

## 9 Jadro atómu

### 9.1 Úvod

Z pozorovaní rádioaktívnych látok vyplynulo, že aspoň niektoré jadrá musia mať vnútornú štruktúru, teda musí ich tvoriť súbor ešte jednoduchších častíc.

Keďže už bolo známe, že jadro atómu je nositeľom celého jeho kladného náboja, fyzici sa snažili nájsť najmenšiu kladne nabitú časticu, akýsi "kladný elektrón". To sa podarilo Rutherfordovi, ktorý našiel najmenšiu kladnú časticu s hmotnosťou skoro rovnou hmotnosti atómu vodíka, muselo teda ísť o vodíkové jadro. Jej elektrický náboj sa presne rovná náboju elektrónu, ale je kladný a jeho hmotnosť je 1836,11-krát väčšia ako hmotnosť elektrónu. Túto časticu nazval Rutherford **protón** (z gréčtiny: prvý), pretože je najľahšia a tvorí jadro prvého prvku periodickej tabuľky - vodíka.

Jadrá, ktoré je možné pokladať za hlavnú časť atómov, sa vzájomne líšia svojou hmotnosťou a veľkosťou kladného náboja, ktorá sa dá vyjadriť ako  $n$ -násobok elementárneho náboja. Moseley prišiel s myšlienkou, že číslo  $n$  sa pri každom posune v periodickej tabuľke prvkov o jeden prvok ďalej zvyšuje o jednotku. Vodík - prvý prvok v tabuľke, má jadro, ktoré tvorí jediný protón, teda  $n=1$ , pre hélium - druhý prvok,  $n=2$ , nasledujúci prvok - lítium má  $n=3$ , atď. Číslo  $n$  nazval Moseley **atómovým číslom** prvku (dnes sa užíva názov **protónové číslo**) a označuje sa  $Z$ . Ak usporiadame prvky podľa ich rastúceho atómového čísla, bude každý prvok bez výnimky v jemu príslušnej skupine Mendelejevovej periodickej tabuľky prvkov a ak majú dva prvky atómové čísla líšiace sa o jednotku, nemôže medzi nimi existovať žiaden ďalší dosiaľ neznámy prvok. Čoskoro bolo tiež zrejmé, že tak ako záporné elektrické náboje sú presnými násobkami náboja elektrónu, všetky kladné náboje sú presnými násobkami náboja protónu. Aby sme dostali výsledok zhodný s pozorovaním, je treba okrem protónov ešte uvažovať v jadre častice, ktoré majú hmotnosť ako protón, nulový náboj a poločíselný spin. Pre takúto elektricky neutrálnu časticu sa ujal názov **neutrón**. K objavu neutrónu došlo v roku 1932. Tým bola vyriešená otázka zloženia jadra - **jadro sa skladá z protónov a neutrónov**.

### 9.2 Hmotnosť jadra, väzbová energia

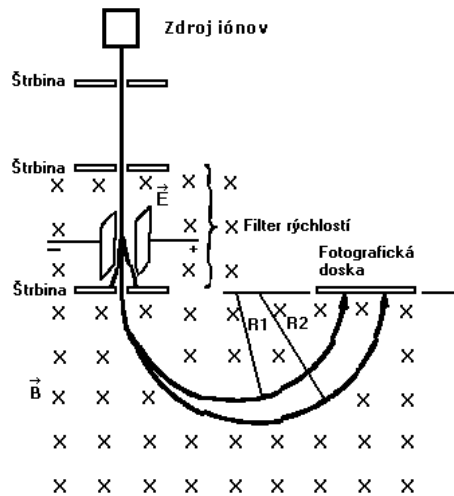
Počet protónov v jadre sa vyjadruje protónovým (atómovým) číslom  $Z$ , počet všetkých častíc jadra - teda protónov a neutrónov, ktoré sa jedným slovom nazývajú nukleóny (nukleus - jadro), sa vyjadruje **hmotnostným číslom**  $A$ . Ak poznáme hmotnosti protónu a neutrónu -  $m_p$ ,  $m_n$ , **hmotnosť jadra**  $m_j$

vypočítame:

$$Zm_p + (A - Z)m_n = m_j, \quad (9.1)$$

kde rozdiel  $A - Z$  určuje počet neutrónov v jadre.

