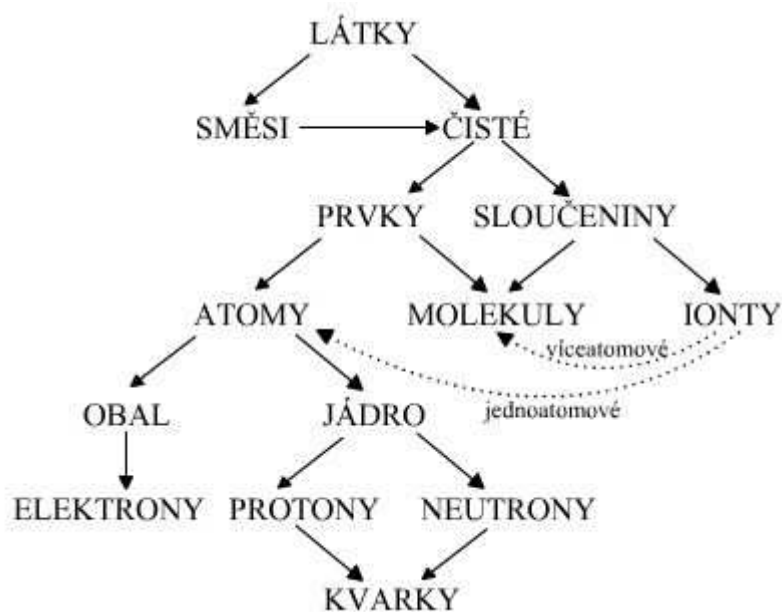


# 1. Struktura hmoty

**Hmota** je tvořena z hlediska vnějšího pohledu různými látkami.

Následující schéma uvádí tento pojem do souvislosti s dalším členěním:



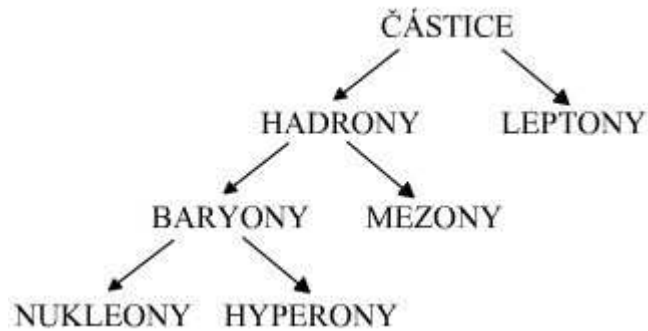
**Atomy** jsou tvořeny **elementárními částicemi** (pojem původně vyhrazený pro nedělitelný útvar bez vnitřní struktury)

**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

<b>Leptonové číslo pro leptony:</b>	<b><math>1/2</math></b>
<b>Leptonové číslo pro antileptony:</b>	<b><math>-1/2</math></b>
<b>Náboj:</b>	0 nebo -1

<b>Nábojová čísla a hmotnosti leptonů</b>			
		<b>Z</b>	<b>m(u)</b>
<b>elektron</b>	$e^-$	<b>-1</b>	<b><math>5,5 \cdot 10^{-4} (m_0)</math></b>
elektronové neutrino	$\nu_e$	<b>0</b>	<b><math>\leq 5 \cdot 10^{-9}</math></b>
<b>mion</b>	$\mu^-$	<b>-1</b>	<b>0,1135</b>
<b>mionické neutrino</b>	$\nu_\mu$	<b>0</b>	<b><math>&lt; 505 \cdot 10^{-4}</math></b>
<b>tauon</b>	$\tau^-$	<b>-1</b>	<b>1,908</b>
<b>tauonické neutrino</b>	$\nu_\tau$	<b>0</b>	<b><math>&lt; 0,26</math></b>

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)

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

<b>Baryonové číslo pro baryony:</b>	1
<b>Baryonové číslo pro antibaryony:</b>	-1
<b>Baryonové číslo pro mezony a leptony:</b>	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 :

<b>nábojové číslo</b>	<b>Z</b>
<b>podivnost (strangeness)</b>	<b>S</b>
<b>půvab (charm)</b>	<b>C</b>
<b>krása (beauty)</b>	<b>B</b>
<b>pravda (truth)</b>	<b>T</b>

