

2.1 STRUKTURA A VLASTNOSTI ATOMOVÉHO JÁDRA

V této kapitole se dozvíte:

- o historii vývoje modelů stavby atomového jádra od dob Rutherfordova experimentu;
- které fyzikální veličiny jsou důležitými charakteristikami atomových jader a jak podle nich jádra klasifikujeme;
- o vlastnostech a podstatě jaderných sil.

Budete schopni:

- pohovořit o tom, jak se měnily názory na složení atomového jádra, a které experimenty či objevy postupně pomohly k vytvoření správného modelu struktury atomového jádra;
- klasifikovat jádra podle jejich základních charakteristik;
- uvést základní vlastnosti jaderných sil, porovnat je s jinými typy fyzikální interakcí a vysvětlit podstatu těchto sil.

Klíčová slova této kapitoly:

proton, neutron, model atomového jádra



Čas potřebný k prostudování učiva kapitoly:

3 + 2 hodiny (teorie + řešení úloh)

Po objevu atomového jádra při Rutherfordově pokusu nebylo, krom jeho základních obecných vlastností, zprvu známo nic o jeho vnitřní struktuře. Ta byla odhalována postupně s pomocí přeměn atomových jader vyvolaných jinými částicemi (jaderné reakce). Při těchto experimentech byly objeveny postupně obě základní částice atomového jádra (tzv. nukleony) **proton** a **neutron**. Zejména s využitím těchto objevů se pokoušeli fyzikové vytvořit první modely atomového jádra. Zprvu se samozřejmě jednalo pouze o modely struktury atomového jádra. Teprve později, až byly objeveny a prozkoumány **jaderné síly**, které „drží nukleony v jádře“, se mohli fyzikové pokusit vytvořit první modely popisující dynamiku jader a s ní spojené vnitřní vlastnosti jader, mezi něž patří zejména energetický stav jádra.

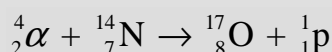
2.1.1 PROTONOVÝ MODEL ATOMOVÉHO JÁDRA

Tak jako objev elektronu (a objev atomového jádra) hrály důležitou roli při vytvoření prvních modelů atomu, při návrhu první hypotézy o stavbě jádra sehrál důležitou roli objev další elementární částice – **objev protonu** (1919).

Objev protonu

Rutherford sledoval ve Wilsonově mlžné komoře stopy částic α emitovaných radioaktivním zdrojem. Částice α narážely na jádra atomu dusíku. Z místa srážky vycházely stopy dvě. Bylo zjištěno, že jedna stopa patří ionizovanému atomu kyslíku (resp. jádru kyslíku), druhá pak lehké částici, která je totožná s jádrem vodíku. Tato částice byla pojmenována **proton**.

Došlo vlastně k přeměně atomového jádra, která byla vyvolána srážkou. Taková přeměna se v analogii s chemií označuje jako jaderná reakce. Pro její zápis můžeme použít schematického zápisu, který je podobný zápisu chemické reakce.



Místo značek molekul (např. H_2O) vystupují v jaderné reakci značky atomových jader (značka odpovídajícího prvku, např. O, N) a místo značek atomů (značka prvku, např. O, H) značky elementárních částic (např. e – elektron). Pro proton byla zavedena značka **p**. Význam indexů u značek vysvětlíme podrobně později. Zatím si jen řekněme, že dolní index představuje náboj částice v násobcích *elementárního elektrického náboje*.

(Pozor! V chemické reakci značky prvků symbolizují atomy, zatímco v jaderné reakci příslušná atomová jádra.)

Poznámky:

- Pozorovaná stopa částice není dráhou (trajektorií částice, tj. křivkou $\vec{r}(t)$), i když ji z pohledu z dálky připomíná, ale pouze nějakým způsobem zviditelněnou oblastí (s malou, ale konečnou šířkou), jíž částice prochází. V případě mlžné komory je stopa tvořena kapičkami, které vznikají kondenzací přesycené páry na iontech, které byly vytvořeny průletem elektricky nabitých částic (ionizace atomů v okolí dráhy částice).
- V mlžné komoře, a obecně to platí i pro další detektory částic, můžeme pozorovat pouze stopy nabitých částic. Jedině ty jsou schopny při průletu prostředím strhávat či odtrhávat působením elektrostatické interakce elektrony atomů tohoto prostředí, které se nachází v blízkosti dráhy letu částice, a tak je ionizovat.

Pokud provedeme bilanci elektrického náboje pro výše uvedenou jadernou reakci na základě zákona zachování náboje $Q_\alpha + Q_N = Q_O + Q_p$, zjistíme, že proton má

kladný elektrický náboj s velikostí rovnou hodnotě elementárního elektrického náboje e . Pro jednoduchost vyjádříme náboje jednotlivých částic v násobcích e , tedy $Q = Ze$. Pak máme $2e + 7e = 8e + Q_p$ a tedy $Q_p = e$. Postupně byly určeny další vlastnosti protonu.