Takto vypočítanú hodnotu potom možno porovnať s nameranou hodnotou hmotnosti jadra. Na meranie hmotností nabitých častíc, a teda i atómových jadier, slúži tzv. hmotnostný spektrometer. Jeho schéma je na Obr. 9.1. Dvojica štr-



Obr. 9.1

bín kolimuje zväzok kladných iónov (jadier), aby všetky leteli v jednom smere, potom jadrá prechádzajú filtrom rýchlosti. Ten sa vytvára homogénnymi elektrickými a magnetickými poľami, pričom vektor intenzity elektrického poľa a vektor indukcie magnetického poľa sú na seba kolmé a sú kolmé i na zväzok iónov. Elektrické pole s intenzitou veľkosti  $E$  pôsobí na zväzok s nábojom  $q$  silou veľkosti  $qE$  a magnetické pole s indukciou veľkosti  $B$  silou veľkosti  $Bqv$ , kde  $v$  je rýchlosť kladných iónov. Smery síl sú opačné, čím sa dosiahne, že k štrbine na druhom konci filtra dôjdu iba ióny, ktoré sa nevychýlili a tak všetky majú rovnakú rýchlosť, pre ktorú z rovnosti veľkosti sily elektrického a magnetického poľa máme  $v = \frac{E}{B}$ . Prejdúc štrbinou, ióny vojdú do homogénneho magnetického

poľa s indukciou kolmou na smer ich rýchlosti a budú sa teda pohybovať po kruhových dráhach, ktorých polomer (z podmienky rovnosti dostredivej a magnetickej sily) je rovný  $R = \frac{mv}{qB}$ . Keďže  $q$ ,  $B$  a  $v$  poznáme, umožňuje meranie  $R$  určiť hmotnosť  $m$  iónu.

Presné merania hmotnosti jadier ukázali, že ich hmotnosť  $m$  je vždy menšia, ako je hmotnosť vypočítaná podľa (9.1) a

$$Zm_p + (A - Z)m_n - m_j = \Delta m,$$

je tzv. **hmotnostný schodok**.

Zo špeciálnej teórie relativity si pamätáme ekvivalenčný vzťah medzi energiou a hmotnosťou, takže hmotnostnému schodku bude prislúchať energia:

$$\Delta E = \Delta mc^2.$$

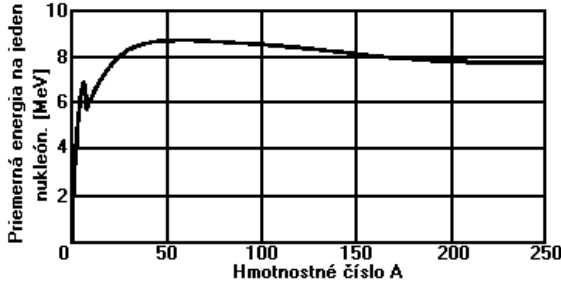
Táto energia je spotrebovaná na to, že jadro drží pokope, je to tzv. **väzbová energia**. Sila, ktorá drží spolu kladné protóny a elektricky neutrálne neutróny musí byť silnejšia ako je elektrostatické odpudzovanie medzi protónmi, je to jedna zo základných síl - interakcií v prírode, tzv. **silná sila**. Ako hovorí jej názov, je to najsilnejšia sila v prírode, ale má veľmi krátky dosah, práve taký, ako je rozmer jadra, takže ak opustíme jadro, túto silu už nepozorujeme. Pri určovaní rozmerov jadra (pomocou rozptylových experimentov s elektrónmi, podobných Rutherfordovmu s  $\alpha$  časticami) sa zistilo, že objem jadra je vždy úmerný počtu nukleónov, ktoré obsahuje, t.j. hmotnostnému číslu  $A$ . Ak je polomer jadra  $R$ , objem je  $(4/3)\pi R^3$  a  $R^3$  je tak úmerné  $A$ . Tento súvis sa obvykle uvádza v opačnom tvare:

$$R = R_0 A^{1/3}, \quad R_0 \approx 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}.$$

Polomery jadier majú veľkosť rádovo  $10^{-15}$  až  $10^{-14}$  m, čo je aj dosah silnej interakcie.

