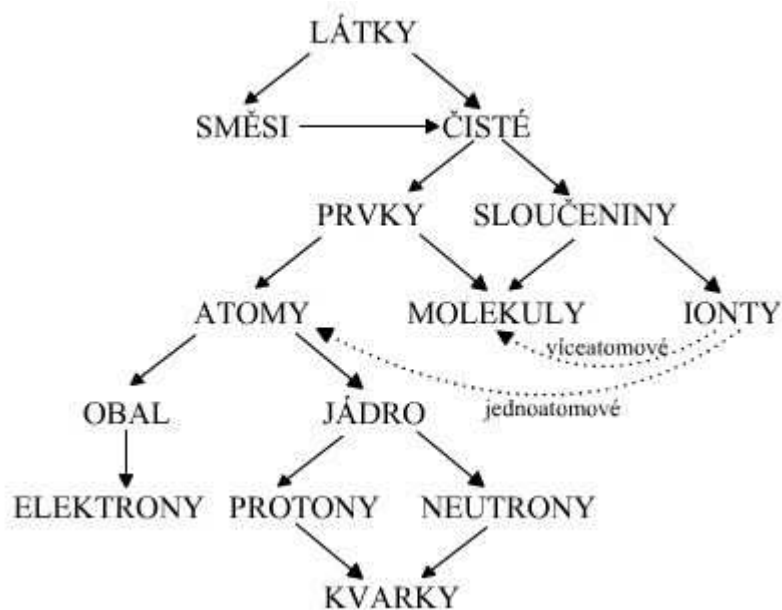


1. Struktura hmoty

Hmota je tvořena z hlediska vnějšího pohledu různými látkami.

Následující schéma uvádí tento pojem do souvislosti s dalším členěním:



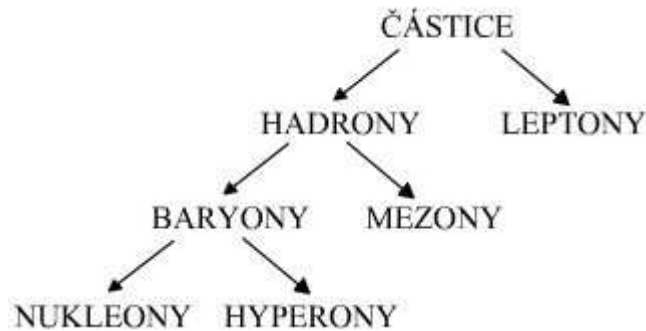
Atomy jsou tvořeny **elementárními částicemi** (pojem původně vyhrazený pro nedělitelný útvar bez vnitřní struktury)

Elementární částice dnes – cca

100 částic

+ 100 antičástic

Následující schéma naznačuje zjednodušeně členění elementárních částic.



Leptony

- vyznačují se slabými interakcemi
- nemají vnitřní strukturu
- lze je považovat za fundamentální částice

| | |
|---|--------------------------|
| Leptonové číslo pro leptony: | $1/2$ |
| Leptonové číslo pro antileptony: | $-1/2$ |
| Náboj: | 0 nebo -1 |

| Nábojová čísla a hmotnosti leptonů | | | |
|---|------------|-----------|---|
| | | Z | m(u) |
| elektron | e^- | -1 | $5,5 \cdot 10^{-4} (m_0)$ |
| elektronové neutrino | ν_e | 0 | $\leq 5 \cdot 10^{-9}$ |
| mion | μ^- | -1 | 0,1135 |
| mionické neutrino | ν_μ | 0 | $< 505 \cdot 10^{-4}$ |
| tauon | τ^- | -1 | 1,908 |
| tauonické neutrino | ν_τ | 0 | $< 0,26$ |

Doba života mionu a tauonu je krátká (10^{-6} , resp. 10^{-13} s).

Zákon zachování leptonového čísla:

Celkové leptonové číslo je před interakcí a po ní stejné

Hadrony (je jich cca 200)

| | | |
|-----------------|---------------------------------------|---------------------------|
| | | spin |
| Mezony: | | 0 nebo celočíselný |
| Baryony: | nukleony (proton, neutron) | 1/2, 3/2 |
| | hyperony (částice těžší než nukleony) | |

| | |
|--|----|
| Baryonové číslo pro baryony: | 1 |
| Baryonové číslo pro antibaryony: | -1 |
| Baryonové číslo pro mezony a leptony: | 0 |

Platí **zákon zachování baryonového čísla**

Fundamentální částice

Velký počet hadronů a antihadronů je dán představou o jejich vnitřní struktuře, které jsou tvořeny malým počtem

fundamentálních částic druhého typu, tzv. kvarků

(je jich 6 druhů, mají baryonové číslo $B = 1/3$ a zlomkový elektrický náboj $Z = 2/3$ nebo $-1/3$)

Označení kvarků - termín „vůně“ (flavour)

