

6.3.4 Jaderná síla

Předpoklady: 060207, 040102, 010601

Rutherfordův pokus

Hmotnost a kladný náboj atomu jsou soustředěny ve velmi malé oblasti (v jádře) o rozměrech řádově 10^{-15} m. Velikosti kladného náboje jader se rovnají celočíselným násobkům náboje elektronu, hmotnosti jader se přibližně rovnají celočíselným násobkům (větším než náboje) jádra vodíku.

- uhlík: $Q = 6 \cdot e$, $m \doteq 12 m_H$
- kyslík: $Q = 8 \cdot e$, $m \doteq 16 m_H$
- argon: $Q = 18 \cdot e$, $m \doteq 40 m_H$

⇒ Jádra prvků jsou složena ze dvou druhů částic:

- proton (jádro vodíku), s kladným nábojem,
- neutron, částice se stejnou hmotností, ale bez náboje.

Vada na kráse: Existuje mnoho prvků, kde to s hmotností atomů zas tak moc nevychází:

- chlor: $m \doteq 35,5 m_H$,
- železo: $m \doteq 55,8 m_H$,
- měď: $m \doteq 63,5 m_H$.

Vysvětlení: Všechny atomy jednoho prvku nejsou stejné. Mají stejný náboj jádra, stejný elektronový obal, ale mohou se lišit v hmotnosti (jádra) ⇒ jádra obsahují různý počet neutronů. Například u chloru existují dva druhy atomů:

- 75,4% atomů $m \doteq 35 m_H$,
- 24,6% atomů $m \doteq 37 m_H$.

Př. 1: Ověř, že existence dvou druhů atomů chloru vysvětluje naměřenou hmotnost chloru $m \doteq 35,5 m_H$.

$$m = 0,754 \cdot 35 + 0,246 \cdot 37 = 35,5$$

Ano, pokud jsou atomy chloru smíchány z uvedených dvou druhů v uvedeném poměru, vysvětlíme naměřenou hmotnost.

Chemicky čistý prvek tvoří většinou směs atomů s různými počty neutronů v jádře. Prvek složený z jader se stejným počtem neutronů nazýváme nuklid (izotop).

Označení nuklidu ${}^A_Z X$:

- Z : protonové číslo (počet protonů),
- A : nukleonové číslo (počet protonů a neutronů dohromady),
- $N = A - Z$: neutronové číslo.

${}^{63}_{29}\text{Cu}$ - nuklid mědi s 29 protony, 63 nukleony a 34 neutrony.

Př. 2: Proč mají různé nuklidy téhož prvku stejné chemické vlastnosti? V kterých vlastnostech se mohou lišit?

Stejný počet protonů v jádře \Rightarrow stejný počet elektronů v obalu \Rightarrow stejné valenční orbitály \Rightarrow stejné chemické vlastnosti.

Nuklidy se mohou lišit v hmotnosti a v dalších vlastnostech svázaných s jádrem (spin jádra, stabilita, ...).

Př. 3: Rozhodni, zda je technicky jednodušší oddělovat od sebe nuklidy lehkých prvků (jako je třeba vodík) nebo těžkých prvků (jako je třeba uran). Navrhni fyzikální jevy, které je možné použít pro oddělení nuklidů jednoho prvku od sebe.

Ve všech příkladech se jádra jednotlivých nuklidů liší pouze o několik málo neutronů:

- atom vodíku ${}^3_1\text{H}$ je třikrát těžší než atom vodíku ${}^1_1\text{H}$,
- atom uranu ${}^{238}_{92}\text{U}$ je těžší než atom ${}^{235}_{92}\text{U}$ pouze 1,013 krát,

\Rightarrow rozdíly ve fyzikálních vlastech jsou u lehkých prvků daleko větší než u prvků těžkých \Rightarrow obecně se snáze oddělují nuklidy lehčích prvků.

Oddělování vždy probíhá v plynném nebo ionizovaném stavu (v pevném i kapalném jsou atomy promíchány a přitahují se).

Metody:

- **odstřed'ování:** Plynná látka se roztočí v odstředivce, těžší nuklidy mají větší tendenci shromažďovat se u okrajů, nutnost několikanásobného (stovky) kaskádovitého oddělování, dnes nejpoužívanější metoda pro obohacování uranu.
- **difúze:** Plynné částice procházejí přes porézní překážku. Těžší atomy jsou pomalejší. Je třeba opět stovky až tisíce průchodů. Takto se obohacoval uran pro první bomby.
- **elektromagnetická separace:** Urychlené ionty se vychylují v magnetickém poli, neúčinnější a nejpřesnější, ale energeticky nejnáročnější metoda.

Nuklidy prvků se často zobrazují do grafu, kde je jejich poloha určena protonovým (svislá osa) a neutronovým (vodorovná osa číslem).