Zo známych hodnôt hmotnosti jadra a jeho rozmerov môžeme vypočítať hustotu jadrovej hmoty ako podiel hmotnosti a objemu. Vychádza číslo rádu  $10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>, čo je obrovská hustota.

Vrátíme sa teraz k väzbovej energii, bude nás zaujímať jej veľkosť. Najprv zavedieme niektoré nové jednotky, ktoré sa používajú v mikrosvete. Unifikovaná hmotnostná jednotka  $u$  je 1/12 hmotnosti jadra uhlíka  $^{12}_6\text{C}$ ,  $1u = 1,66 \cdot 10^{-27}$  kg. Jednotkou energie je 1 elektrónvolt a jeho násobky. Elektrónvolt je energia, ktorú získa jeden elektrón, ak v pozdĺžnom elektrostatickom poli prejde medzi dvomi bodmi, medzi ktorými je potenciálový rozdiel jeden volt,  $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$  J.

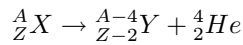


Obr. 9.2

Používajú sa násobky napr.  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ . Energia odpovedajúca jednej unifikovanej hmotnostnej jednotke  $E(1u) = m(1u)c^2 = 938,1 \text{ MeV}$ . Na Obr. 9.2 je závislosť väzbovej energie pripadajúcej na jeden nukleón jadra od hmotnostného čísla. Z tohto obrázka je vidieť, že veľkosť väzbovej energie pripadajúcej na jeden nukleón narastá až po nasýtenú hodnotu, ktorú nadobudne pomerne rýchle, a má hodnotu asi  $8 \text{ MeV}$ . Takouto energiou je v priemere držaný v jadre jeden jeho nukleón. Ak túto energiu prepočítame do jednotiek SI, dostaneme hodnotu  $8 \cdot 10^{14} \text{ J/kg}$ , pričom napr. teplo získané spálením  $1 \text{ kg}$  benzínu je asi miliónkrát menšie.

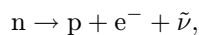
### 9.3 Prirodzená rádioaktivita

Prirodzená rádioaktivita (rádioaktívna premena) je jav, kedy sa prvok samovoľne mení na iný prvok, teda mení sa aspoň jedno z čísel  $A$  a  $Z$ . Vieme, že sú dva druhy rádioaktivity -  $\alpha$  a  $\beta$ . Pri  $\alpha$  rádioaktivite sú z jadra vyžarované jadrá hélia, ktoré sa skladajú z dvoch protónov a dvoch neutrónov, teda v tomto prípade sa mení aj hmotnostné číslo - znižuje sa o 4, aj protónové číslo, ktoré sa znižuje o 2:



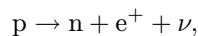
$\beta$  rádioaktivita je:

1. Premena neutrónu v jadre na protón:



ktorá musí byť sprevádzaná vznikom zápornej častice, aby bol splnený zákon zachovania náboja. Tou časticou je elektrón. Navyiac, ako sa ukázalo z energetického rozdelenia, musí tu vzniknúť ešte jedna častica, ktorá unáša energiu, a tou je neutrálne antineutríno. V tomto prípade hmotnostné číslo sa nemení a protónové vzrastá o 1.

2. Premena protónu v jadre na neutrón:



pričom vzniká antičastica elektrónu - pozitron a neutríno. Opäť sa hmotnostné číslo nemení a protónové číslo teraz klesá o 1.