Vlastnosti protonu:

- Dnes víme, že se jedná o elementární částici ze skupiny **nukleonů**.
- Jeho **spinové kvantové číslo** $s = 1/2$ ($m_s = \pm \frac{1}{2}$), proto se řadí mezi částice označované jako **fermiony** (částice s poločíselnými hodnotami s , liché násobky $1/2$).
- Jedná se, jak už bylo řečeno, o částici s kladným elektrickým nábojem, jehož velikost je rovna elementárnímu elektrickému náboji e .
- **Klidová hmotnost protonu** je $(1,672\,648\,5 \pm 0,000\,008\,6)10^{-27}$ kg.
- Z-ová složka vlastního **magnetického momentu** je $\mu_{s,p,z} = m_s g_p \mu_N$, kde $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_{0,p}}$ je **jaderný magneton** a hodnota Landého faktoru protonu $g_p = 2 \times 2,792\,845\,6$.
- Podle standardních teorií je proton stabilní částicí s neomezenou **střední dobou života**, podle některých nových teorií by měl mít konečnou střední dobu života, která ale není menší než asi 10^{32} let. Proton tvoří jádro atomu vodíku. Odtud plyne alternativní značení v jaderných reakcích ${}^1_1\text{H}$ místo ${}^1_1\text{p}$.

Zprvu se zdálo, že proton představuje jakousi obdobu elektronu, což naznačovala stejná velikost náboje, i když s opačným znaménkem, a stejná hodnota spinového čísla.

Proton je ovšem zhruba 1836 krát těžší než elektron a navíc má i odlišnou hodnotu Landého faktoru. Později se ukázalo, že tato odlišná hodnota je způsobena vnitřní strukturou protonu, náboj není rozdělen uvnitř částice rovnoměrně.

Naproti tomu u elektronu žádnou vnitřní strukturu nepozorujeme, navíc na elektron nepůsobí jaderné síly, a proto se jedná o rozdílný typ elementární částice (viz systém elementárních částic).

Na základě objevu protonu byla vytvořena následující představa o složení jádra.

Protonový model atomového jádra

Jádro sestává pouze z protonů. Počet protonů Z v jádře je možno určit z náboje jádra Q pomocí vztahu $Q = Ze$ (náboj protonu je e).



Nedostatky protonového modelu:

- Fyzikové zatím nedokázali objasnit stabilitu jádra sestávajícího pouze z protonů, protože protony s kladným nábojem „natěsnané“ uvnitř jádra se musejí výrazně odpuzovat pomocí elektrostatické interakce. (Ověřte si, že vzhledem k malé hodnotě gravitační konstanty nemůže jádro držet pohromadě prostřednictvím gravitačních sil).
- Závažný rozpor byl ovšem zjištěn v případě hmotnosti jádra. Na základě protonového modelu se předpokládalo, že hmotnost jádra M by měla být alespoň přibližně rovna součtu klidových hmotností $m_{0,p}$ protonů v jádře obsažených, tedy $M = Zm_{0,p}$. Z experimentu bylo ovšem zjištěno, že pro lehká jádra, počínaje již heliem, ($Z \geq 2$) spíše platí přibližný vztah $M \doteq 2Zm_{0,p}$.

Rozpor se snažili fyzikové objasnit návrhem proton-elektronového modelu jádra.

2.1.2 PROTON-ELEKTRONOVÝ MODEL ATOMOVÉHO JÁDRA

Rozpory s objasněním hmotnosti jádra v případě jeho modelu založeného pouze na protonech se zdály být řešitelné na základě představy, že ve skutečnosti jádro obsahuje dvojnásobný počet protonů oproti protonovému modelu, jejichž náboj je kompenzován záporně nabitými elektrony rovněž umístěnými v jádře. Tyto představy se zdály být potvrzeny i experimentem. U některých atomů (viz přeměna β) byly pozorovány elektrony vyletující z jádra (nikoliv z obalu atomu) a tudíž se zdálo logické, že elektrony se skutečně mohou nacházet i v jádře. Výše uvedené představy jsou základem proton-elektronového modelu atomového jádra.



Proton-elektronový model atomového jádra

Jádro s hmotností $M \doteq am_{0,p}$, kde a je celé číslo, a elektrickým nábojem $Q = Ze$ obsahuje celkem a protonů a též $n = a - Z$ elektronů. Tyto „jaderné“ elektrony jsou některými jádry emitovány.

Poznámky:

- Hmotnost jádra je podle tohoto modelu $M \doteq am_{0,p} + nm_{0,e} \doteq am_{0,p}$ vzhledem k tomu, že klidová hmotnost elektronu je velmi malá ve srovnání s klidovou hmotností protonu.
- Náboj jádra je podle tohoto modelu $Q = ae - ne = (a - n)e = Ze$. Záporný elektrický náboj elektronů v jádře kompenzuje kladný náboj protonů.

- Speciálně pro lehká jádra platí $M \doteq 2Zm_p$, tedy jádro by mělo obsahovat $a = 2Z$ protonů a $n = Z$ elektronů.

Nedostatky modelu:

- Proton-elektronový model struktury jádra dává přibližně správné hodnoty hmotností zejména lehčích jader, přesto zůstává určitá nepřesnost ve srovnání s experimentem. Tento nesoulad teoretické a skutečné hmotnosti jádra je ještě více patrný v případě těžkých jader.
- Měření magnetického momentu jádra je rovněž v rozporu s tímto modelem. Model dává příliš velké hodnoty magnetických momentů jádra.
- Jádro podle proton-elektronového modelu obsahuje elektrony. Hodnoty magnetických momentů elektronů představují násobky hodnot Bohrových magnetonů, které jsou řádově tisíckrát větší než hodnoty jaderných magnetonů, v jejichž násobcích se udává magnetický moment protonů, což je dáno skutečností, že hmotnost elektronu je řádově tisíckrát menší, než hmotnost protonu.

Hodnoty magnetického momentu jádra řádově odpovídají hodnotám jaderných magnetonů.