Vlastnosti kvarků :

| | |
|--------------------------------|----------|
| nábojové číslo | Z |
| podivnost (strangeness) | S |
| půvab (charm) | C |
| krása (beauty) | B |
| pravda (truth) | T |

| kvark | vůně | hmotnost (u) |
|-----------------|---------|---------------|
| d | down | 0,0086 |
| u | up | 0,0054 |
| s | strange | 0,17 |
| c | charm | 1,61 |
| b | bottom | 4,56 |
| t (1994) | top | 193 |

Pravidla pro kvarkovou skladbu hadronů:

- **baryon** obsahuje vždy **tři kvarky** antibaryon obsahuje **tři antikvarky**

Vlastnosti některých baryonů

| | hmotnost (u) | Z | kvarkové složení |
|---------------|--------------|----|------------------|
| p | 1,0072765 | +1 | <i>uud</i> |
| n | 1,0086650 | 0 | <i>udd</i> |
| Λ | 1,198 | 0 | <i>uds</i> |
| Σ^+ | 1,227 | +1 | <i>uus</i> |
| Σ^- | 1,277 | -1 | <i>dds</i> |
| Ω^- | 1,795 | -1 | <i>sss</i> |
| Λ_c^+ | 2,42 | +1 | <i>udc</i> |

- **mezon** obsahuje **jeden kvark** a **jeden antikvark**

Vlastnosti některých mezonů

| | hmotnost (u) | Z | kvarkové složení |
|-----------|--------------|----|---|
| π^+ | 0,150 | +1 | <i>u\bar{d}</i> |
| π^- | 0,150 | -1 | <i>d\bar{u}</i> |
| π^0 | 0,145 | 0 | <i>u\bar{u} nebo d\bar{d}</i> |
| K^+ | 0,530 | +1 | |
| K^- | 0,530 | -1 | |
| Φ | 1,095 | 0 | atd.... |
| J/ Ψ | 3,32 | 0 | |
| D^0 | 2,00 | 0 | |
| D^+ | 2,005 | +1 | |

- **baryonová, nábojová a další kvantová čísla kvarků se sčítají dávají kvarku pozorované vlastnosti**

Příčinou soudržnosti kvarků jsou tzv. **silné interakce** (je cca 100 x silnější než interakce elektromagnetické).

Silná interakce:

- je zprostředkována výměnnou jinou částicí, která má velmi krátkou dobu života (tato částice je po emisi jednou částicí okamžitě absorbována druhou interagující částicí – nelze ji proto jako částici zaznamenat -**virtuální částice**)
- **kvanta silového pole mezi kvarky** se nazývají **gluony**, které jsou nehmotné a nemají elektrický náboj
- působení interakcí mezi kvarky je omezeno na malý prostor
- kvarky nemohou existovat samostatně (k jejich uvolnění by bylo zapotřebí extrémně vysoké energie) – proto pozorujeme pouze jejich přeskupování za vzniku jiných mezonů a hadronů.
- proces výměny je komplikovaný, neboť každý kvark může existovat ve třech kvantových stavech označovaných jako **barva** (**červená**, **modrá**, **zelená**)
- Pojem barva lze si představit jako „velmi silný“ elektrický (barevný) náboj, který je podstatou silné interakce
- podle teorie musí být vznikající hadron **bezbarvý** ⇒ kvarky se musí vhodně kombinovat (**analogie se skládáním barev v barevné fotografii**)
- při výměně gluonu mezi dvěma kvarky mění oba kvarky svou barvu tak, aby hadron zůstal bezbarvý

Elementární a fundamentální částice pro oblast atomů, jader

a jejich radioaktivní přeměny

je dána pouze čtyřmi fundamentálními částicemi první generace

| | |
|-----------------------------|-----------------|
| elektron | e^- |
| elektronové neutrino | ν_e |
| kvark <i>u</i> | <i>u</i> |
| kvark <i>d</i> | <i>d</i> |

Další generace fundamentálních částic vytvářejí neobvyklé a nestálé hadrony při interakci částic s vysokou energií.

Existují i neobvyklé kombinace dalších leptonů a hadronů – vznikající atomy se nazývají **exotické**

Možné jsou i **antiatomy**, které jsou tvořeny pouze antičásticemi (poprvé v r. 1996)

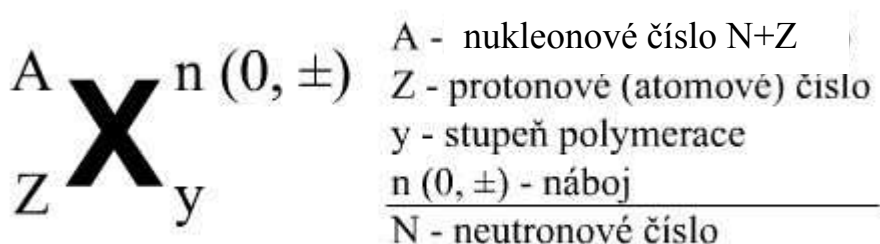
2. Atomové jádro a jeho stabilita

Atom je nejmenší hmotnou a **chemicky nedělitelnou částicí**.

