

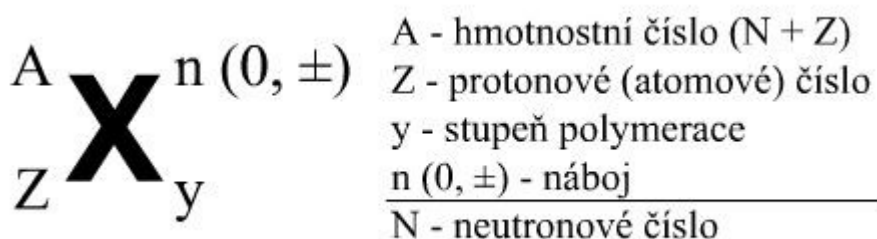
## 2. Atomové jádro a jeho stabilita

**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 ${}^0_1n$
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  $^3_1\text{H}$ .

<b>Prvky polyizotopické</b>				
<b>Prvek</b>	<b><math>A_r</math></b>	<b>Izotop</b>	<b>Výskyt v přírodní izotopové směsi (%)</b>	<b><math>A_r</math></b>
Vodík	<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>
Lithium	<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>
Uhlík	<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>
Kyslík	<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>
Draslík	<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>
Cín	<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>
Uran		$^{235}\text{U}$	<b>0,72</b>	<b>235,03493</b>
		$^{238}\text{U}$	<b>99,28</b>	<b>238,050760</b>

<b>Prvky monoizotopické</b>	<b>beryllium (<sup>9</sup>Be)</b>	<b>fosfor (<sup>31</sup>P)</b>
	<b>fluor (<sup>19</sup>F)</b>	<b>kobalt (<sup>59</sup>Co)</b>
	<b>sodík (<sup>23</sup>Na)</b>	<b>jod (<sup>127</sup>I)</b>
	<b>hliník (<sup>27</sup>Al)</b>	<b>Zlato (<sup>197</sup>Au) aj.</b>

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

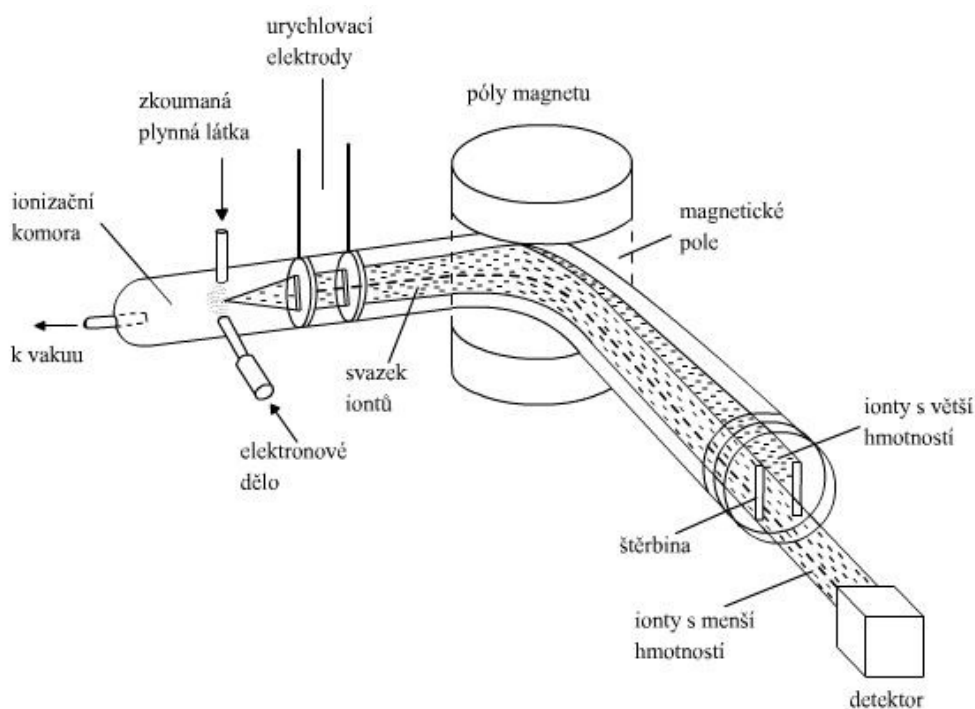
- Pojem **izobary** (používá se v množném čísle) je vyhrazen nuklidům, které mají stejné nukleonové a různé protonové číslo, např.