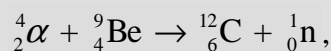
2.1.3 HEISENBERGŮV - IVANĚNKŮV MODEL ATOMOVÉHO JÁDRA

Nedostatky předchozích modelů se podařilo uspokojivě vyřešit až poté, co byl uskutečněn objev nové částice – **objev neutronu** (1932).

Objev neutronu

Podobně jako v případě objevu protonu byly použity částice α , které tentokrát ostřelovaly jádra Be. Ve Wilsonově mlžné komoře byla po srážce pozorována jediná stopa, která náležela jádru uhlíku (C). Chadwick provedl rozbor stop částic z hlediska zákonů zachování energie a hybnosti a dospěl k závěru, že kromě kyslíku musí vznikat ještě jedna částice, která nenesé žádný elektrický náboj (proto nelze zachytit její stopu v mlžné komoře). Částice byla pojmenována **neutron**.

Přeměnu jádra, k níž došlo, můžeme opět zapsat ve formě schématu jaderné reakce



kde pro neutron byla zavedena značka **n**.

Pokud provedeme bilanci elektrického náboje pro výše uvedenou jadernou reakci na základě zákona zachování $Q_\alpha + Q_{\text{Be}} = Q_{\text{C}} + Q_{\text{n}}$, zjistíme, že neutron nemá žádný elektrický náboj. Po dosazení hodnot nábojů v násobcích elementárního elektrického náboje dostaneme $2e + 4e = 6e + Q_{\text{n}}$, a tedy skutečně $Q_{\text{n}} = 0$.

Vlastnosti neutronu:

- Jedná se o elementární částici ze skupiny nukleonů.
- Je to fermion se *spinovým kvantovým číslem* $s = 1/2$ ($m_s = \pm \frac{1}{2}$).
- Neutron je elektricky neutrální částice.
- Jeho *klidová hmotnost* je $(1,674\,954\,3 \pm 0,000\,008\,6)10^{-27}$ kg.
- Hodnota z -ové složky *magnetického momentu* je $\mu_{s_n,z} = m_s g_n \mu_N$, Landého faktoru $g_n = 2 \times (-1,913\,042\,11)$. Tzn., že i když se jedná o částici bez elektrického náboje, má nenulový magnetický moment, což je dáno další vnitřní strukturou částice.
- Jako volná částice je neutron nestabilní a má *střední dobu života* (896 ± 10) s. Rozpad vlivem slabé interakce probíhá podle schématu $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$. Pokud je ovšem vázán v jádře, stává se stabilním (přesněji řečeno dochází ke vzájemným přeměnám neutronů a protonů, mezi těmito přeměnami se ustaví rovnováha, takže počet protonů a neutronů v jádře se zachovává).



Heisenbergův-Ivaněnkův model atomového jádra

Atomové jádro se skládá ze dvou typů částic: *protonů* a *neutronů*.

Protony a neutrony jsou v jádrech drženy novým typem sil – tzv. *jadernými silami*.

Vazebná energie jádra E_V , která je důsledkem těchto sil, způsobuje pozorovatelný *hmotnostní úbytek* $\Delta m = E_V / c^2$.

Typ jádra je jednoznačně určen počtem protonů Z a počtem neutronů N v něm obsažených.

Nukleony

Protony a neutrony se označují společným názvem **nukleony**. Celkový počet nukleonů v jádře je tak $A = Z + N$. Nukleony patří mezi ty „elementární“ částice, u nichž pozorujeme další vnitřní strukturu na rozdíl od elektronu, který se chová jako bodová částice.

Dnes se používá pro číslo Z označení **protonové číslo** (dříve **atomové číslo**), pro číslo N označení **neutronové číslo** a pro číslo A **nukleonové číslo** (dříve **hmotnostní číslo**).

Poznámky:

- K určení typu jádra stačí kterákoliv dvojice čísel. Obvykle se uvádí hodnoty protonového a nukleonového čísla.
- Elektrický náboj jádra je roven součtu nábojů všech nukleonů v jádře. Protože neutrony nemají elektrický náboj a protony mají elektrický náboj $+|e|$, platí pro elektrický náboj jádra $Q = Ze$ stejně jako v případě protonového modelu jádra. Jeho velikost je tedy určena protonovým číslem.

Hmotnostní úbytek jádra Δm

je rozdíl mezi klidovou hmotností jádra a celkovou klidovou hmotností volných nukleonů, z nichž se jádro skládá:

$$\Delta m = M - (Z m_p + N m_n).$$



Poznámky:

- **Vazebná energie** E_V systému částic se obvykle definuje jako energie uvolněná při vzniku systému z volných částic. Musíme tedy vždy vědět, o jaké částice se jedná a jaké je složení systému. Vazebná energie v případě jádra je energie, která by se uvolnila při vzniku jádra z volných nukleonů. Podle Einsteinova vztahu ekvivalence mezi hmotností a energií této energii odpovídá hmotnostní úbytek $\Delta m = E_V/c^2$.
- **Hmotnostní úbytek** odpovídající **vazebné energii jádra** je měřitelný, protože její hodnoty jsou velké (řádově MeV).
- Naproti tomu **hmotnostní úbytky** odpovídající vazebným energiím molekul nejsou měřitelné vzhledem k malým hodnotám **vazebných energií molekul** (řádově eV).

Úkol k textu

V tabulkách si zjistěte hmotnost jádra atomu helia obsahující dva protony a dva neutrony. Spočítejte jeho hmotnostní úbytek a příslušnou vazebnou energii.



