

PEDAGOGICKÁ FAKULTA JIHOČESKÉ UNIVERZITY

Referát z jaderné fyziky

Téma: Atomové jádro

Vypracoval: Josef Peterka, MVT bak. II. Ročník

Datum dokončení: 24. června 2002

Obsah:	strana
1. Struktura atomu	2
2. Přírodní nuklidy a prvky	3
3. Proton, neutron, nukleon	4
4. Atomová hmotnost	6
5. Vazebná energie	8
6. Stabilita jádra	9
7. Rozměr jádra	11
8. Použitá literatura k tématu	11

ATOMOVÉ JÁDRO

1. Struktura atomu

Experimenty provedené na počátku tohoto století nezvratně dokázaly, že atomy chemických prvků jsou složeny z kladně nabitých atomových jader a z obalů, jejichž náboj je záporný a ve své absolutní hodnotě vždy stejně velký jako náboj jádra. Atomy jsou navenek elektroneutrální. V nejjednodušším přiblížení lze atom považovat za útvar přibližně kulového tvaru. V jeho středu je atomové jádro vystavěné z protonů a neutronů (Heisenberg a Ivaněnko). Obal atomu tvoří elektrony. Protony, neutrony a elektrony jsou tzv. elementární částice hmoty, které lze označit za stálé stavební jednotky atomu. Protony jsou nositeli kladného náboje, elektrony jsou nabitý záporně. Některé údaje o částicích jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1. Elementární částice tvořící atom.

Elementární částice	Hmotnost		Náboj e (C)	Objevitel (rok)
	m (kg)	m (u)		
Proton	$1,67252 \cdot 10^{-27}$	1,0072	$1,6021 \cdot 10^{-19}$ (+)	Rutherford – 1920
Neutron	$1,67482 \cdot 10^{-27}$	1,0086	nemá náboj	Chadwick – 1932
Elektron	$9,1091 \cdot 10^{-31}$	$5,4857 \cdot 10^{-4}$	$1,6021 \cdot 10^{-19}$ (-)	Thompson - 1897

Novodobá experimentální jaderná fyzika odhalila velmi složitou strukturu atomových jader a pokusila se na základě několika různých teoretických přístupů a představ o její objasnění. Za nesporně prokázané lze považovat, že protony a neutrony přítomné v jádru ztrácejí svoji individualitu a podléhají hluboké vzájemné interakci.

Efektivní průměr atomů zjišťovaný experimentálně se pro různé atomy pohybuje v mezích od 100 do 600 pm ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$). Velká část hmotnosti atomu je soustředěna do jádra. Hmotnost obalu atomu je ve srovnání s hmotností jádra zanedbatelná. Pozoruhodné je, že atomové jádro, představující téměř veškerou hmotnost atomu, má efektivní průměr 10000krát menší než atom – asi 0,01 pm. Hmotnost atomu je tedy soustředěna do velmi malého prostoru. Hustota jádra má obrovskou hmotu, řádově $10^{12} \text{ g.cm}^{-3}$. Krychle o objemu 1 cm^3 , naplněná pouze atomovými jádry, by měla hmotnost řádově 10^6 tun. Elektronový obal atomu je oblastí velmi složitého a pro chemické procesy nesmírně závažného pohybu elektronů. Ale jeho hmotnost je nepatrná.

2. Přírodní nuklidy a prvky

Podle posledních výzkumů se v přírodě vyskytuje 329 nuklidů, z nichž 273 je stabilních a 56 radioaktivních. Mimoto byly připraveny četné nuklidy různých prvků uměle. Obsah izotopů ve smíšených prvcích, tak jak je nalzáme v přírodě nebo jak je z přirozených surovin připravujeme, je stále stejný a pro daný prvek charakteristický. Jen u několika málo prvků jejich střední relativní atomová hmotnost poněkud kolísá ($\pm 0,003$) v důsledku proměnného izotopového složení. Je tomu tak především u vodíku, boru, uhlíku, kyslíku, argonu, mědi, rhenia, křemíku, stříbra a wolframu. Velké kolísání izotopového složení vykazuje pouze olovo, které je konečným členem přirozených radioaktivních rozpadových řad. Izotopová skladba olova, jež kromě neradiogenního nuklidu ^{204}Pb (tj. nuklidu, který nevznikal radioaktivním rozpadem) obsahuje i radiogenní izotopy ^{206}Pb , ^{207}Pb a ^{208}Pb , kolísá v závislosti na druhu rudy i na jejím geologickém stáří. U přírodních nuklidů a prvků si lze povšimnout dalších skutečností:

1. Prvky s lichým atomovým číslem Z jsou vždy buď čisté, nebo alespoň nemají více než dva přírodní izotopy (Antonovo pravidlo). Výjimkou je vodík a draslík, které mají po třech izotopech.
2. Prvky se sudým atomovým číslem Z jsou obvykle tvořeny větším počtem nuklidů (dvěma a více). Výjimkou je beryllium, jež má pouze jediný přírodní nuklid.
3. Prvky se sudým Z nemají většinou více než dva izotopy s lichým N .
4. Neexistují dva stabilní izobary lišící se od sebe v atomovém čísle o jednotku (pravidlo Mattauchovo). Až dosud byly nalezeny pouze tři dvojice stabilních nuklidů, které se z tohoto pravidla vymykají.

Platnost Mattauchova pravidla formálně objasňuje, proč prvky $_{43}\text{Te}$ a $_{61}\text{Pm}$, dlouho v přírodě hledané, nemohou mít stabilní nuklidy. Nukleonová čísla, která by měla příslušet nuklidům těchto prvků, patří stabilním nuklidům sousedních prvků $_{42}\text{Mo}$, $_{44}\text{Ru}$, $_{60}\text{Nd}$ a $_{62}\text{Sm}$.

3. Proton, neutron, nukleon

Proton a neutron mají některé vlastnosti shodné s elektrony, některými svými rysy se však od nich zásadně odlišují. Ke shodným vlastnostem patří to, že jsou to fermiony, oba mají spin $\frac{1}{2}$. Protony podléhají stejně jako neutrony principu nerozlišitelnosti, a tedy také pro ně platí Pauliho vylučovací princip. Protony nesou co do velikosti stejný elektrický náboj jako elektrony, avšak kladný, tj. $+e$. Neutrony, jak ukazuje jejich název, nejsou elektricky nabitě. Velmi podstatně se tyto částice liší od elektronů svou hmotností, neboť

$$m_p = 1836 m_e, \quad m_n = 1839 m_e,$$

kde m_e , m_p , m_n jsou klidové hmotnosti elektronu, protonu a neutronu. Odlišují se od nich i velikostí vlastních magnetických momentů, příslušných jejich spinu. Proton má vlastní magnetický moment μ_p

$$\mu_p = 2,79\mu_N \cdot 2s_p/\hbar,$$

kde s_p je spin protonu a μ_N je jaderný magneton

$$\mu_N = \frac{eh}{2m_p}$$

definovaný analogicky jako u elektronu. Ačkoliv neutron je neutrální částicí, nese magnetický moment μ_n

$$\mu_n = -1,91\mu_N \cdot 2s_n/\hbar,$$

kde s_n je spin neutronu. Vlastní magnetické momenty protonu a neutronu jsou v absolutní hodnotě mnohem menší než vlastní magnetický moment elektronu. Navíc poměr absolutní velikosti magnetického momentu protonu nebo neutronu k jadernému magnetronu není roven jedné, jako je tomu u elektronu. Protože proton je nabitý a má vlastní magnetický moment a neutron má vlastní magnetický moment, působí tyto částice na sebe elektromagneticky. V jejich interakcích je rozhodující složkou tohoto elektromagnetického působení elektrostatická Coulombova síla, proto by nebylo možné vytvořit z protonů a neutronů atomové jádro, kdyby mezi nimi nepůsobily přitažlivé síly, které by překonaly elektrostatické odpuzování. Tyto síly musí být zřejmě jiného druhu než elektrostatického, nazýváme je proto silami jadernými anebo obecněji silnou interakcí. Tím, že protony a neutrony na sebe působí nejen elektromagneticky, ale i „silně“, se zásadně odlišují od elektronů, které zákonům silné interakce nepodléhají. Proton můžeme pokládat za částici stabilní, neboť je známa dolní hranice jeho střední doby života, která je 10^{32} let, což je doba přesahující o mnoho řádů stáří současné struktury vesmíru, v kterém se nalzáme. Naproti tomu volný neutron nelze považovat za stabilní, neboť jeho střední doba života je pouhých 896 s. Rozdíl klidových hmotností neutronu a protonu umožňuje neutronu, aby se rozpadnul na proton, elektron a antineutrino. Neutrony silně vázané v atomových jádrech se nerozpadají, pokud jsou vázány slaběji k jejich rozpadu může dojít. Základní parametry charakterizující proton jsou experimentálně určeny s vysokými přesnostmi a jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2. Nejdůležitější vlastnosti nukleonů.