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

## Pravidla pro kvarkovou skladbu hadronů:

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

### Vlastnosti některých baryonů

	hmotnost (u)	Z	kvarkové složení
<b>p</b>	<b>1,0072765</b>	<b>+1</b>	<b><i>uud</i></b>
<b>n</b>	<b>1,0086650</b>	<b>0</b>	<b><i>udd</i></b>
<b><math>\Lambda</math></b>	<b>1,198</b>	<b>0</b>	<b><i>uds</i></b>
<b><math>\Sigma^+</math></b>	<b>1,227</b>	<b>+1</b>	<b><i>uus</i></b>
<b><math>\Sigma^-</math></b>	<b>1,277</b>	<b>-1</b>	<b><i>dds</i></b>
<b><math>\Omega^-</math></b>	<b>1,795</b>	<b>-1</b>	<b><i>sss</i></b>
<b><math>\Lambda_c^+</math></b>	<b>2,42</b>	<b>+1</b>	<b><i>udc</i></b>

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

### Vlastnosti některých mezonů

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

- **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

<b>elektron</b>	$e^-$
<b>elektronové neutrino</b>	$\nu_e$
<b>kvark <i>u</i></b>	$u$
<b>kvark <i>d</i></b>	$d$

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)

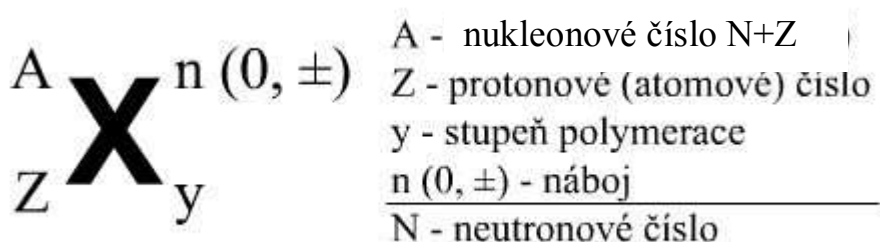
## 2. Atomové jádro a jeho stabilita

**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  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$  a  ${}^3_1\text{H}$ .

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

Prvky monoizotopické	beryllium ( $^9\text{Be}$ )	fosfor ( $^{31}\text{P}$ )
	fluor ( $^{19}\text{F}$ )	kobalt ( $^{59}\text{Co}$ )
	sodík ( $^{23}\text{Na}$ )	jod ( $^{127}\text{I}$ )
	hliník ( $^{27}\text{Al}$ )	zlato ( $^{197}\text{Au}$ ) 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:

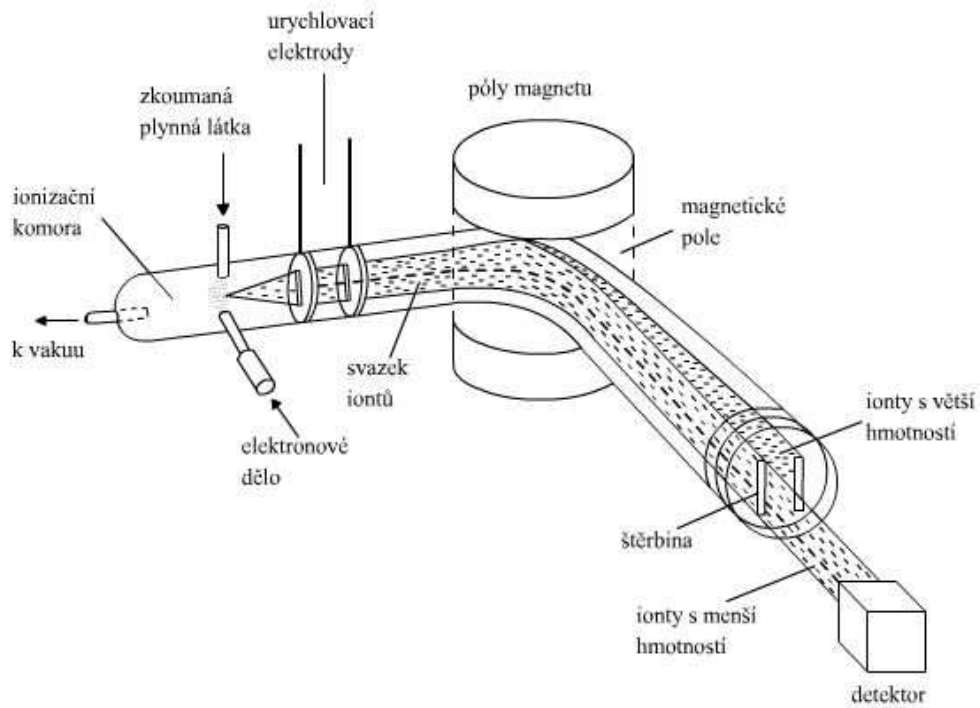
- které nemají stabilní nuklidy
  - mohou se vyskytovat v přírodě nebo jsou připraveny uměle
  - neoznačují se tak prvky, které mají pouze jeden radioaktivní izotop s malou aktivitou.
- 
- Pojem **izobary** (používá se v množném čísle) je vyhrazen nuklidům, které mají stejné nukleonové a různé protonové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