2.1.4 KLASIFIKACE ATOMOVÝCH JADER A JEJICH ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY

Nejdůležitějšími charakteristikami, které určují složení jádra, jsou:

- **protonové číslo Z** (dříve atomové číslo) určující počet protonů v jádře,
- **nukleonové číslo A** (dříve hmotnostní číslo), určující počet nukleonů (protonů a neutronů) v jádře,
- někdy se navíc uvádí i **neutronové číslo $N = A - Z$** , které udává počet neutronů.



Nuklid

Látka, jejíž všechny atomy mají jádra se stejným *protonovým* a také stejným *nukleonovým* číslem, se označuje **nuklid**. Značí se symbolem



kde \mathbf{X} je značka chemického prvku s protonovým číslem Z a nukleonovým číslem A .

Poznámky:

- Daný nuklid je tedy určen *protonovým* a *nukleonovým* číslem.
- Někdy bývá vhodné uvést též *neutronové číslo* N (${}^A_Z\mathbf{X}^N$).
- O typu jádra určeném danou hodnotou Z a A hovoříme jako o **jádro nuklidu** ${}^A_Z\mathbf{X}$.



Úkol k textu

Srovnejte si pojem nuklid s pojmem prvek, který se používá v chemii.



Prvek,

přesněji chemický prvek, je látka, jejíž atomy (respektive jejich jádra) mají stejné protonové číslo.

Poznámky:

- Prvek představuje libovolnou podmnožinu množiny všech nuklidů, pro jejíž atomy platí, že mají stejné protonové číslo.
- Jednotlivé prvky jsou tedy určeny protonovým číslem.

Klasifikace jader

Nuklidy je možno třídit podle základních charakteristik jejich jader. Například je možno jádra třídit podle jejich složení.

Izotopy

jsou nuklidy, které mají shodná *protonová čísla*, ale liší se *nukleonovým* (též *neutronovým*) *číslem*.

**Izotopy vodíku**

Izotopy vodíku jsou ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$. Jejich atomová jádra obsahují vždy jeden proton, ale liší se počtem neutronů. Izotopy vodíku bývá zvykem označovat samostatnými názvy a značkami:



- **hydrogenium** (vodík, resp. lehký vodík), značka ${}^1_1\text{H}$,
- **deuterium** (těžký vodík, „středně těžký vodík“), značka ${}^2_1\text{D}$,
- **tritium** (supertěžký vodík), značka ${}^3_1\text{T}$.

České názvy (v závorkách) bývají zejména v populární literatuře neujednoceny.

Poznámky:

- Jednotlivé skupiny *izotopů* jsou tedy určeny *protonovým číslem*.
- Jedná se o všechny možné *nuklidy* příslušného *prvku*.
- V textu se často rozdíl mezi pojmem nuklid a izotop stírá, pokud máme na mysli konkrétní izotop (např. izotop vodíku ${}^2_1\text{H}$ je nuklid ${}^2_1\text{H}$).
- Ve značkách nuklidů je možno vynechat *protonové číslo*, které je jednoznačně určeno značkou *prvku*. V případě samostatných značek izotopů vodíku je možno vynechat i nukleonové číslo.
- *Chemický prvek* v přírodě bývá směsí *izotopů*.

Izotony

jsou *nuklidy*, které mají shodné *neutronové číslo* a liší se *nukleonovým* (a také *protonovým*) *číslem*.

**Poznámky:**

- Jednotlivé skupiny *izotonů* jsou tedy určeny *neutronovým číslem*.
- Pojem *izotony* se používá hlavně k vyjádření vztahu mezi dvěma jádry.

Příklad izotonů se dvěma neutrony

Nuklidy ${}^3_1\text{H}^2$ a ${}^4_2\text{He}^2$ jsou izotony. Jedná se o dva různé prvky.



**Izobary**

jsou *nuklidy*, které mají shodné *nukleonové číslo* a liší se *protonovým* (a také *neutronovým*) číslem.

Poznámky:

- Jednotlivé skupiny izobarů jsou tedy určeny nukleonovým číslem.
- Obdobně jako v předešlém případě se používá hlavně k vyjádření vztahu mezi dvěma jádry.

**Příklad izobarů se třemi nukleony**

Nuklidy ${}^3_1\text{H}$ a ${}^3_2\text{He}$ jsou izobary, obsahují stejný počet nukleonů.

**Izomer**

představuje označení určitého nuklidu s jádrem v metastabilním excitovaném stavu.

Poznámky:

- Toto označení má smysl jen ve vztahu k tomuto *nuklidu* s jádrem v *základním stavu*.
- Označení *izomer* bylo zvoleno jako analogie k pojmu izomer v chemii, se kterým se ale nesmí zaměňovat. V obou případech je izomer složen ze stejných počtů jednotlivých částic, ale liší se svou strukturou a chováním v reakcích.

**Příklad izomeru**

Existuje *izomer* protaktinia, který se označuje ${}^{234m}_{91}\text{Pa}$.

Zrcadlové jádro

je označení jádra, které se používá pouze ve vztahu k jinému jádru. Zrcadlové jádro k jádru určitého nuklidu ${}^A_Z\text{X}^N$ je jádro nuklidu ${}^A_N\text{X}^Z$ a naopak, tzn. jádra jsou zrcadlová navzájem.