	Proton	Neutron
Klidová energie MeV	938,27231	939,56563
Střední doba života	$> 10^{32}$ let	896 s
Spin v \hbar	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Parita	+ 1	+ 1
Elektrický náboj v C	1,60217733	0
Poměr magnetického momentu k jadernému magnetonu μ_N	2,792847386	- 1,91304275
Izospin T	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Komponenta T_z izospinu	+ $\frac{1}{2}$	- $\frac{1}{2}$

Nebudeme-li přihlížet k rozdílnému magnetických momentů protonu a neutronu, které v elektromagnetické interakci těchto částic hrají jen druhotnou roli a zanedbáme-li rozdíl v jejich hmotnostech, můžeme se na ně dívat jako na jednu částici nazývanou nukleon, která se může nacházet ve dvou nábojových stavech – jedním nábojovým stavem nukleonu je proton a druhým neutron. Dospěli jsme tak k analogické situaci, s jakou se setkáváme u spinů elektronů a jim podobných fermionů. Projekce spinu do vybraného směru u těchto částic může nabývat pouze dvou hodnot $+1/2$ a $-1/2$, jinými slovy tyto částice mohou existovat ve dvou různých spinových stavech. Na základě této analogie přiřazujeme oběma nábojovým stavům nukleonu veličinu, kterou nazýváme izospin nebo izotopický spin. V tomto termínu slovo izotopický je řeckého původu a znamená stejné místo či stejnou polohu. Vyjadřuje ve skutečnosti to, že proton a neutron považujeme za stavy jedné částice nukleonu. Pro izospin platí stejná pravidla skládání jako momentu hybnosti, jeho hodnotu udáváme přímo příslušnými kvantovými čísly.

4. Atomová hmotnost

Pod pojmem hmotnost atomu vždy rozumíme klidovou hmotnost daného atomu ${}_Z X^A$ jako celku. Označujeme ji symbolem $M ({}_Z X^A)$ a v souladu s požadavky soustavy fyzikálních jednotek SI ji můžeme vyjádřit v kilogramech. Získáme tak vesměs velmi malé číselné hodnoty. S tak malými čísly se nepohodlně pracuje a jsou málo přehledná. Proto se raději dává přednost vyjadřování hmotnosti elementárních částic i atomů jednotkou daleko menší než je kilogram. Je jí přesně $1/12$ hmotnosti atomu nuklidu ${}_6 C^{12}$. Tato tzv. atomová hmotnostní jednotka se označuje symbolem „u“ a je mírou veličiny, která se nazývá atomová hmotnostní konstanta (m_u). Poměr atomové hmotnostní jednotky ke kilogramu je

$$1 \text{ u} \approx 1,66053 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

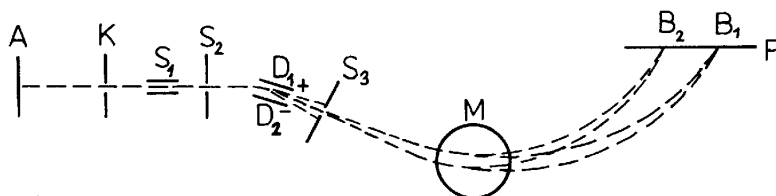
Nejběžnější, zejména při vyjadřování hmotnosti atomů, je použití tzv. relativní atomové hmotnosti. Tato veličina je definována jako poměr atomové hmotnosti $M ({}_Z X^A)$ k atomové hmotnosti m_u . Stojí za povšimnutí, že relativní hmotnosti protonu a neutronu, tj. číselné hodnoty jejich hmotnosti vyjádřené v násobcích jednotky „u“, jsou čísla velice se blížíci jedničce. Poněvadž jádra atomů jsou vystavěna z protonů a neutronů, mají prakticky všechny známé nuklidy relativní atomovou hmotnost blízkou celým číslům, která značí počet nukleonů v jádru (tj. nukleonovým číslem).