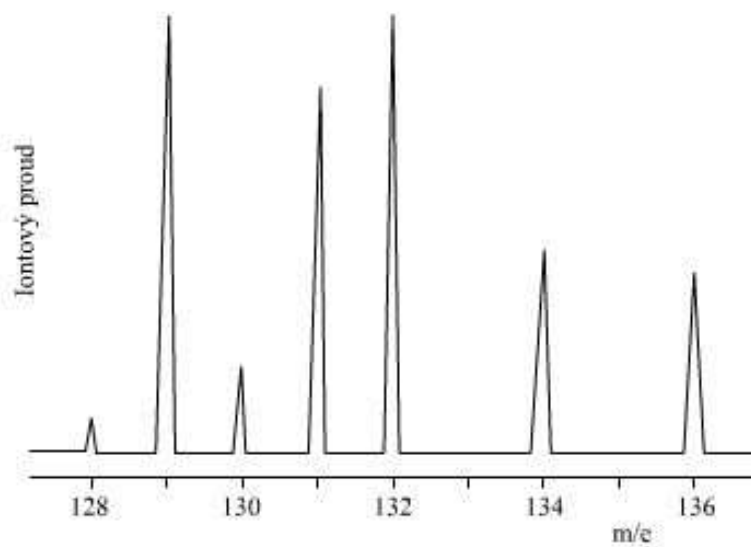
**(Platí pravidlo, které říká, že v takové řadě nuklidů bývá prostřední radioaktivní).**

- **Izotony** (příliš se nepoužívá) představují nuklidy, které mají stejný počet neutronů v jádře, např.  $^3_1\text{H}$  a  $^4_2\text{He}$ .

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



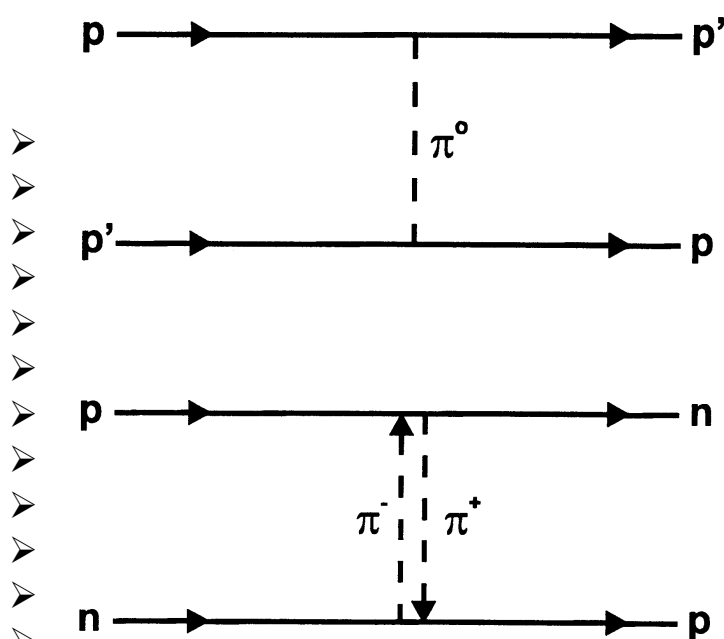
Hmotnostní spektrum xenonu



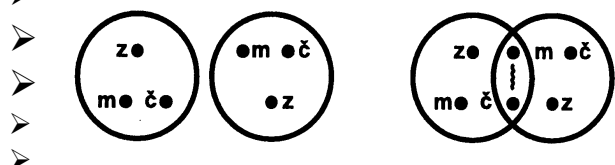
Izotopové složení přírodního xenonu [%]					
$^{124}\text{Xe}$	0,095	$^{129}\text{Xe}$	26,44	$^{132}\text{Xe}$	26,89
$^{126}\text{Xe}$	0,090	$^{130}\text{Xe}$	4,08	$^{134}\text{Xe}$	10,44
$^{128}\text{Xe}$	1,915	$^{131}\text{Xe}$	21,18	$^{136}\text{Xe}$	8,87

