s hmotnosťami elektricky neutrálnych atómov, lebo v rozdiel hmotností atómov pred reakciou a po reakcii hmotnosti elektrónov sa rušia. V našom prípade presné hodnoty do úvahy prichádzajúcich atómových hmotností sú: $N = 14,007\ 53$, $He = 4,003\ 86$, $O = 17,004\ 50$, $H = 1,008\ 13$, takže pri reakcii nastávajúci hmotnostný úbytok je

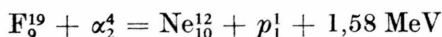
$$-\Delta m = (18,011\ 39 - 18,012\ 63) u = -0,001\ 24u$$

kde $u = 1,660 \cdot 10^{-24}$ g je atomistická jednotka hmotnosti, ktorej — podľa vzťahu $E = mc^2$ — zodpovedá energia 931,2 MeV. Podľa týchto údajov energetické zafarbenie reakcie $N_7^{14}(\alpha, p) O_8^{17}$ je

$$E = -0,001\ 24 \cdot 931,2\ \text{MeV} = -1,15\ \text{MeV}$$

Energetické zafarbenie reakcie možno vypočítať aj z rýchlosti dusíkového jadra bombardujúcich α -častíc a z rýchlosti vznikajúcich protónov pri rešpektovaní zákona o zachovaní hybnosti. Dobrá zhoda výsledkov vypočítaných obidvoma spôsobmi predstavuje najpresvedčivejšie experimentálne potvrdenie princípu ekvivalencie hmoty a energie.

Je pozoruhodné, že jestvujú pomocou prirodzeného rádioaktívneho α -žiarenia umele uskutočniteľné jadrové reakcie aj s kladným energetickým zafarbením. Takou je napríklad reakcia



Pravda, premena prvkov pomocou rádioaktívneho α -žiarenia je umelou premenou len v tom zmysle, že môže byť uskutočnená vhodným zásahom experimentátora. V skutočnosti ona celkom umelou nie je, lebo dochádza k nej pôsobením produktu prirodzeného rádioaktívneho rozpadu atómových jadier niektorých izotopov ťažkých prvkov. Objavila sa preto čoskoro snaha obísť sa pri vynútených premenách prvkov bez rádioaktivity a nahradiť α -žiarenie umele urýchlenými atómovými jadrami ľahkých prvkov, napríklad protónmi. Používanie umele urýchlených protónov v porovnaní s prirodzeným rádioaktívnym α -žiarom sľubovalo dve výhody: 1. pre svoj menší elektrický náboj môžu protóny vniknúť do bombardovaných jadier aj pri rovnakej energii s väčšou pravdepodobnosťou ako α -častice, 2. protóny možno mať pri používaní vhodných urýchľovačov v podstatne väčšom množstve ako α -častice z prirodzených zdrojov. Napríklad iónový prúd protónov o intenzite 10^{-3} A predstavuje vznik $6 \cdot 10^{15}$ protónov za sekundu, zatiaľ čo aj pri používaní veľmi silných prirodzených zdrojov rádioaktívneho žiarenia podarilo sa získať najviac asi len 10^9 α -častíc za sekundu. Najmä posledná okolnosť je veľmi významná, lebo pri bombardovaní atómových jadier časticami prirodzeného rádioaktívneho korpuskulárneho žiarenia alebo umele urýchlenými atómovými jadrami len nepatrná ich časť sa dostane do bezprostrednej blízkosti jadier bombardovaného prvku skôr, ako je zabrzdená v elektrónovom obale atómov.

Prvú v plnom zmysle tohoto slova umelú premenu prvku uskutočnili až Cockroft a Walton r. 1932 bombardovaním lítia v elektrickom poli urýchlenými protónmi. Vyjadruje ju rovnica



Dnes sa umelá premena prvkov pomocou atómových jadier urýchlených v rozličných urýchľovačoch iónov robí už veľmi všeobecne. Ako strely sa najviac používajú jadrá obyčajného a ťažkého vodíka a jadrá héliových atómov, v poslednom čase ojedinele i jadrá ťažších prvkov.