K určování hmotnosti atomů a jader se používají tyto metody:

1. Hmotová spektrometrie
2. Kinematická analýza jaderných reakcí
3. Kinematický rozbor radioaktivních rozpadů α a β
4. Studium rotačních spekter molekul

Nejdůležitější z metod je hmotová spektroskopie. První přesné hmotové spektrometry sestrojili v roce 1918 F. Aston a A. Dempster. Základní principy, které byly pro jejich konstrukci použity, jsou aplikovány i v moderních spektrometrech. Schéma Astonova spektrometru je na obrázku 1.

Obrázek 1.



Obr. 1 Schéma Astonova spektrometru; A – anoda, K – katoda, D₁ a D₂ – elektrody, M – střed magnetu, F – fotografická deska.

Celé zařízení se nachází ve skleněné trubici, která je naplněna zkoumaným plynem pod takovým tlakem $\sim 0,1$ Pa, aby v prostoru mezi anodou A a katodou K došlo k ionizaci. Kladně nabitě ionty jsou vyvedeny kanálem S₁ a zkolimovány štěrbinou S₂. při přechodu elektrostatickým polem mezi elektrodami D₁ a D₂ se svazek iontů rozdělí podle jejich

energií a štěrbinou S_3 tak umožní vybrat ionty o prakticky stejné energii. Svazek potom vstupuje do homogenního magnetického pole s vektorem magnetické indukce kolmým ke směru svazku. V tomto poli je poloměr dráhy iontů úměrný jeho hybnosti $p = m \cdot v$ a toto se využije při konstrukci aparatury k tomu, aby různé rychlé ionty se stejnou hmotností se zfokusovaly a dopadly do téhož směru místa B_1 na fotografické desce. Ionty, které budou mít menší hmotnost než ty, o nichž jsme uvažovali, budou mít při stejné energii jako předchozí menší hybnost $p = \sqrt{2mE}$, jejich dráha bude více zakřivená, a proto se soustředí v okolí bodu B_2 . Z polohy bodů B_1 a B_2 při znalosti konstant aparatury se určí hmotnost iontů a z ní posléze po přidání hmotnosti elektronu a po odečtení ionizační energie dělené c^2 se vypočítá hmotnost atomu příslušného nuklidu.

Soudobé spektrometry mají tři základní části:

1. Iontový zdroj
2. Energetický selektor
3. Magnetický analyzátor

Soudobé hmotové spektrometry umožňují určování hmotnosti iontů s relativní chybou menší než 10^{-7} .

V poslední době stále více stoupá zájem o využití rotačních spekter molekul k určení hmotnosti atomových jader. Velikost energie rotačních stavů je totiž závislá na momentu setrvačnosti molekuly a ten opět závisí na hmotnosti jader, která se v ní nacházejí. Molekuly, v kterých je atom určitého izotopu nahrazen atomem jiného izotopu téhož prvku, vysílají a případně absorbují fotony, jimž přísluší odlišné frekvence než v původním případě. To umožňuje určit rozdíl ve hmotnostech jader. Soudobá mikrovlnná technika dovoluje s touto metodou efektivně pracovat. Její předností je, že měření se dá provádět i s velmi malými množstvími vyšetřovaných látek.