# 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**

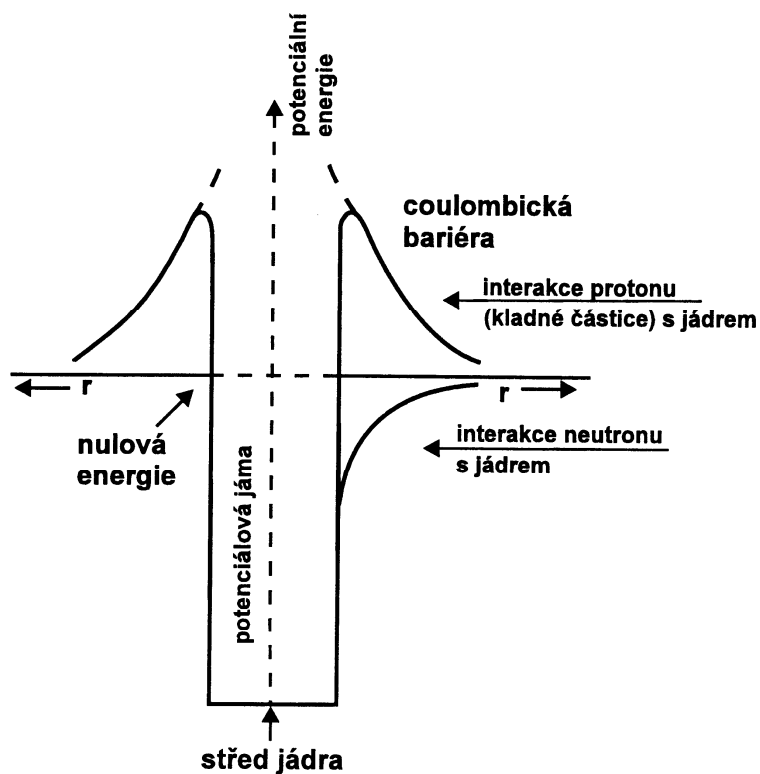
- působnost jaderných sil je omezen na oblast jádra – síly mají krátký dosah (cca  $10^{-15}$  m). Hovoříme o p **poloměru jádra**

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

( $r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$  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)**

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

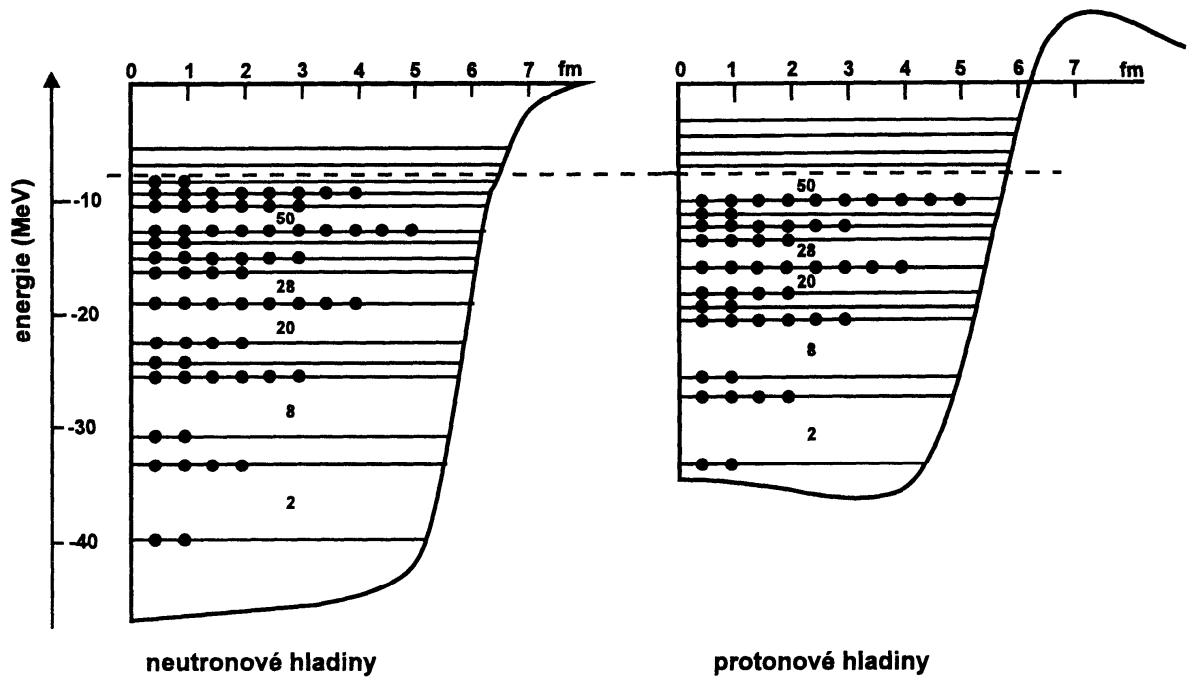
(obdoba Coulombova zákona)