**Příklad zrcadlových jader**

Jádra ${}^{10}_4\text{Be}^6$ a ${}^{10}_6\text{C}^4$ jsou vzájemně *zrcadlová jádra*.

Symetrické jádro

je jádro, které je samo sobě zrcadlovým jádrem, tj. má stejný počet protonů a neutronů.

Příklad symetrického jádra

Jádra ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$ jsou symetrická.

Sudo-sudé jádro je jádro se sudým Z a N .

Licho-liché jádro je jádro s lichým Z a N .

Sudo-liché jádro je jádro se sudým Z a lichým N .

Licho-sudé jádro je jádro s lichým Z a sudým N .

Příklady

Jádro ${}^4_2\text{He}^2$ je sudo-sudé, jádro ${}^{14}_7\text{N}^7$ licho-liché, jádro ${}^3_2\text{He}^1$ sudo-liché a jádro ${}^3_1\text{H}^2$ licho-sudé.

Radionuklid

je nestabilní nuklid, který se přeměňuje některým typem radioaktivní přeměny (viz kap. 2.2).

Další charakteristiky atomového jádra

Kromě čísel Z , A a N , která identifikují konkrétní jádro, si uveďme další charakteristiky.

Hmotnost atomového jádra M 

je rovna součtu hmotností protonů a neutronů v jádře, který je zmenšen o velikost hmotnostního úbytku $|\Delta m|$ ($\Delta m < 0$):

$$M = (Z m_p + N m_n) + \Delta m.$$

V jaderné fyzice se udává v násobcích atomové hmotnostní konstanty u nebo se místo ní uvádí odpovídající hodnota klidové energie Mc^2 v MeV.

Vazebná energie jádra E_V 

je energie, která by se uvolnila při hypotetickém vzniku jádra z volných nukleonů. Pro jádro o klidové hmotnosti M ji tedy můžeme definovat jako rozdíl mezi klidovou energií jádra $E = Mc^2$ (interagující nukleony) a celkovou klidovou energií volných (tj. neinteragujících) nukleonů, která je dána součtem klidových energií jednotlivých nukleonů. Pro vazebnou energii jádra tak platí

$$E_V = Mc^2 - (Z m_p c^2 + N m_n c^2).$$

V jaderné fyzice se vazebná energie udává v MeV.



Elektrický náboj jádra Q

se v jaderné fyzice uvádí v Z násobcích elementárního elektrického náboje, tj. $Q = Ze$, kde Z je protonové číslo. Místo Q se tedy užívá Z .

Obdobného postupu se používá i u jiných částic než jsou jádra, a tak číslo Z je **zobecněné protonové číslo** (určuje pouze náboj částice v násobcích e , nikoliv počet protonů v částici).

Zavedení izospinu nukleonů

Protony a neutrony se jako základní stavební částice jádra označují **nukleony**. Někdy se dokonce chápou proton a neutron jako dva nábojové stavy jedné částice – **nukleonu**.

Význam zavedení izospinu můžeme přiblížit na základě analogie se spinem. Podívejme se na úlohu spinu v atomu vodíku při Zeemanově jevu.



Spin a energie atomu vodíku v magnetickém poli

Atom vodíku s elektronem ve stavu $1s$ se může po vložení do magnetického pole nacházet ve dvou energetických stavech, které odpovídají dvěma různým hodnotám (magnetického) spinového čísla $m_s = \pm 1/2$ (po vynásobení Planckovou konstantou dostaneme odpovídající hodnoty z -ové komponenty spinu).

Podobně se předpokládá, že nukleon má dva energetické stavy (dvě různé hodnoty klidové energie), které odpovídají dvěma hodnotám z -ové komponenty nově zavedené veličiny izotopického spinu, stručně **izospinu \vec{T}** .

V analogii se spinem zavádíme pro nukleony kvantová čísla a kvantovací vztahy.



Izospin nukleonů

Izospinová čísla jsou $T = 1/2$, $T_z = \pm 1/2$.

Protože na rozdíl od spinu nemá izospin fyzikální rozměr, je T_z zároveň hodnotou z -ové komponenty, pro velikost izospinu platí $|\vec{T}| = \sqrt{T(T+1)}$.

Protonový stav nukleonu s klidovou energií $m_p c^2$ odpovídá izospinu $T_z = +1/2$.

Neutronový stav nukleonu s klidovou energií $m_n c^2$ odpovídá izospinu $T_z = -1/2$.

Poznámky:

- Izospin \vec{T} je formální vektor, který nemá klasickou analogii a který nesouvisí s otáčením v reálném prostoru.
- Pro jednoduchost se o hodnotách T a T_z hovoří jako o hodnotách izospinu.

Stav nukleonu

lze popsat třemi spojitými prostorovými souřadnicemi x , y a z a dvěma diskretními souřadnicemi m_s a T_z . Vlnová fce nukleonu je tedy $\Psi_{m_s, T_z}(x, y, z)$.

Poté, co jsme si objasnili pojem izospinu, vraťme se k výčtu charakteristik atomových jader.

Elektrický kvadrupólový moment

jádra se uvádí jako charakteristika jádra, protože dipólový elektrický moment jádra je nulový.

Izospin jádra

dostaneme složením izospinů jednotlivých nukleonů.



Pro jádra se sudým, resp. lichým A dostáváme celočíselnou, resp. poločíselnou (liché násobky $1/2$) hodnotu izospinu.

Jaderný spin J (též I)

je celkový moment hybnosti atomového jádra, které nevykonává žádný translační pohyb v prostoru. Tzn. jádro jako celek má orbitální moment hybnosti roven nule.