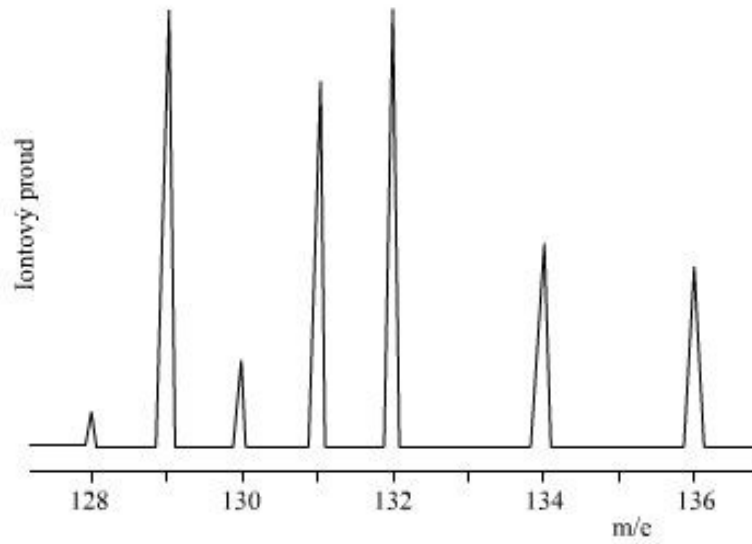
(Platí Mattauchovo pravidlo, které říká, že v takové řadě nuklidů bývá **prostřední** radioaktivní).

- **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**.



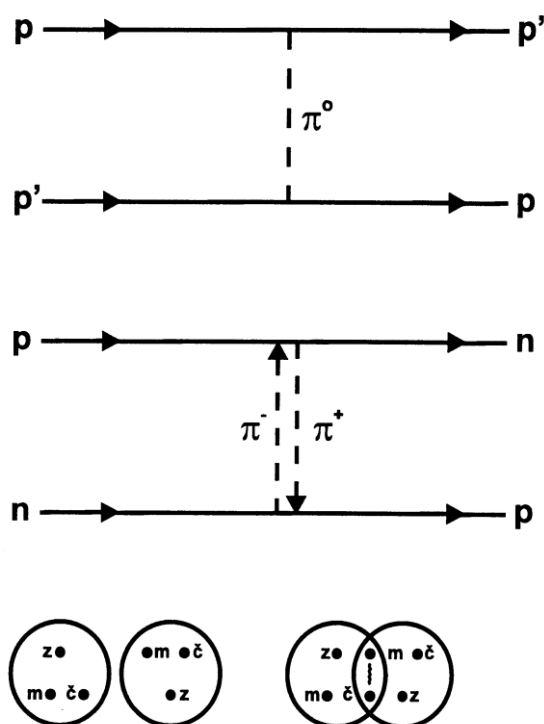
## Hmotnostní spektrum xenonu



<b>Izotopové složení přírodního xenonu</b>					
<b>[%]</b>					
$^{124}\text{Xe}$	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)