$Z_1, Z_2$  – 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	
<b>sudé</b>	<b>sudé</b>	164
<b>sudé</b>	<b>liché</b>	55
<b>liché</b>	<b>sudé</b>	50
<b>liché</b>	<b>liché</b>	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.

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

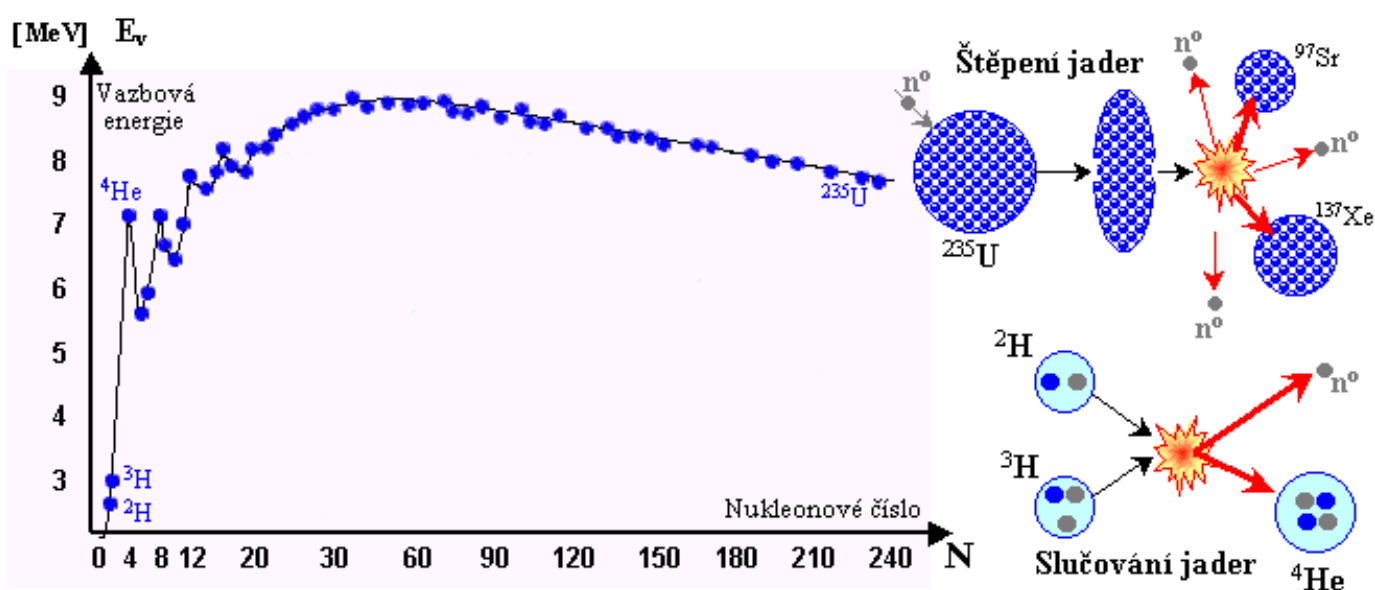
Rozdíl  $\Delta = M_j - [Zm_p + (A-Z) m_n]$  se nazývá **hmotnostní úbytek (hmotnostní defekt)**, který má zápornou hodnotu. Jemu ekvivalentní energie je podle Einsteinova vztahu rovna

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

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  $0^\circ\text{C}$  k varu.