Z tohoto pohledu celkový moment hybnosti představuje „vlastní“ moment hybnosti jádra, tedy spin jádra. Hodnota jaderného spinu se získá součtem vlastních momentů hybnosti, tj. spinů, a orbitálních momentů hybnosti všech nukleonů v jádře. Odtud plyne, že jaderný spin není celkovým vlastním momentem hybnosti, tj. celkovým spinem, jednotlivých nukleonů v jádře.

Magnetický moment jádra μ_J

je celkový magnetický moment atomového jádra, které nevykonává žádný translační pohyb v prostoru.

Udává se v násobcích **jaderného magnetonu** $\mu_N = \frac{e \hbar}{2 m_p}$, kde m_p je klidová hmotnost protonu, e elementární elektrický náboj a \hbar škrtnutá Planckova konstanta.



Magnetický moment jádra je roven součtu magnetických momentů (vlastních i orbitálních) všech nukleonů.

V jaderné fyzice slouží **jaderný magneton** jako mimosoustavová jednotka, v níž se udávají hodnoty magnetického momentu jádra. Tento vztah je analogií vztahu pro Bohrov magneton.



Poloměr jádra

je fyzikální charakteristika jádra vycházející ze zjednodušené klasické představy atomového jádra jako ostře ohraničené koule. Poloměr jádra je poloměr této koule.

Jako charakteristika má pouze orientační význam, protože jádro není obecně sféricky symetrické a z hlediska kvantové mechaniky není ani ostře ohraničeno. V jakékoliv vzdálenosti od jádra existuje nenulová pravděpodobnost nalezení nukleonu jádra. Poloměr jádra je tedy poloměr koule, uvnitř které je vysoká pravděpodobnost nalezení nukleonů. V závislosti na hodnotě této pravděpodobnosti se pak mění poloměr jádra, proto se pracuje většinou jen s řádovou hodnotou, která odpovídá řádovému dosahu jaderných sil (10^{-15} m).

2.1.5 VLASTNOSTI A PODSTATA JADERNÝCH SIL



Jaderné síly

jsou síly působící mezi *nukleony* v jádře atomu.

- Jsou silami *krátkého dosahu*, který zhruba odpovídá lineárnímu rozměru jádra (řádově 10^{-15} m).
- Působí vždy jen mezi nejbližšími nukleony. Daný nukleon se tedy váže jen s omezeným počtem nukleonů, což označujeme jako *nasycení* jaderných sil.
- Ve srovnání s jinými typy interakcí jsou velmi *silné*, o čemž svědčí velké vazebné energie jader.
- Nepůsobí na částice označované jako *leptony*, mezi něž patří i *elektron*.

V porovnání s ostatními fyzikálními interakcemi (gravitační, slabá, elektromagnetická – viz základní fyzikální interakce) to dlouho byla na mikroskopické úrovni nejsilnější známá interakce. Dnes ji zahrnujeme pod tzv. silnou interakci (viz základní fyzikální interakce).

Poznámky:

- *Jaderné síly* mezi nukleony jsou speciálním případem projevu silné *interakce* v případě *hadronů* (viz systém elementárních částic).
- *Jaderné síly* jsou zbytkovým projevem univerzálnější *silné interakce mezi kvarky* (viz dále).

- **Jaderné síly** nepůsobí na částice, které neinteragují prostřednictvím silné interakce. Tyto částice se v systému elementárních částic označují jako **leptony**.
- **Nukleony** ovšem mohou na **leptony** působit prostřednictvím **elmg. interakce** (např. proton a elektron v atomu vodíku).
- **Gravitační interakce** je na mikroskopické úrovni ze všech interakcí nejslabší a proto se při řešení problémů v jaderné fyzice a ve fyzice elementárních částic zanedbává. V megaskopickém měřítku však může být významná (např. **neutronová hvězda**).
- Zatím nebyl nalezen univerzální zákon (analytický popis), který by popisoval **jaderné síly**.
- **Kvantem pole** jaderných sil jsou **mezony π** , které byly předpovězeny Yukawou a později experimentálně potvrzeny (viz dále).

Fyzikální pole a kvantum pole

Každé fyzikální pole je v principu možné v rámci kvantové teorie popsat jako excitace částic pole – tzv. **kvant pole**. O popisu pole pomocí kvant hovoříme jako o **kvantování pole**.

Každý typ **interakce** v přírodě může být popsán ve formě fyzikálního pole. Příslušná kvanta tohoto pole pak hrají roli zprostředkujících částic interakce.



Poznámky:

- V případě základních fyzikálních interakcí jsou kvanty pole vždy **bosony**.
- Interakce mezi částicemi lze popsat jako výměnu příslušných kvant, které jsou ovšem ve formě tzv. **virtuálních částic**.

Virtuální částice

Jsou to částice, které na rozdíl od tzv. skutečných nelze přímo pozorovat, aniž bychom je v procesu měření změnili na skutečné. Virtuální částice existují pouze po dobu, která je kratší než čas nutný ke změření jejich energie (podle **relací neurčitosti**).



Poznámky:

- Důsledkem existence **virtuálních částic** je pouze experimentálně pozorovatelná interakce.
- Virtuální částice vzniká v páru s příslušnou **antičásticí**, která má stejnou **klidovou hmotnost**, ale opačné hodnoty některých veličin, které se zachovávají, jako je např. **elektrický náboj**.