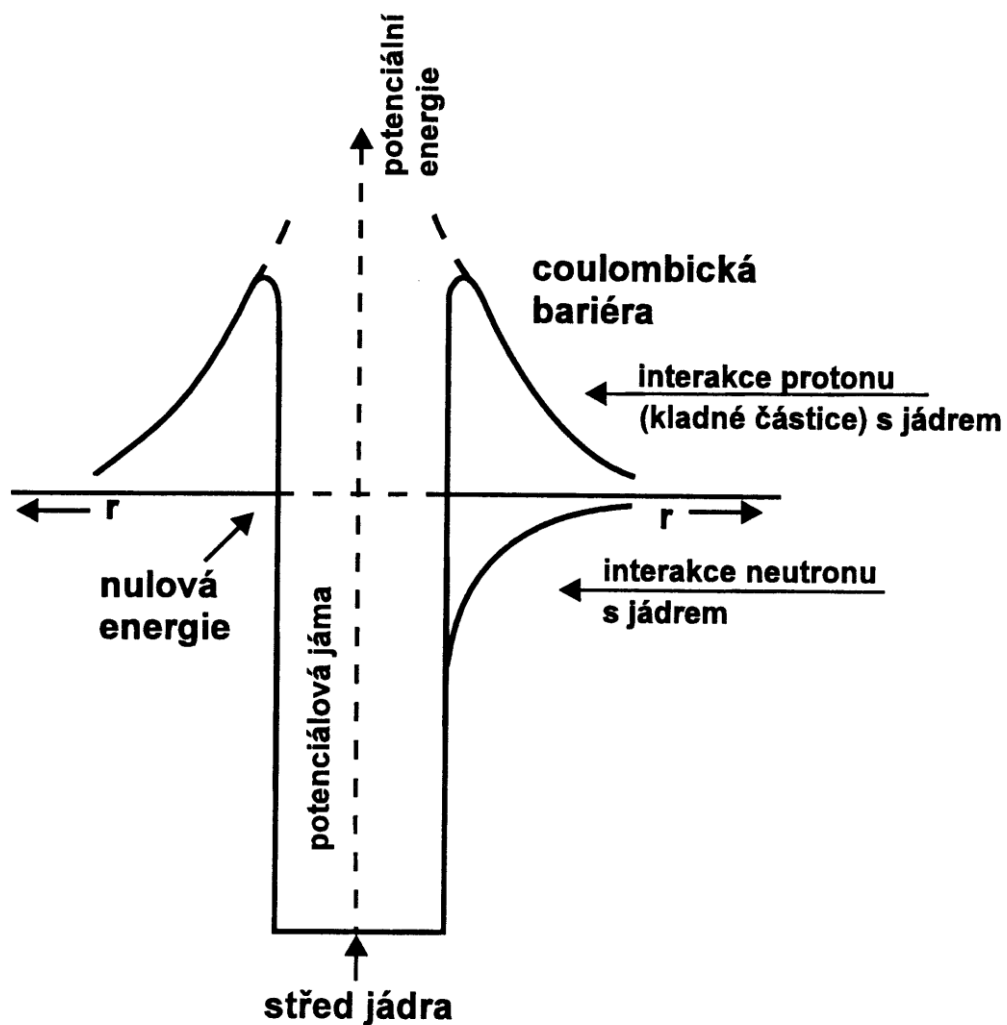
- působnost jaderných sil je omezen na oblast jádra – síly mají krátký dosah (cca  $10^{-15}$  m). Hovoříme o p **poloměru jádra**

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

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

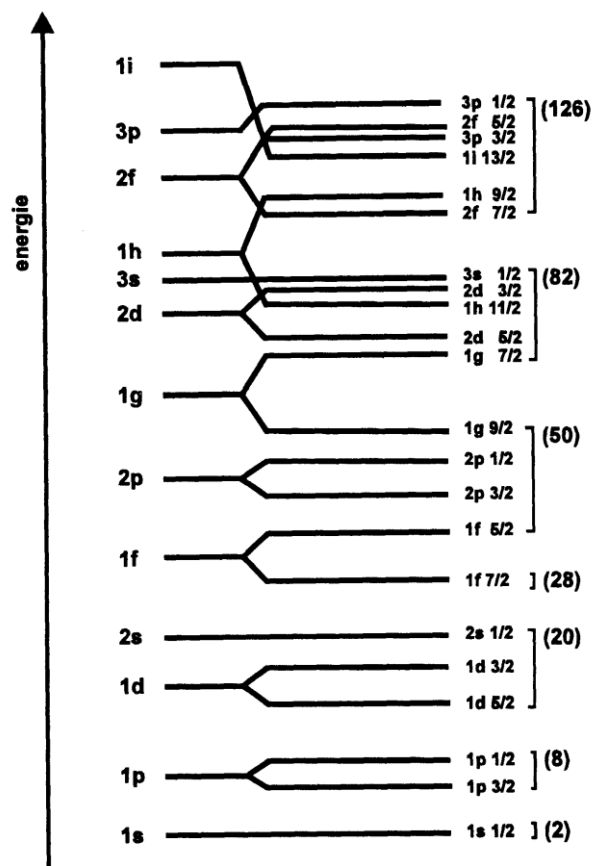
$$B = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \quad (\text{obdoba Coulombova zákona})$$