*Stretli sme sa tu s antičasticami. **Antičastice** majú rovnakú hmotnosť a spin ako ich odpovedajúce častice, ale majú opačný náboj a niektoré ďalšie vlastnosti popísané kvantovými číslami, o ktorých sme nehovorili. Prvýkrát ich teoreticky predpovedal Dirac v 30. rokoch, keď riešil Schrödingerovu rovnicu pre relativistický elektrón - tzv. Diracovu rovnicu, a získal pre energiu (a teda aj hmotnosť) dve riešenia, jedno z nich záporné a toto pripísal existencii antičastíc. Keď sa stretne častica so svojou antičasticou, dôjde k ich anihilácii, to znamená, že častice prestanú existovať a vzniká energetické elektromagnetické žiarenie. Deje sa to presne v zmysle Einsteinovej relativistickej rovnice  $E = mc^2$ , ktorá vyjadruje ekvivalenciu medzi hmotnosťou a energiou.*

Rádioaktívna premena sa vyznačuje ešte niečím novým - nie je zaň zodpovedná žiadna zo základných interakcií, o ktorých sme hovorili doteraz, ale ďalšia - štvrtá a posledná zo základných síl prírody - tzv. **slabá interakcia**. Táto interakcia je slabšia ako silná i ako elektromagnetická (preto jej názov) a má extrémne krátky dosah, ešte kratší ako silná. Je v prírode zodpovedná za rozpady. Rádioaktívna premena je dej, ktorý sa týka mikrosвета - jadra atómu, teda sa tu stretávame s javom, ktorý sa dá popísať len podľa kvantovej mechaniky. To znamená, že budeme vedieť vypočítať iba pravdepodobnosť toho, že sa dané jadro v danom čase premení.

Za elementárny časový interval  $dt$  z pôvodných  $N$  jadier ubudne premenou  $dN$  jadier, takže možno písať:

$$-dN = \lambda N dt,$$

kde  $\lambda$  je charakteristika daného rádioaktívneho prvku, tzv. **konštanta premeny**. Integrovaním tohto vzťahu od pôvodných  $N_0$  jadier na začiatku merania po konečný počet  $N$  nepremených jadier v čase  $t$  dostávame **zákon premeny**

v tvare:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Konštanta  $\lambda$  vyjadruje pravdepodobnosť, že sa jadro premení za jednotku času. Iná konštanta rádioaktívnej látky je jej **doba polpremeny**  $T_{1/2}$  - je to taký časový interval, počas ktorého sa premení práve polovica pôvodného množstva látky:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}},$$

odkiaľ máme súvis doby polpremeny s konštantou premeny:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Takže napr. ak máme rádioaktívnu látku s polčasom premeny 5 hodín, to znamená, že každé jadro má 50% pravdepodobnosť, že sa premení počas 5 hodín a polovica pôvodného počtu jadier sa za 5 hodín premení, za ďalších 5 hodín je to podobné - opäť sa premení polovica nepremených jadier (teda za 10 hodín sa premenia nie všetky jadrá, ale iba 75% pôvodných jadier). Treba si na tomto mieste ešte uvedomiť, že každé nepremenené jadro má v tomto prípade 50% pravdepodobnosť premeny, ale že v žiadnom prípade o konkrétnom jadre nevieme povedať, či sa premení alebo nie - to je tá "principiálna" pravdepodobnosť z kvantovej mechaniky.

## 9.4 Jadrové reakcie

Kým chemické reakcie sú interakcie atómov a molekúl, pri ktorých sa premiestňujú elektróny, rádioaktívne premeny, ako sme videli, znamenajú emisiu častíc z jadra alebo zmenu povahy častíc vo vnútri jadra. Takéto deje sa nazývajú **jadrové reakcie** a odohrávajú sa pri nich oveľa intenzívnejšie energetické zmeny ako pri chemických reakciách. Rádioaktivita je samovoľná jadrová reakcia. Je dosť možné, že keby nebolo aspoň niekoľkých samovoľných jadrových reakcií, ktoré sa odohrávajú bez akéhokoľvek ľudského podnetu či zásahu, nikdy by sme neboli prišli na existenciu takýchto javov. Prvým, kto vyvolal jadrovú reakciu v laboratóriu bol Rutherford. Spôsobil premenu dusíka ( $A = 14$ ), ktorý sa zlúčil s nalietačujúcim héliom ( $A = 4$ ) a vznikol tak kyslík ( $A = 17$ ) a vodík ( $A = 1$ ). Táto reakcia bola zviditeľnená pomocou hmlovej komory - prvého dráhového detektora častíc, kde elektricky nabitú časticu zanechávajú stopu, pretože pozdĺž ich dráhy vznikajú v nasýtenej pare kvapôčky.