- Virtuální částice mohou existovat i ve vakuu (tzv. fyzikální vakuum).
- *Fyzikální vakuum* má ovšem střední hodnotu energie, kterou můžeme určit experimentálně, rovnu nule (neexistují v něm skutečné částice).



Kvantum elektromagnetického pole

Kvantem *elektromagnetického pole* jsou částice *fotony*.

Elektromagnetickou interakci mezi nabitými částicemi lze popsat jako vzájemnou výměnu virtuálních fotonů.

Yukawova teorie

Předpokládalo se, že analogicky jako v případě elektromagnetického pole, musí i v případě pole jaderných sil existovat zprostředkující částice neboli kvantum jaderných sil.

Roku 1935 Yukawa na základě dosahu jaderných sil odhadnul, že by to měly být částice s hmotností mezi hmotnostmi protonu a elektronu. Z tohoto důvodu byly tyto zatím hypotetické částice nazvány *mezony*.



Úkol k textu

Pokuste se s pomocí vztahu neurčitosti mezi energií a časem $\Delta E \Delta t \approx \hbar$, Einsteinova vztahu ekvivalence mezi hmotností a energií $E = mc^2$ a skutečnosti, že zprostředkující částice se může pohybovat nejvýše rychlostí světla, odvodit přibližný vztah mezi klidovou hmotností této částice m_0 a dosahem interakce Δs .

V r. 1938 byly částice přibližně o této hmotnosti objeveny v kosmickém záření a byly nazvány *mezony* μ (dnes se označují spíše jako *miony*), ale brzy se zjistilo, že jsou vůči jádrům zcela netečné, tzn. neinteragovaly s nimi *silnou interakcí*, resp. *jadernými silami*.

Teprve r. 1947 byly nalezeny ty pravé částice, které jsou odpovědné za jadernou interakci. Tyto nové částice byly pojmenovány jako *mezony* π (též *piony*).



Mezony π

Tyto částice jsou podle Yukawovy teorie kvantem pole jaderných sil. Známe tři typy mezonů π neboli **pionů**:

- kladně elektricky nabitý π^+ ,
- elektricky neutrální π^0 ,
- záporně elektricky nabitý π^- .

Nukleony v jádře si vyměňují virtuální piony, což se projeví jako jaderná interakce.

Poznámky:

- Vysláním nebo pohlcením neutrálního pionu se nemění typ nukleonu.
- Vysláním kladného, resp. záporného pionu se mění proton, resp. neutron na neutron, resp. proton.
- Pohlcením kladného, resp. záporného pionu se neutron, resp. proton mění na proton, resp. neutron.
- Celkový náboj jádra ani počet nukleonů se tak při těchto procesech nemění.

Další elementární částice

Po objevu elektronu a nukleonů se předpokládalo, že stavbu hmoty budeme moci objasnit pouze s pomocí několika elementárních částic. Vidíme ale, že jednoduchý obraz světa založený původně pouze na protonu, neutronu, elektronu a fotonu se hroučí. Do tohoto původního obrazu sice zapadají ještě piony. Avšak kromě na první pohled „neužitečných“ mionů se začaly objevovat také další elementární částice, které se přímo nepodílí na stavbě látky složené z atomů a molekul.

Průvodce studiem

Po přečtení této kapitoly už znáte nejen složení atomu, ale dokonce jeho atomového jádra. Víte také, proč drží jádro pohromadě. Existují ovšem jádra, která jsou nestabilní a mohou se přeměnit na jádra jiného prvku. Abyste se dozvěděli více, pusťte se do studia další kapitoly.



**Test**

Vyberte správná tvrzení (podrobný návod je uveden v testu na konci první kapitoly), označte je v tabulce za úkolem a srovnajte se správným řešením z klíče.

Úkol 8.**Přínos modelu atomového jádra**

- A. založeného pouze na protonech**
B. založeného na protonech a elektronech
C. označovaného jako Heisenbergův model

oproti vývojově předcházejícímu modelu spočívá v tom, že

- a) to je první model struktury snažící se objasnit stavbu atomového jádra
 b) umožňoval (bohužel mylně) objasnit emisi elektronů jádrem
 c) umožňoval vyřešit rozpor mezi pozorovanými hodnotami elektrického náboje a hmotností jádra.
 d) dává správné hodnoty gyromagnetického poměru pro jádro
 e) objasňuje vysokou vazebnou energii existenci jaderných sil
 f) vysvětluje existenci tzv. hmotnostního úbytku jádra
 g) objasňuje přítomnost mezonů μ v jádře
 h) objasňuje vznik kovalentní vazby

Tabulka pro označení správných odpovědí:

8. A	a	b	c	d	e	f	g	h
8. B	a	b	c	d	e	f	g	h
8. C	a	b	c	d	e	f	g	h

**Otázky**

- 1. Atomové jádro.** Objasněte pojem atomové jádro. Z kterého experimentu vyplývá existence atomového jádra? Stručně popište tento experiment a jeho výsledky. Uveďte základní vlastnosti atomového jádra. Definujte vazebnou energii jádra, napište vztah pro výpočet vazebné energie na základě znalosti hmotnosti jádra. Vysvětlete, proč je možné udávat v jaderné fyzice místo klidové hmotnosti jader jejich klidovou energii v MeV, definujte MeV, uveďte Einsteinův vztah ekvivalence hmotnosti a energie. Srovnajte řádovou hodnotu vazebné energie jader s řádovými hodnotami ionizační energie atomu nebo disociační energie molekuly.
- 2. Objev protonu.** Stručně popište experiment, při kterém byl objeven proton. Kdo ho objevil? Proveďte rozbor experimentu, stručně popište princip mlžné komory a vysvětlete proč detekuje pouze nabitě částice. Napište schéma příslušné přeměny a proveďte bilanci elektrického náboje během přeměny. Uveďte základní charakteristiky protonu a srovnajte je s charakteristikami elektronu a neutronu. Zařaďte proton do systému elementárních částic. V čem spočívá význam objevu protonu pro rozvoj představ o struktuře jádra?