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



**Závislost střední vazbové energie jednoho nukleonu na nukleonovém čísle jádra.**

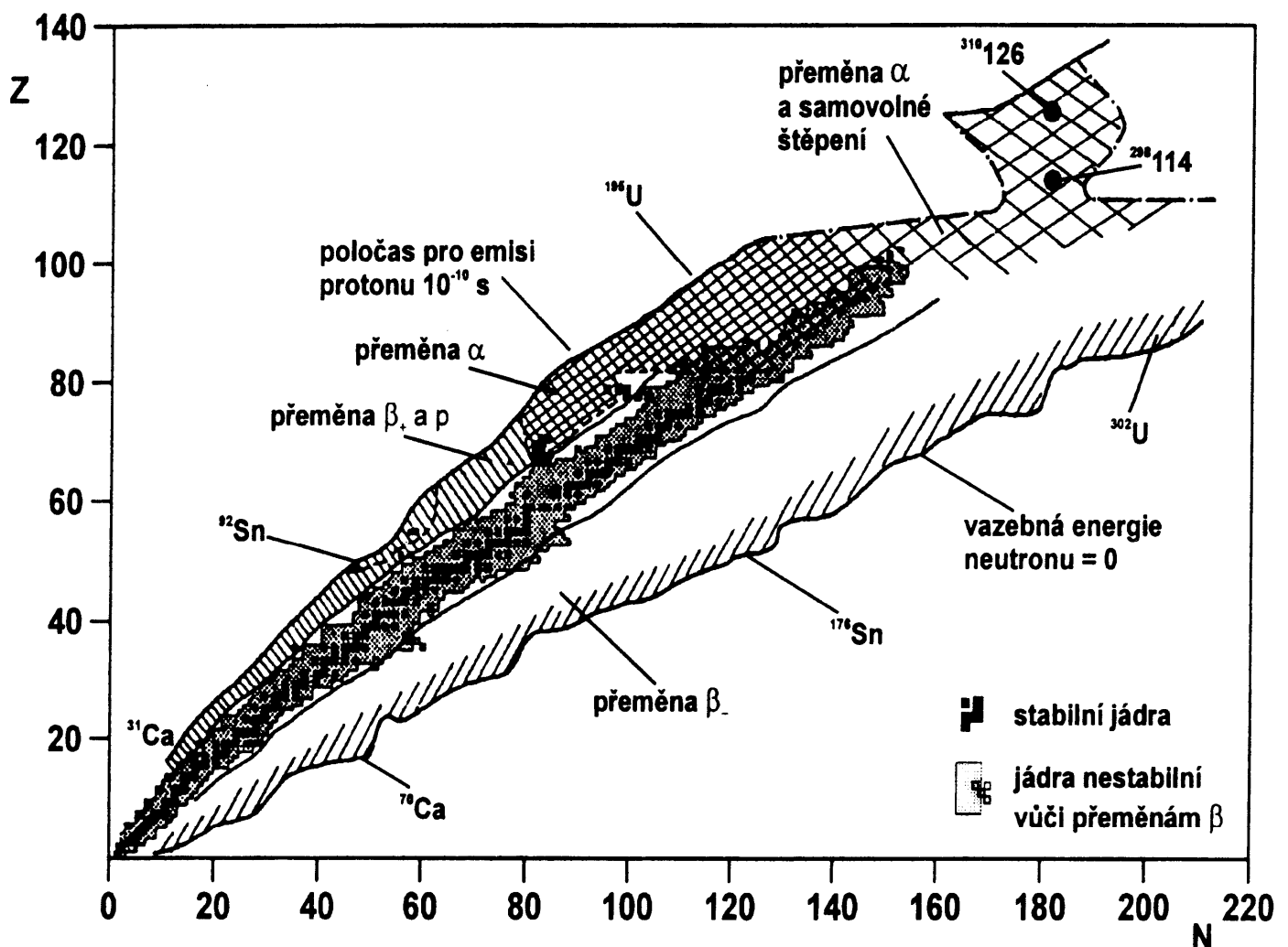
Dvě možnosti **uvolnění energie** při jaderných přeměnách:

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**.

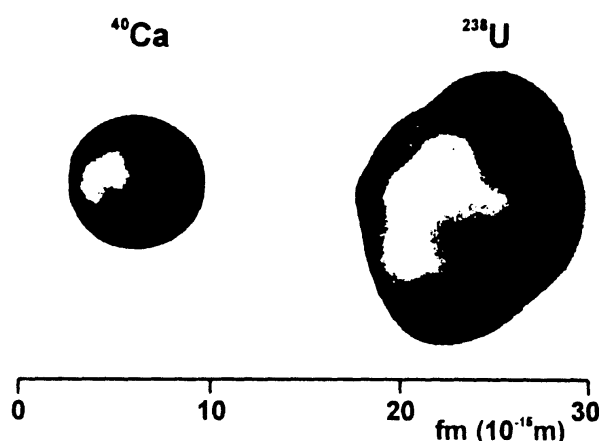


## Kapkový model jádra

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)