**Štiepenie jadier a syntéza jadier.** Pokles krivky väzbovej energie pri vysokých a nízkych hmotnostných číslach (Obr.9.2) má veľmi dôležité dôsledky. Jej pokles pri vysokých hmotnostných číslach hovorí, že nukleóny sú k sebe viac viazané, ak sú rozdelené v dvoch jadrách so stredne veľkými hmotnostnými číslami, než ako keby boli všetky spolu v jednom jadre s vysokým hmotnostným číslom. To znamená, že ak sa jedno jadro s vysokým hmotnostným číslom rozštiepi na dve jadrá - fragmenty so stredne veľkými hmotnostnými číslami, môže sa uvoľniť energia. Toto je dôvod štiepenia jadier. Uvoľnenú energiu možno využiť v jadrových reaktoroch produkujúcich energiu, ktorá dnes uspokojuje značnú časť svetovej spotreby energie. Problematická je ale otázka bezpečnosti (značné obavy vyvolali havárie v jadrových elektrárnach, najmä černoobylská havária v roku 1986) a otázka likvidácie odpadu - štiepných produktov, ktoré sú nebezpečne rádioaktívne. Ako prirodzená rádioaktivita, tak aj jadrové štiepenie sa týka jadier s veľkými hmotnostnými číslami, ktoré sa menia na jadrá so stredne veľkými hmotnostnými číslami a väčšou stabilitou, pričom úbytok hmotnosti sa mení na energiu, ktorá je uvoľňovaná. Ak sa ostreľuje jadro uránu ( $A = 235$ ) pomalým neutrónom, z každého rozštiepeného jadra sa uvoľňujú dva, tri pomalé neutróny, ktoré potom štiepia ďalšie jadrá uránu a dochádza takto k reťazovej reakcii, pri ktorej sa uvoľňuje oveľa viac energie ako pri prirodzenej rádioaktivite. Väzbová energia na nukleón fragmentov je asi 8,5 MeV, väzbová energia na nukleón pôvodného jadra je 7,6 MeV. Rozdiel energie pre jeden nukleón je teda 0,9 MeV, čo je pre približne 240 nukleónov 216 MeV. Približne takáto energia sa uvoľní pri štiepení jedného jadra uránu.

Pokles krivky pri nízkych hmotnostných číslach hovorí, že môže byť tiež uvoľnená energia v prípade, ak z dvoch jadier s nízkym hmotnostným číslom fúziou vznikne jedno jadro s väčším (stredne veľkým) hmotnostným číslom (t.j. pri vysokej teplote splynú v jedno jadro). Aj tento jav predstavuje premenu smerom k jadrám so stredne veľkými hmotnostnými číslami a s väčšou stabilitou. Aj tu klesá celková hmotnosť a uvoľňuje sa energia. Pozrime sa na to na príklade jadra deuterónu (ťažký vodík -  $A = 2$ , jeden protón, jeden neutrón), ktorý sa spojí s ďalším deuterónom a vytvorí jadro hélia ( $A = 4$ , dva protóny a dva neutróny). Hmotnosť deuterónu je 2,014 hmotnostných jednotiek, dvoch jeho jadier je 4,028. Hmotnosť hélia, ktoré má zvlášť silnú väzbu, je iba 4,0026  $u$ . Strata hmotnosti pri zlúčení je teda 0,0254  $u$ , čo je 0,63% pôvodnej hmotnosti dvoch jadier deuterónu, kým pri štiepení uránu-235 vzniká strata len 0,056% pôvodnej hmotnosti. Z určitej hmotnosti deuterónu môže teda syntézou vzniknúť asi 11-krát viac energie ako štiepením uránu rovnakej hmotnosti.

Ukázalo sa, že energia vznikajúca jadrovou syntézou, má zásadný význam pre pochopenie Vesmíru. Vo väčšine hviezd neustále prebieha syntéza vodíka, ktorá

môže slúžiť ako zdroj energie počas miliárd rokov.