Interaktivní graf: <http://www-nds.iaea.org/relnsd/vchart/>.

Jednodušší varianta grafu: <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>.

Co z grafu vidíme?

- Jádro se nemůže skládat z libovolné kombinace neutronů a protonů (v lehčích jádrech je obou druhů částic přibližně stejně, u těžších jader narůstá převaha neutronů).
- Většina jader není stabilní a časem se samovolně rozpadá.
- Nejtěžším stabilním jádrem je ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ \Rightarrow neexistují stabilní jádra s více než 83 protony.
- Stabilní jádra tvoří dno "údolí stability". Čím jsou ostatní jádra v diagramu ode dna údolí dále, tím rychleji se rozpadají.

http://www.phy.anl.gov/gammasphere/pub/logos_98.html

Př. 4: Velikost atomového jádra ${}^4_2\text{He}$ je řádově 10^{-15} m .

- Urči gravitační sílu, kterou se přitahují protony v jádře.
- Urči elektrickou sílu, kterou se protony v jádře odpuzují.
- Pomocí relací neurčitosti urči rychlosti pohybu protonů v jádře.
Co získané výsledky znamenají pro stabilitu jádra?

a) Urči gravitační sílu, kterou se přitahují protony v jádře.

$$F_g = \kappa \frac{m_1 m_2}{r^2} = \kappa \frac{m_p^2}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(1,67 \cdot 10^{-27})^2}{(10^{-15})^2} \text{ N} = 1,9 \cdot 10^{-34} \text{ N}$$

b) Urči elektrickou odpudivou sílu, kterou se protony v jádře odpuzují.

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4 \cdot \pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (10^{-15})^2} \text{ N} = 230 \text{ N}$$

c) Pomocí relací neurčitosti urči rychlosti pohybu protonů v jádře.

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta x \cdot m \Delta v \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta v \geq \frac{h}{4\pi \Delta x \cdot m} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{4\pi \cdot 10^{-15} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}} \text{ m/s} = 3,1 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

Co získané výsledky znamenají pro stabilitu jádra?

Podle předchozích výsledků nemůže jádro držet pohromadě, přitažlivá gravitační síla je ve srovnání s odpudivou elektrickou zanedbatelně malá, navíc se protony pohybují obrovskou rychlostí \Rightarrow protony a neutrony v jádře musí přitahovat nějaká další nám dosud neznámá přitažlivá síla.

Př. 5: Co výsledky předchozího příkladu znamenají pro vlastnosti síly, která drží jádro pohromadě?

Jaderná síla musí být v jádře (podstatně) silnější než elektrická síla (musí překonat elektrické odpuzování a ještě zabrzdit rychlé nukleony, aby se nedostaly z jádra ven).

Mimo jádro musí být jaderná síla slabší než síla elektrická, jinak by se všechna jádra spojila do jednoho (klesá tedy rychleji než s druhou mocninou vzdálenosti).

Př. 6: Jaké další vlastnosti pro jadernou sílu vyplývají z existence radioaktivního rozpadu (porovnej s gravitační silou u různě těžkých vesmírných těles)? Jakou roli hrají v jádře neutrony?

Velká jádra se rozpadají na menší (neexistují stabilní jádra, která mají více než 208 nukleonů) \Rightarrow jaderná síla drží pohromadě lépe menší jádra než velká \Rightarrow nukleon je zřejmě schopen přitahovat jadernou silou pouze omezený počet nukleonů (gravitační síla funguje opačně. Čím je planeta těžší (skládá se z většího počtu částic), tím lépe drží částice pohromadě a je těžší z ní uniknout).

Stabilita atomových jader je způsobena **jadernou silou** (častěji označovaná jako **silná interakce**). Je o další základní typ fyzikální síly. Silná interakce:

- je na krátkých vzdálenostech nejsilnější známou fyzikální silou,
- její velikost klesá se vzdáleností exponenciálně (proto je mimo jádro slabší než síla elektrická),
- může se nasýtit (každý nukleon je schopen se přitahovat pouze s omezeným počtem jiných nukleonů).

Přesný popis silné interakce dosud nemáme.

Hmotnostní spektrometr: Atomy ionizujeme, urychlíme v elektrickém poli a pak vpustíme do pole magnetického: v závislosti na hmotnosti, rychlosti a náboji částice zatáčí \Rightarrow velmi přesné měření hmotnosti jader.

\Rightarrow **Problém:** hmotnost jádra je menší než hmotnost částic, ze kterých je vytvořeno.

Hélium ${}^4_2\text{He}$: $m_{\text{He}} = m_{\alpha} = 6,64466 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Hmotnost částic: $m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $m_n = 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

$m = 2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n = 2 \cdot 1,67262 \cdot 10^{-27} + 2 \cdot 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 6,69510 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

\Rightarrow Jádro je o $5,05 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$ lehčí než by mělo být (není to mnoho, ale pořád je to 0,76% jeho hmotnosti).