Je tvořen **jádrem**, které obsahuje protony a neutrony, a **elektronovým obalem**.

| Elementární částice tvořící atom | | | | |
|----------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Elementární částice | Objevitel (rok) | Hmotnost | Náboj e/C | Symbol |
| | | m/u | | |
| proton | Rutherford (1920) | 1,0072 | kladný $1,60210 \cdot 10^{-19}$ | p^+ nebo 1_1p |
| neutron | Chadwick (1932) | 1,0086 | nemá náboj | n^0 nebo 1_0n |
| elektron | Thomson (1897) | $5,4857 \cdot 10^{-4}$ | záporný $1,60210 \cdot 10^{-19}$ | e^- nebo ${}^0_{-1}e$ |

- **protonové (atomové) číslo Z** (počet protonů v jádře),
- **neutronové číslo N** udává počet neutronů



- Soubor atomů, které mají stejné atomové číslo Z (N mohou mít různé) se nazývá **prvkem**
- Soubor naprosto identických atomů, které mají stejné atomové číslo Z a neutronové číslo N, přičemž $Z \neq A$ (jediná výjimka je jádro lehkého vodíku 1_1H), se nazývá **nuklidem**

- Pojem **izotop** je nutno na rozdíl od pojmu nuklid chápat spíše kvalitativně. Tento pojem vyjadřuje skutečnost, že prvek je tvořen několika typy jader, tedy atomy, které mají stejné Z , ale mohou se lišit počtem neutronů v jádře. Použití pojmu izotop (izotopy) snad nejlépe vyplyne z tvrzení: Vodík je přírodě zastoupen třemi izotopy. Jsou to nuklidy ^1_1H , ^2_1H a ^3_1H .

| Prvky polyizotopické | | | | |
|----------------------|----------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------|
| Prvek | A_r (stř.) | Izotop | Výskyt v přírodní izotopové směsi (%) | A_r |
| Vodík | 1,0179 | ^1H | 99,985 | 1,007825 |
| | | ^2H | 0,015 | 2,014102 |
| Lithium | 6,941 | ^6Li | 7,52 | 6,015126 |
| | | ^7Li | 92,48 | 7,016005 |
| Uhlík | 12,011 | ^{12}C | 98,892 | 12,00000 |
| | | ^{13}C | 1,108 | 13,003354 |
| Kyslík | 15,9994 | ^{16}O | 99,759 | 15,994915 |
| | | ^{17}O | 0,037 | 16,999133 |
| | | ^{18}O | 0,204 | 17,999150 |
| Draslík | 39,08 | ^{39}K | 93,08 | 38,963714 |
| | | ^{41}K | 6,92 | 40,961385 |
| Cín | 118,69 | ^{112}Sn | 0,96 | 111,904940 |
| | | ^{114}Sn | 0,66 | 113,902960 |
| | | ^{115}Sn | 0,35 | 114,903530 |
| | | ^{116}Sn | 14,30 | 115,902110 |
| | | ^{117}Sn | 7,61 | 116,903060 |
| | | ^{118}Sn | 24,03 | 117,901790 |
| | | ^{119}Sn | 8,58 | 118,903390 |
| | | ^{120}Sn | 32,85 | 119,902130 |
| | | ^{122}Sn | 4,72 | 121,903410 |
| ^{124}Sn | 5,94 | 123,905240 | | |
| <i>Uran</i> | | ^{235}U | 0,72 | 235,03493 |
| | | ^{238}U | 99,28 | 238,050760 |

| | | |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Prvky monoizotopické | beryllium (^9Be) | fosfor (^{31}P) |
| | fluor (^{19}F) | kobalt (^{59}Co) |
| | sodík (^{23}Na) | jod (^{127}I) |
| | hliník (^{27}Al) | zlato (^{197}Au) aj. |

Dnes je známo více než 2000 nuklidů, z nichž je pouze 266 stabilních. Ostatní jsou nukleárně nestabilní, a proto podléhají radioaktivnímu rozpadu.

Pojem **radioaktivní prvek** lze použít pouze pro prvky:

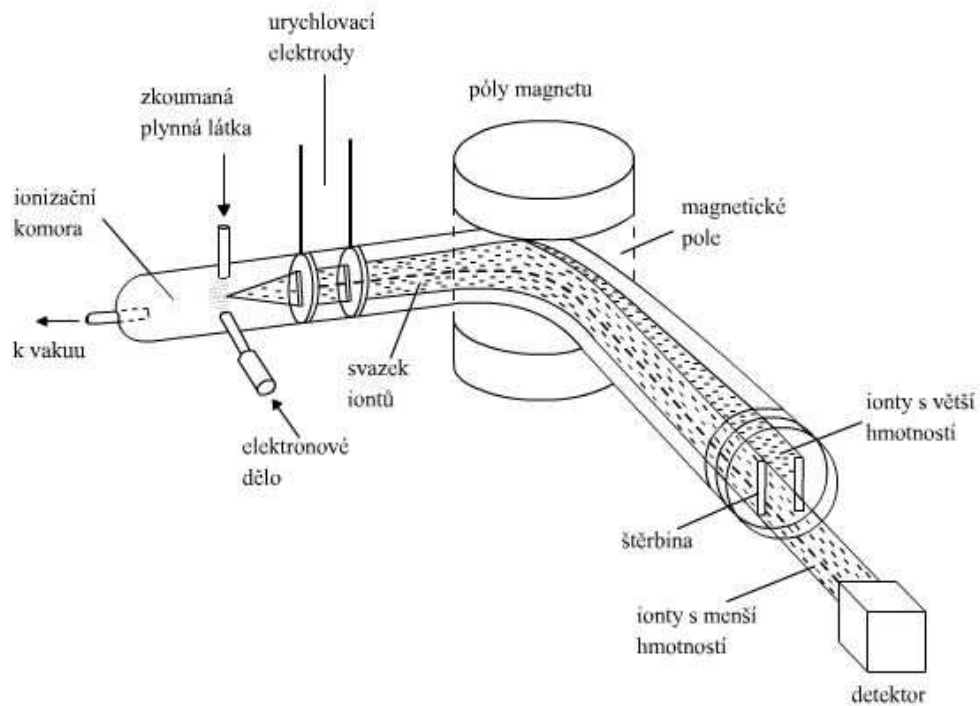
- které nemají stabilní nuklidy
 - mohou se vyskytovat v přírodě nebo jsou připraveny uměle
 - neoznačují se tak prvky, které mají pouze jeden radioaktivní izotop s malou aktivitou.
-
- Pojem **izobary** (používá se v množném čísle) je vyhrazen nuklidům, které mají stejné nukleonové a různé protonové číslo, např.



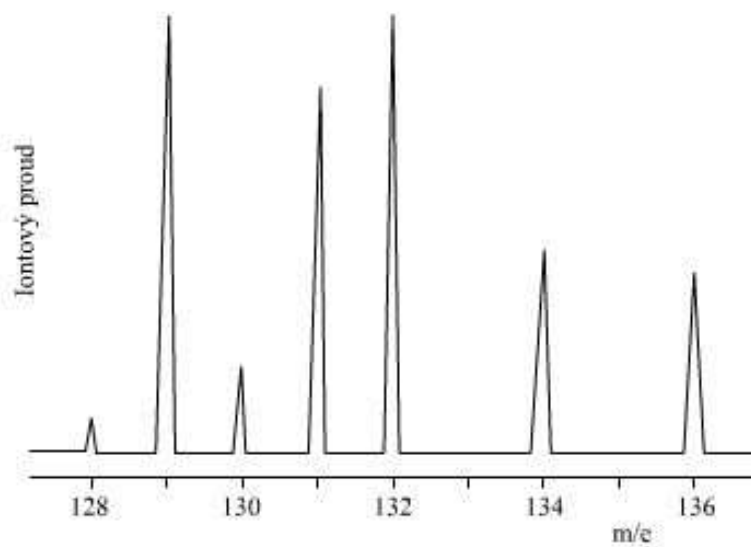
(Platí pravidlo, které říká, že v takové řadě nuklidů bývá prostřední radioaktivní).

- **Izotony** (příliš se nepoužívá) představují nuklidy, které mají stejný počet neutronů v jádře, např. ^3_1H a ^4_2He .

Hmotnost nuklidů a jejich zastoupení v přírodní směsi se dá zjistit např. **hmotnostní spektrometrií**.