3. **Vývoj modelů struktury jader.** Charakterizujte model jádra založený na protonech a model jádra založený na elektronech. Uveďte experimentální východiska každého modelu. Stručně popište představy modelů. Uveďte experimentální skutečnosti, které tyto modely nedokázaly objasnit. Srovnajte tyto představy se stavem současných poznatků, objasněte původ hmotnostního úbytku jádra, objasněte původ a vlastnosti sil, které drží jádro pohromadě, objasněte anomální hodnotu gyromagnetického poměru jádra, objasněte původ elektronů emitovaných některými jádry.
4. **Objev neutronu.** Stručně popište experiment, při kterém byl objeven neutron. Kdo ho objevil? Proveďte rozbor experimentu, napište schéma příslušné přeměny a proveďte bilanci elektrického náboje během přeměny. Uveďte základní charakteristiky neutronu a srovnajte je s charakteristikami elektronu a protonu. Zařaďte neutron do systému elementárních částic. V čem spočívá význam objevu neutronu pro rozvoj představ o struktuře jádra?
5. **Heisenbergův-Ivaněnkův model jádra.** Uveďte základní představy tohoto modelu. Jak tento model objasňuje stabilitu jádra obsahujícího protony? Uveďte základní vlastnosti jaderných sil. Napište vztah pro určení náboje jádra na základě znalosti počtu protonů v jádře. Napište vztah pro výpočet hmotnosti jádra na základě znalosti počtu protonů a neutronů v jádře a jeho hmotnostního úbytku. Objasněte původ hmotnostního defektu, proč není hmotnost jádra rovna součtu hmotností částic, z nichž se jádro skládá? Definujte pojem symetrické jádro.
6. **Nukleon.** Uveďte dva významy pojmu nukleon. Zařaďte nukleony do systému elementárních částic, uveďte jejich základní charakteristiky. Pozorujeme u nukleonů další vnitřní strukturu nebo je lze považovat za bodové částice? Srovnajte vlastnosti jednotlivých nukleonů. Objasněte pojem izospin.
7. **Nuklidy.** Objasněte pojem nuklid. Definujte protonové, neutronové a nukleonové číslo. Uveďte a vysvětlete symboliku značení nuklidu. Objasněte pojmy prvek, izotop, izoton, izobar, izomer a radionuklid. Srovnajte pojem izomer v jaderné fyzice s pojmem izomer v chemii.
8. **Základní charakteristiky atomového jádra.** Uveďte základní charakteristiky atomového jádra. Definujte jednotlivé charakteristiky, jejich vzájemné vztahy, popřípadě uveďte, jakých hodnot mohou nabývat. Uveďte, v jakých jednotkách se jednotlivé charakteristiky udávají.
9. **Jaderné síly.** Objasněte podstatu jaderných sil. Uveďte základní vlastnosti jaderných sil. Vysvětlete předpoklady Yukawovy teorie jaderných sil. Proveďte odhad hmotnosti mezonů na základě dosahu jaderných sil.

Korespondenční úkol

Zpracujte písemně otázky zadané tutorem, řiďte se přitom jeho pokyny.





Shrnutí kapitoly

Atomové jádro bylo objeveno v Rutherfordově experimentu. Další experimenty a objevy umožnily získat informace o struktuře jádra. Objev protonu vedl fyziky k představě, že jádro je složeno z protonů. Model jádra založeného pouze na kladně nabitých protonech však nedokázal zatím objasnit stabilitu jádra a navíc při správné hodnotě elektrického náboje jádra dával zcela nesprávné hodnoty hmotností jader. Předpoklad o existenci elektronů v jádře řešil tento problém jen částečně a dával také mnohem větší hodnoty magnetického momentu jádra, než odpovídalo skutečnosti. Teprve po objevu neutronu mohl Heisenberg spolu s dalšími fyziky vytvořit správnou představu o složení jádra.

Jádro se skládá z protonů a neutronů, které označujeme společným názvem nukleony. Jádro je možné charakterizovat celou řadou fyzikálních charakteristik, z nichž nejvýznamnější jsou protonové a nukleonové číslo. Tato čísla identifikují konkrétní jádro, resp. nuklid a umožňují klasifikovat jádra ve vztahu k ostatním jádrům.

Důležitou charakteristikou jádra je jeho hmotnost, která je oproti celkové hmotnosti nukleonů přítomných v jádře nižší o část nazývanou hmotnostní úbytek. Ten souvisí s vazebnou energií jádra, která nepřímo umožňuje posoudit stabilitu jádra.

Nukleony jsou v jádře drženy jadernými silami. Jaderné síly jsou síly krátkého dosahu a představují projev silné interakce, která je nejsilnější ze čtyř základních fyzikálních interakcí. Yukawa předpověděl na základě představ kvantové teorie pole vlastnosti zprostředkující částice jaderných sil, která byla nazvána mezon. Jeho předpověď byla experimentálně potvrzena objevem mezonů π neboli pionů.