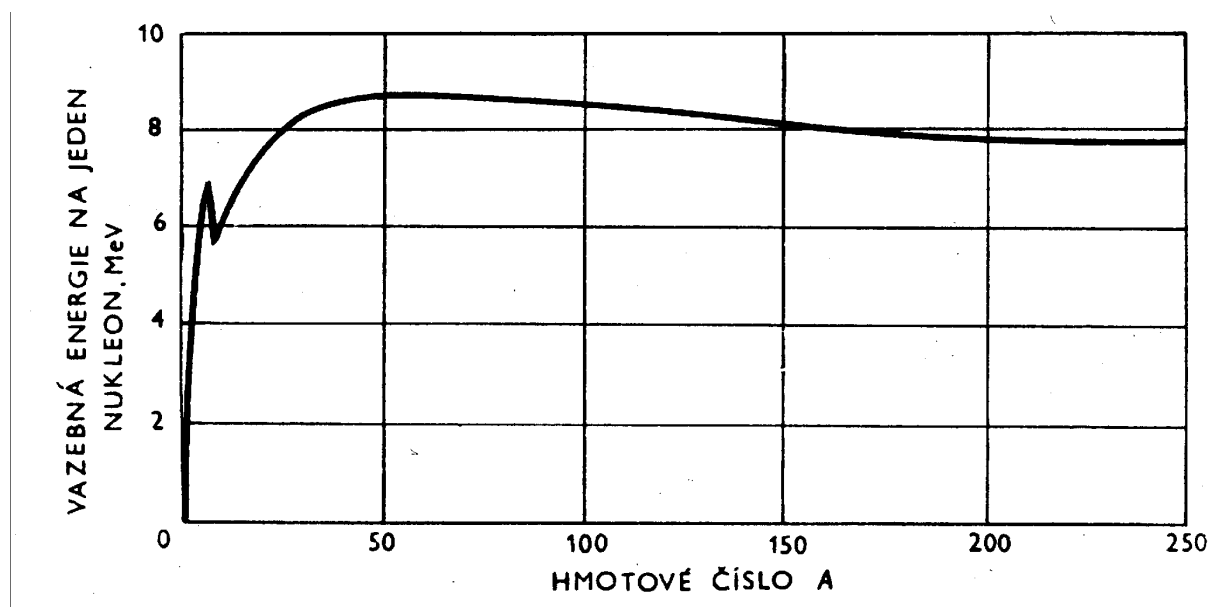
5. Vazebná energie jádra

Na konci první poloviny dvacátého století se atomová fyzika setkala s velmi překvapivým jevem. Experimentálně bylo průkazně zjištěno, že hmotnost každého stabilního atomu jako celku je vždy o něco menší než prostý algebraický součet hmotností elementárních částic, z nichž je atom vystavěn. Z toho vyplývá, že syntéza atomového jádra z elementárních částic představuje vlastně jadernou reakci, při níž se uvolní energie ekvivalentní příslušnému úbytku hmotnosti. Vyjádříme-li tento úbytek hmotnosti jako ΔM je množství uvolněné energie E_j dáno Einsteinovým vztahem

$$E_j = \Delta M \cdot c^2$$

Tato energie se nazývá vazebná energie jádra a je definována takto: Vazebná energie E_j jádra atomu daného nuklidu je energie, která se uvolní při vzniku tohoto jádra z volných nukleonů. Je až na znaménko ekvivalentní energii potřebné k rozštěpení jádra na volné nukleony. Zbývá povšimnout si vazebné energie jádra u přírodních nuklidů a prvků. Je přirozené, že vazebné energie jsou tím větší, čím větší počet nukleonů jádra obsahují. V řadě nuklidů a prvků sestavené podle nukleonového čísla A tato energie vzrůstá. Abychom mohli srovnávat stabilitu atomových jader jednotlivých nuklidů vzájemně mezi sebou, dělíme vazebnou energii jádra každého nuklidu jeho nukleonovým číslem. Tak získáváme hodnoty vazebné energie připadající na jeden nukleon. Tyto hodnoty vyjadřují pevnost vazby jakou je poután každý jednotlivý nukleon v jádru daného nuklidu a jsou dobrým kritériem stability jádra jako celku. Obrazem závislosti vazebné energie připadající na jeden nukleon, E_j / A na nukleonovém čísle A je křivka na obrázku 2.

Obrázek 2.



Jaderné vazebné energie jsou překvapivě velké. Například jeden mol atomů helia má hmotnost přibližně 4 gramy. Uvolněná energie při vzniku 4 gramů helia z elementárních částic má hodnotu $2,71 \cdot 10^{12}$ J. Tato energie by ve formě tepla by ohřála 6500 tun vody z 0°C až k bodu varu.

6. Stabilita jádra

Stabilita atomových jader je odrazem jejich velmi složité vnitřní struktury. Zjednodušeně lze říci, že mezi vazebnou energií jader a jejich stabilitou je přímá souvislost. Jádra s největší vazebnou energií na nukleon obvykle nejeví tendenci k rozpadu nebo sdružení s jinými jádry, neboť tyto procesy již v podstatě nemohou jejich vazebnou energii na nukleon dále zvýšit. Atomy tvořené těmito jádry označujeme jako nukleárně stabilní. Jinak je tomu u atomů, jejichž vazebná energie na nukleon není největší. Jejich jádra mohou po vhodné iniciaci nebo i samovolně podléhat buď syntetickým nebo štěpným procesům a přecházet tak na jádra s větší hodnotou vazebné energie na nukleon. Říkáme, že tyto atomy mají sníženou nukleární stabilitu.