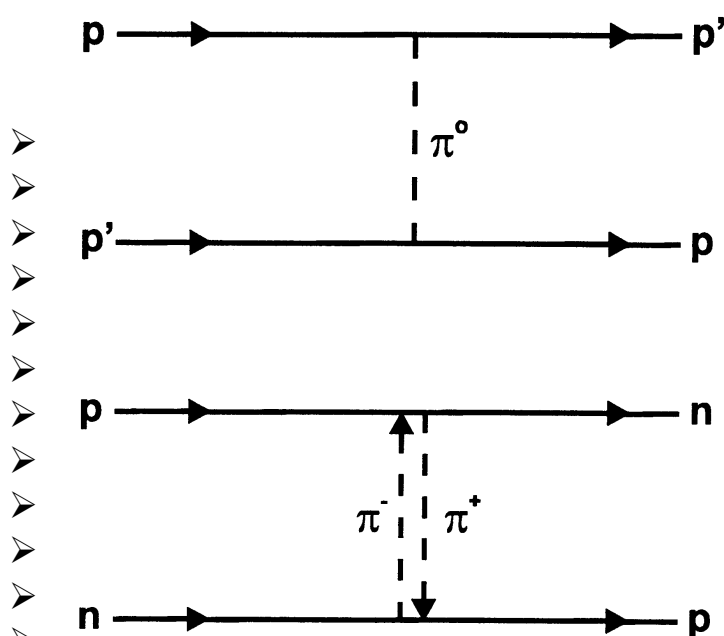
Hmotnostní spektrum xenonu



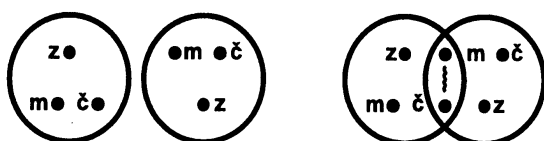
| Izotopové složení přírodního xenonu [%] | | | | | |
|---|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
| ^{124}Xe | 0,095 | ^{129}Xe | 26,44 | ^{132}Xe | 26,89 |
| ^{126}Xe | 0,090 | ^{130}Xe | 4,08 | ^{134}Xe | 10,44 |
| ^{128}Xe | 1,915 | ^{131}Xe | 21,18 | ^{136}Xe | 8,87 |

Atomové jádro

- Jádra běžných atomů se skládají z protonů a neutronů, mezi kterými existují silné jaderné interakce. Je v nich soustředěna prakticky veškerá hmotnost atomu
- Nukleony mají svůj jaderný spin rovný $\frac{1}{2}$
- Částice jádra mají své vlastní uspořádání, které popisuje např. hladinový nebo kapkový model jádra
- Mezi nukleony působí silné jaderné interakce, které jsou podstatou jaderných sil (**výměna virtuálního pionu**)



Výměnné reakce nukleonů



Výměna gluonu mezi dvěma nukleony

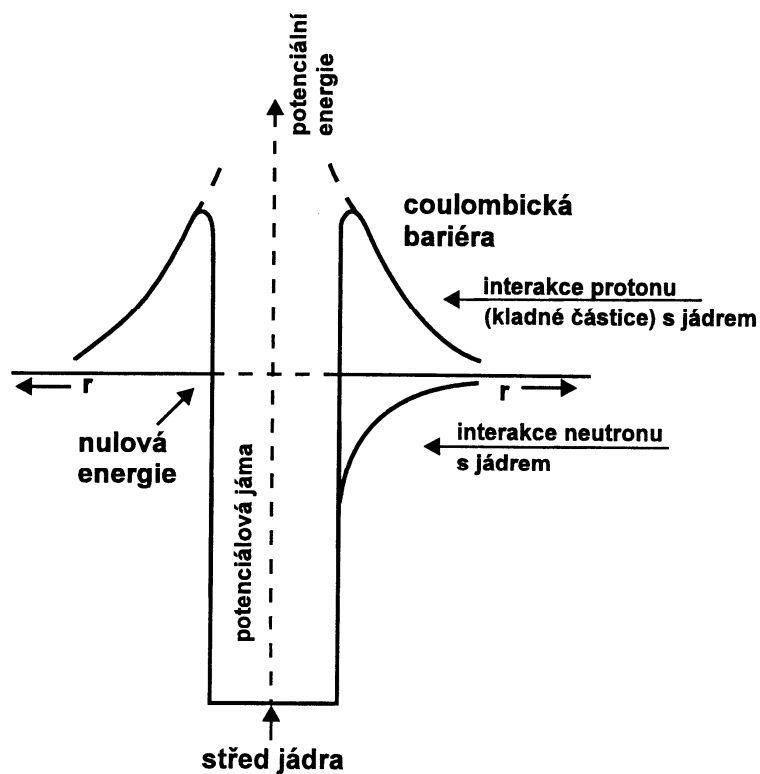
- působnost jaderných sil je omezen na oblast jádra – síly mají krátký dosah (cca 10^{-15} m). Hovoříme o **p** **poloměru jádra**

$$r = r_0 \cdot A^{1/3}$$

($r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ m, A je počet nukleonů)

- jaderné síly jsou nábojově nezávislé (možnost výměny mezi protonem a neutronem)
- krátká doba interakce (10^{-23} s)

Průběh interakce mezi jádrem a dalším nukleonem, potenciálová jáma a bariéra



Výška potenciálové bariéry (v MeV)