Jak je to možné?

Částice jádra jsou k sobě přitahovány neuvěřitelně velkou silou (když je přiblížíme na dostatečně malou vzdálenost) \Rightarrow

- během spojování energii ztratí,
- pokud je chceme odtrhnout, musíme jim energii dodat.

Částice spojené v jádře mají menší energii než částice nespojené \Rightarrow podle vztahu $E = mc^2$ musí mít jádro nejen menší energii ale i menší hmotnost \Rightarrow z hmotnosti jader se můžeme dozvědět, jak velkou energií jsou částice v jádře drženy pohromadě.

Vazebná energie v jádře ${}^4_2\text{He}$:

$E = \Delta mc^2 = 5,05 \cdot 10^{-29} \cdot 299792000^2 = 4,54 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 28300000 \text{ eV} = 28,3 \text{ MeV}$

Pro jeden nukleon: $\frac{28,3}{4} = 7,07 \text{ MeV}$.

Rozdíl hmotností jádra a oddělených částic se říká **hmotnostní úbytek**

$B = (m_1 + m_2 + \dots + m_n) - m$.

Hmotnostnímu úbytku odpovídá **vazebná energie** $E_v = Bc^2$.

Vazebná energie připadající na jeden nukleon se značí $\varepsilon_v = \frac{E_v}{A}$.

Pedagogická poznámka: V následujícím příkladu samozřejmě nepočítáme všechno společně. Každý žák dostane svůj nuklid, spočítá ε_v a výsledky vynášíme do grafu.

Pro kontrolu mám připravený sešit v excelu.

Př. 7: Urči vazebnou energii připadající na jeden nukleon pro prvky v tabulce. Hmotnost je uvedena jako hmotnost celého atomu (včetně elektronů).

	$m[\mu u]$		$m[\mu u]$		$m[\mu u]$		$m[\mu u]$		$m[\mu u]$
${}^2_1\text{H}$	2014101	${}^3_2\text{He}$	3013029	${}^7_3\text{Li}$	7013005	${}^9_4\text{Be}$	9012182	${}^{11}_5\text{B}$	11009305
${}^{12}_6\text{C}$	12000000	${}^{14}_7\text{N}$	14003074	${}^{16}_8\text{O}$	15997915	${}^{19}_9\text{F}$	18998403	${}^{20}_{10}\text{Ne}$	19992440
${}^{23}_{11}\text{Na}$	22989769	${}^{27}_{13}\text{Al}$	26987539	${}^{28}_{14}\text{Si}$	27976927	${}^{32}_{16}\text{S}$	31972071	${}^{40}_{18}\text{Ar}$	39965383
${}^{56}_{26}\text{Fe}$	55934937	${}^{63}_{29}\text{Cu}$	62929597	${}^{75}_{33}\text{As}$	74921595	${}^{84}_{36}\text{Kr}$	83911507	${}^{112}_{48}\text{Cd}$	111902758
${}^{133}_{55}\text{Cs}$	132905452	${}^{153}_{63}\text{Eu}$	152921238	${}^{184}_{74}\text{W}$	183950931	${}^{195}_{78}\text{Pt}$	194964791	${}^{197}_{79}\text{Au}$	196966567
${}^{208}_{82}\text{Pb}$	207976652	${}^{209}_{83}\text{Bi}$	208980399	${}^{235}_{92}\text{U}$	235043929	${}^{238}_{92}\text{U}$	238050788	${}^{254}_{99}\text{Es}$	254088023

Výpočet vazebné energie na 1 nukleon pro ${}^{112}_{48}\text{Cd}$.

Hmotnost atomu ${}^{112}_{48}\text{Cd}$:

$$m_{Cd} = 111,902756 \cdot u = 111,902756 \cdot 1,66053873 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,858189 \cdot 10^{-25} \text{ kg}.$$

$$\text{Hmotnost jádra: } m_{jCd} = 1,858189 \cdot 10^{-25} - 48 \cdot 9,1093819 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 1,85775175 \cdot 10^{-25} \text{ kg}.$$

Hmotnostní úbytek:

$$48 \cdot m_p + 62 \cdot m_n - m_j = 48 \cdot 1,6726216 \cdot 10^{-27} + 62 \cdot 1,674927 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,706 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

$$\text{Energie: } E = mc^2 = 1,706 \cdot 10^{-27} \cdot 299792000^2 \text{ J} = 1,5333 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 956,9990000 \text{ MeV}.$$

$$\text{Vazebná energie na jeden nukleon: } \varepsilon_v = \frac{E_v}{A} = \frac{957}{112} \text{ MeV} = 8,5 \text{ MeV}.$$

Podobným způsobem řešíme příklad i u dalších jader.

Shrnutí: Jádro drží pohromadě nová fyzikální síla - silná interakce.