Prvky v oblasti nukleonových čísel $A = 28$ do $A = 120$ ($Z = 14$ až 50) vykazují největší hodnotu vazebné energie. Proto jsou prvky s atomovými čísly v oblasti od $Z = 14$ (Si) do $Z = 50$ (Sn) nukleárně velmi stabilní. Opačná situace je na obou koncích řady nuklidů. Prvky o malých atomových číslech a relativně malé hodnotě vazebné energie na nukleon (vodík, lithium aj.) by měly patřit mezi nukleárně méně stabilní. Skutečně také u nich nacházíme schopnost k jaderným přeměnám, jmenovitě k syntetickým jaderným procesům. Extrémně vysoké teploty (miliony kelvinů), které odstraní z obalu atomů všechny elektrony, umožňují vzájemné přiblížení jader lehkých prvků a jejich sdružování do složitějších ale stabilnějších celků. Přitom se uvolňuje ohromné množství energie dané rozdílem vazebné energie zanikajících lehkých a vznikajících těžších jader. Probíhá tzv. termonukleární syntéza. Jejím příkladem mohou být procesy probíhající na Slunci nebo při explozi vodíkové pumy. Na druhém konci řady nuklidů stojí prvky s těžšími jádry, jejichž vazebná energie na nukleon je také poněkud menší než vazebná energie prvků nukleárně stabilních. Projevuje se to schopností jader těchto prvků podléhat štěpným procesům (mnohdy připomínajícím řetězovou reakci), které opět uvolňují velké množství energie a vedou ke vzniku stabilních jader ze střední oblasti nuklidů. Štěpné procesy se uplatňují v jaderných reaktorech a při atomových explozích. Příkladem těchto procesů může být štěpení Uranu²³⁵ pomalými (termickými neutrony). Projevem dispozice těžkých atomů ke štěpným dějům je i jejich samovolný radioaktivní rozpad. Prvky s číslem $Z > 83$ jsou již všechny radioaktivní.

Složitost struktury atomových jader se projevuje mimo jiné i tím, že velikost vazebné energie není jediným faktorem podmiňujícím stabilitu atomového jádra. Významnou úlohu má u každého atomového jádra i poměr čísel N a Z . Stabilní přírodní nuklidy obsahují vyvážený a velmi málo proměnný počet neutronů a protonů. Pro většinu nuklidů platí, že N je 1,0 až 1,6 Z . U jader nejlehčích prvků má poměr $N : Z$ hodnotu 1 : 1. Se vzrůstajícím atomovým číslem prvku vzniká a stále stoupá přebytek neutronů nad protony, až u nejtěžších jader nabývá poměr $N : Z$ hodnoty 3:2.

Dalším faktorem, který rozhoduje o stabilitě atomového jádra je sudost a lichost čísel N a Z . Můžeme se o tom přesvědčit, když soubor 273 přírodních stabilních (neradioaktivních) nuklidů rozdělíme do čtyř skupin podle toho k jaké kombinaci čísel N a Z patří. Získáme tak rozdělení uvedené v tabulce 3.

Tabulka 3. Vliv hodnoty čísel N a Z na stabilitu jádra.

Kombinace		Počet stabilních nuklidů
Z	N	
Sudé	sudé	164
Sudé	liché	55
Liché	sudé	50
Liché	liché	4

Vidíme, že nejhojněji (v důsledku své velké stability) jsou v přírodě zastoupena jádra se sudými čísly N a Z. Jádra, u nichž je jedno z čísel liché, jsou již méně častá. To svědčí o jejich podstatně menší stabilitě. Jádra s lichými hodnotami N a Z se samovolně rozpadají (jsou radioaktivní). Výjimku tvoří pouze atomy s $Z < 14$. Existují jen čtyři stabilní nuklidy s lichým číslem N i Z (H, Li, B, N). Nakonec je třeba znovu konstatovat, že nuklidy s hodnotou $Z > 83$ jsou již při jakémkoliv zastoupení počtu protonů a neutronů v jádře nestálé. Jejich nestabilita se projevuje radioaktivitou.