$$B = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$$

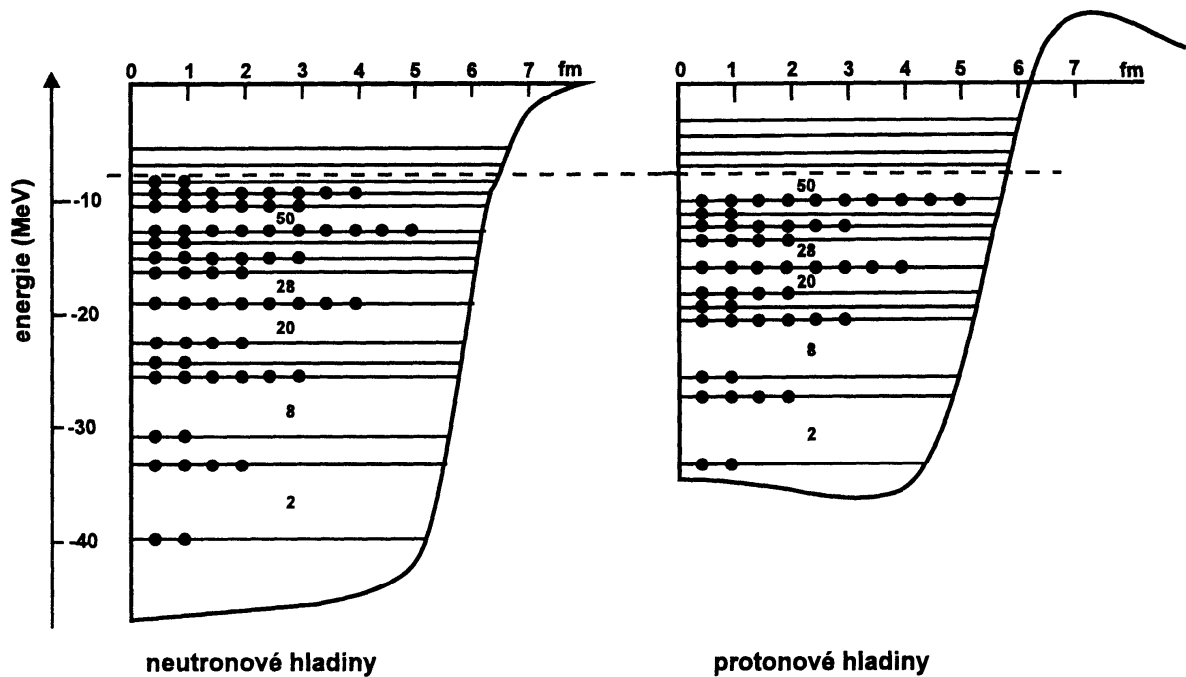
(obdoba Coulombova zákona)

Z_1, Z_2 – protonová čísla jádra a kladné částice (zde protonu)

A_1, A_2 – jejich nukleonová čísla

Hladinový model jádra

- spin protonu i neutronu je $\frac{1}{2}$
- platí obdoba Pauliho principu: nukleony v potenciálové jámě obsazují posupně jednotlivé kvantové stavy a vyšší stav se obsadí tehdy, až je nižší plně obsazen
- pro výpočet energie nukleonů platí obdobné vztahy jako pro elektrony (částice mají dualistický charakter)
- pro protony a neutrony existují samostatné soustavy energetických hladin



- Protonové slupky obsahují při plném zaplnění

2, 6, 12, 18, 22 a 32 protonů

- Neutronové slupky obsahují při plném zaplnění

2, 6, 12, 18, 22, 32 a 44 neutronů

- Pokud má jádro jednu nebo více slupek zaplněných, pak obsahuje celkem

- 2, 8, 20, 28, 50 nebo 82 protonů,
- resp. 2, 8, 20, 28, 50, 82 nebo 126 neutronů

Jde o tzv. **magická čísla**, tato jádra jsou velmi stabilní.

Pokud jádro obsahuje magická čísla pro protony i neutrony, pak jde o jádra **dvojitě magická** s mimořádnou stabilitou, přičemž musí být splněna podmínka optimálního poměru počtů protonů a neutronů ($N:Z = \text{cca } 1-1,5$).

Např. dvojitě magické jádro ${}_{50}^{100}\text{Sn}$ je velmi nestabilní pro relativní nedostatek neutronů.

Na základě hladinového modelu jádra lze vysvětlit známé skutečnosti o výskytu nuklidů v přírodě.

| Kombinace | | Počet stabilních nuklidů |
|--------------|--------------|--------------------------|
| Z | N | |
| sudé | sudé | 164 |
| sudé | liché | 55 |
| liché | sudé | 50 |
| liché | liché | 4 |

Také počty izotopů jednotlivých prvků se liší podle toho, jde-li o prvek sudý nebo lichý:

| | ${}_{47}\text{Ag}$ | ${}_{48}\text{Cd}$ | ${}_{49}\text{In}$ | ${}_{50}\text{Sn}$ | ${}_{51}\text{Sb}$ | ${}_{52}\text{Te}$ | ${}_{53}\text{I}$ |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| počet izotopů | 2 | 8 | 1 | 10 | 2 | 8 | 1 |

Hmotnost a vazebná energie jádra

Jestliže srovnáme hmotnost jádra atomu s hmotností částic, které jádro tvoří, dojdeme k poznání, že hmotnost jádra je menší.