Umelá premena prvkov bombardovaním ich jadier α -časticami prirodzeného rádioaktívneho α -žiarenia viedla k objavu nového druhu elementárnych častíc, t. j. častíc, ktoré nemožno považovať za zložené z častíc ešte menších. R. 1930 zistili Bothe a Becker, že pri bombardovaní berýlia α -časticami vzniká veľmi prenikavé žiarenie. Pôvodne sa predpokladalo, že toto žiarenie je veľmi tvrdé γ -žiarenie vznikajúce podľa rovnice $\text{Be}_6^9 + \alpha_2^4 = \text{C}_6^{13} + h\nu$. Anglický fyzik J. Chadwick energetickými úvahami r. 1932 dospel však k presvedčeniu že pri bombardovaní berýlia α -časticami vznikajúce žiarenie nie je γ -žiarenie ale nový druh korpuskulárneho žiarenia, prúd elektricky neutrálnych častíc, ktoré boli preto nazvané *neutrónmi*. Keďže okrem toho — ako sa ukázalo — ich hmotnosť sa rovná približne hmotnosti protónov, ich značka je n_0^1 . Podľa

toho rovnica vyjadrujúca jadrovú reakciu, pri ktorej boli neutróny po prvý raz pozorované, je správne



Pri zrážkach neutrónov s jadrami atómov, ak nedôjde k jadrovej reakcii, platia zákony zrazu pružných gúľ, zákon o zachovaní mechanickej energie a zákon o zachovaní hybnosti. Podľa týchto zákonov keď v_0 je počiatočná rýchlosť neutrónov, pri centrálnom zraze rýchlosť neutrónom odrazeného jadra je

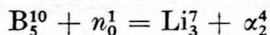
$$v = \frac{2m_n}{m_n + m} v_0$$

kde m_n je hmotnosť neutrónu a m hmotnosť neutrónom centrálnne odrazeného jadra. Práve napísaný vzorec umožňuje vypočítať hmotnosť neutrónu. Podľa najnovších meraní hmotnosť neutrónu je $m_n = 1,008\ 66$. Je teda o niečo väčšia ako hmotnosť protónu $m_p = 1,007\ 27$.

Voľný neutrón je nestály. S polčasom asi 30 minút rozpadá sa na protón, elektrón a tzv. *neutrino*, elektricky neutrálnu časticu s nulovou pokojovou hmotnosťou.

Je veľmi významné, že aj neutróny sú schopné spôsobovať jadrové premeny, pričom pravdepodobnosť ich priblíženia sa k atómovému jadru je značná, lebo ako častice elektricky neutrálne nie sú atómovými jadrami odpudzované. Jadrové premeny sú schopné spôsobovať neutróny rýchle aj tzv. *termické neutróny*, ktorých rýchlosť je určená tými istými vzorcami ako neusporiadaný tepelný pohyb atómov. Rýchle neutróny možno spomalíť, keď ich prúdu dáme do cesty tzv. *moderátor*, látku obsahujúcu mnoho ľahkých prvkov, avšak takých, že s ich jadrami neutróny nereagujú. Podľa zákonov mechaniky pri zrážkach s jadrami takýchto prvkov strácajú neutróny značnú časť svojej pohybovej energie.

Neutróny, pretože sú to častice bez elektrického náboja, takže sa nevyznačujú ionizačným účinkom, bezprostredne sa neprejavujú. Na detekciu neutrónov sa preto používajú vhodné jadrové reakcie, napríklad reakcia



Pri využívaní tejto reakcie steny ionizačnej komory sa opatria vrstvou vhodnej zlúčeniny bóru. Keď jadro bóru pohltí neutrón, vyšle α -časticu, ktorá sa prejaví svojim mohutným ionizačným účinkom.

16.10. Objav kozmického žiarenia a umelá rádioaktivita. Štúdiom ionizácie atmosférického vzduchu v rozličných výškach aj vzduchu v pozoruhodných hĺbkach pod zemským povrchom sa zistilo, že zo svetového priestoru dopadá