Pozoruhodné je zjištění, že některé hodnoty nukleonového čísla A znamenají zvlášť velkou stabilitu příslušných jader. Jsou to čísla 4, 8, 12, 16, 20, 24 a 28. Jev má dosti složitou podstatu a je důsledkem slupkové struktury atomových jader. Uvedená čísla odpovídají mezním případům zaplnění protonových a neutronových slupek v jádru. Ukázalo se též, že pokud počet protonů nebo neutronů v jádru dosáhne čísel 2, 8, 20, 28, 50, 82 a pravděpodobně i 114, 126, 164 a 184 (tzv. magických čísel), vykazují vzniklá jádra zvýšenou stabilitu. Tato představa umožňuje předvídat výskyt zvýšené stability u těžkých atomových jader dosud neobjevených prvků.

7. Rozměr jádra

Rutherfordův pokus s rozptylem poskytl první důkaz, že jádro má konečné rozměry. Od té doby bylo provedeno mnoho pokusů na určení rozměrů jádra, přičemž rozptyl částic zůstal výhodnou technikou. K tomuto účelu jsou ideální rychlé elektrony, neboť elektron interaguje s jádrem jen elektrickými silami, kdežto neutron jen specificky jadernými silami. Rozptyl elektronů tak poskytuje informace o rozdělení náboje v jádru a rozptyl neutronů o rozdělení jaderné hmoty. V obou případech musí být de Broglieho vlnová délka částice menší než poloměr studovaného jádra. Částice s vlnovou délkou $\lambda = 10^{-14}$ m má hybnost

$$p = \frac{h}{\lambda} = 6,63 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

Pro elektron, kdy je $E \gg$, je odpovídající kinetická energie

$$T = p \cdot c = 1,99 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 124 \text{ MeV}$$

Pro neutron se stejnou hybností, kde je $m_0 c^2$ (939 MeV) srovnatelné s celkovou energií E, bude

$$T = E - m_0 c^2 = \sqrt{(m_0^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2)} - m_0 c^2 = 8 \text{ MeV}$$

Ke studiu jaderných rozměrů jsou tedy vhodné elektrony s energií přes 124 MeV a neutrony s energií přes 8 MeV. Konkrétní pokusy na určování jaderných rozměrů používaly elektrony s energií několika set MeV až přes 1 GeV a neutronů s energií od 20 MeV výše. Pokaždé se zjistilo, že objem jádra je přímo úměrný počtu nukleonů, tj. hmotovému číslu A jádra. Je-li poloměr jádra R, je R^3 úměrné A.

Jednotka délky pro vyjadřování vzdáleností v říši atomů je jeden angström (10^{-10} m). Jádra jsou však tak malá, že vhodnou délkovou jednotkou je jeden fermi (f), který je 10^5 krát menší než jeden angström ($1 \text{ f} = 10^{-15}$ m).

Předpokládali jsme, že jádra jsou kulová. Není-li rozdělení náboje v jádře sféricky symetrické, bude mít jádro elektrický kvadrupólový moment, který bude interagovat s orbitálními elektrony atomu a výsledné posunutí atomových magnetických hladin povede k hyperjemnému štěpení spektrálních čar. Tento zdroj hyperjemné struktury je třeba rozlišovat od hyperjemné struktury v důsledku magnetického momentu jádra ale při takovém rozlišení se ukazuje, že u jader se spinovým kvantovým číslem 1 nebo více se odchylky od kulového tvaru skutečně vyskytují. Tato jádra mohou být protáhlé nebo zploštělé elipsoidy, avšak rozdíl mezi hlavními a vedlejšími osami nikdy nepřevyšuje $\approx 20\%$ a obvykle je mnohem menší. Pro téměř všechny účely stačí uvažovat jádra kulová ale odchylky od kulového tvaru, byť velmi malé, poskytují o struktuře jádra cennou informaci.

Použitá literatura k tématu:

Beiser A. – Úvod do moderní fyziky (rok vydání – 1978)

Úlehla I., Suk M., Trka Z. – Atomy, jádra, částice (rok vydání – 1990)

Internetová stránka: www.fch.vutbr.cz/vyuka/klikorka/03_Atomove_jadro.pdf