$$M_j < Zm_p + (A-Z) m_n$$

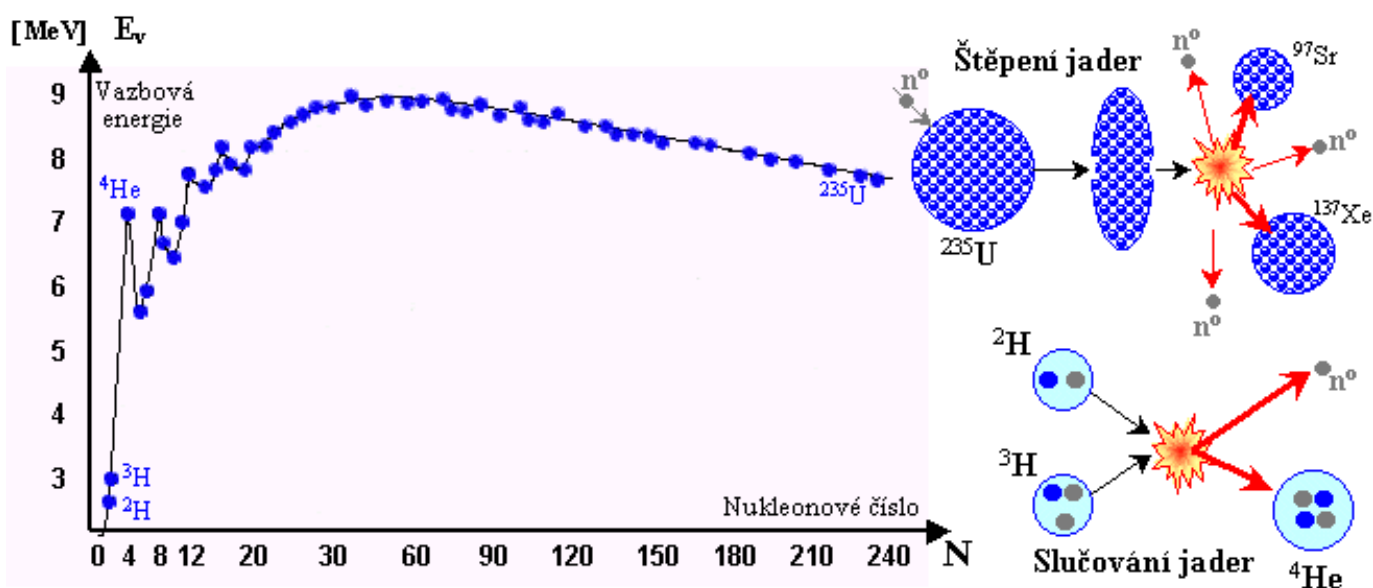
Rozdíl $\Delta = M_j - [Zm_p + (A-Z) m_n]$ se nazývá **hmotnostní úbytek (hmotnostní defekt)**, který má zápornou hodnotu. Jemu ekvivalentní energie je podle Einsteinova vztahu rovna

$$E_v = - \Delta \cdot c^2$$

a nazývá se **vazebnou energií jádra**. Je to energie, která by se hypoteticky uvolnila při vytvoření jádra z volných nukleonů. Např. pro jádro ${}^4_2\text{He}$ je:

$\Delta = 5,000618 \cdot 10^{-29} \text{ kg} = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ J/atom} = 2,71 \cdot 10^{12} \text{ J/mol}$. Toto množství tepla ohřeje 6500 tun vody z 0°C k varu.

Vazebná energie jádra vztahovaná na jeden nukleon $\epsilon = E_v / A$



Závislost střední vazbové energie jednoho nukleonu na nukleonovém čísle jádra.

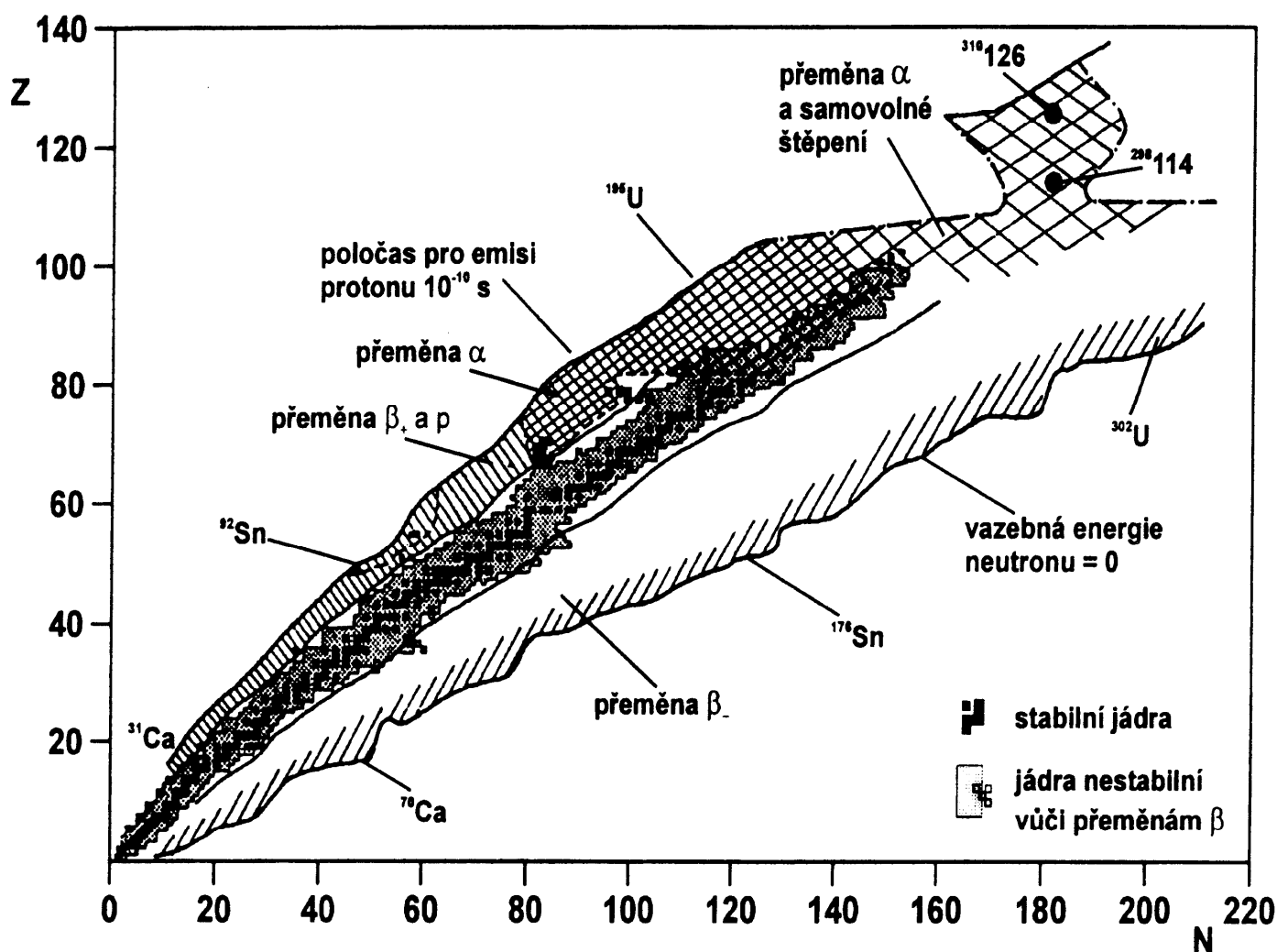
Dvě možnosti **uvolnění energie** při jaderných přeměnách:

1. **Spojováním**,
neboli **jadernou syntézou** čili fúzí nejlehčích jader (vodík, helium,...) v jádra těžší.
2. **Rozštěpením**
nejtěžších jader (např. uranu) na jádra lehčí.

V obou těchto procesech mají nukleony ve výsledných jádrech větší vazbovou energii než v jádrech výchozích a rozdíl těchto vazbových energií se uvolní - získáme **jadernou energii**.

Obecně lze konstatovat, že stabilita jader je záležitostí jejich složité vnitřní struktury. Podle velikosti vazebné energie jádra vztahované na nukleon můžeme jádra rozdělit na:

- **nukleárně stabilní** (mají velkou vazebnou energii)
- **nukleárně labilní**.

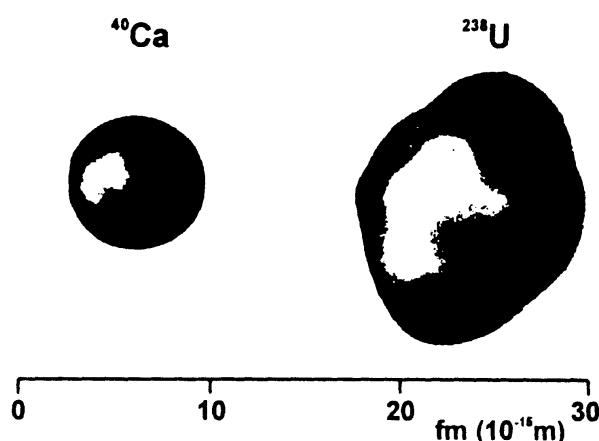


Kapkový model jádra

je založen na představě krátkého dosahu jaderných sil, kdy nukleony v jádře interagují pouze se svými sousedy v jádře podobně jako tomu je v kapce kapaliny.

Tvar jádra

- Dvojitě magická jádra mají **kulovitý tvar**.
- Ostatní jádra s vysokým spinem mají tvar deformovaný: protáhlý elipsoid – lanthanoidy, aktinoidy, zploštělý



Izotopový efekt

je záležitostí rozdílných hmotností jader izotopů téhož prvku. Projevuje se na fyzikálních vlastnostech látek, kterých jsou tyto izotopy součástí a kde hmotnost má na příslušnou fyzikální vlastnost vliv.

| | |
|---|--|
| Střední kinetická energie molekul plynu | těžší molekuly se pohybují pomaleji |
| Rychlost chemických reakcí | reakce s těžšími izotopy probíhají jinou rychlostí |
| Vibrace chemické vazby | změna vlnočtu vibrace v molekulových spektrech |
| Teplota tání | lehká voda 0 °C, těžká voda 3.82 °C |
| Rychlost difuze | dělení izotopů uranu 235 + 238 (Grahamův zákon) |