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

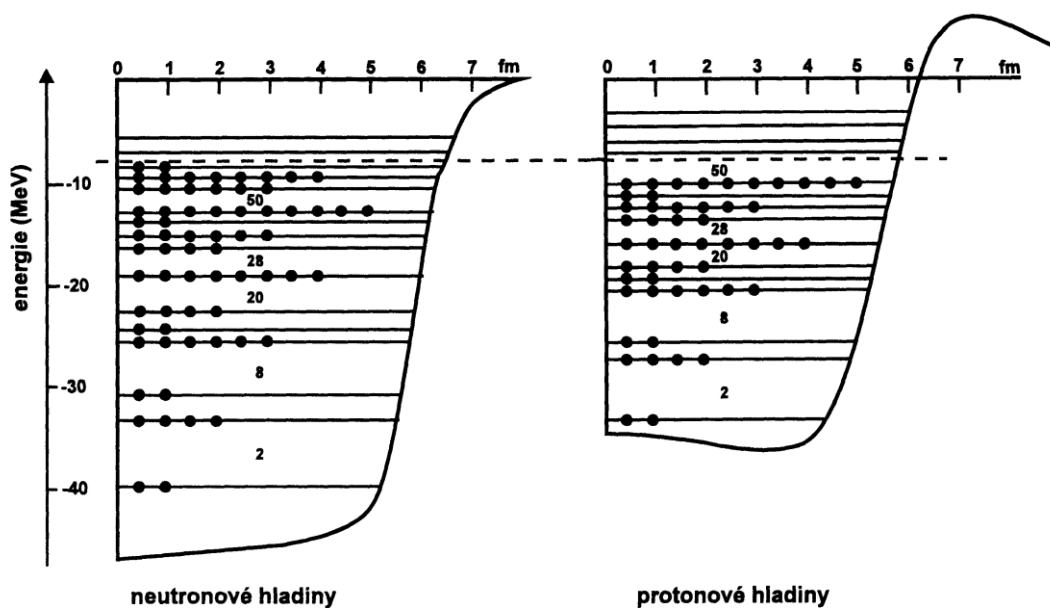
$A_1, A_2$  – jejich nukleonová čísla

## Hladinový model jádra

- spin protonu i neutronu je  $\frac{1}{2}$
- platí **obdoba Pauliho principu**: nukleony v potenciálové jámě obsazují postupně 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)
- energetické schema jaderných hladin



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  $^{100}_{50}\text{Sn}$  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:

	<sup>47</sup> Ag	<sup>48</sup> Cd	<sup>49</sup> In	<sup>50</sup> Sn	<sup>51</sup> Sb	<sup>52</sup> Te	<sup>53</sup> I
počet izotopů	2	8	1	10	2	8	1

## Spin jádra I

(I=0, 1/2, 1, 3/2, 2, ...)

Je dán součtem spinů jednotlivých nukleonů

Vektor, který je dán součtem celkových momentů hybnosti nukleonů se získá celkový moment hybnosti jádra. Tento

kvantovaný vektor nabývá hodnot:  $I = \hbar \sqrt{I(I+1)}$

jádro	Z	N	I
<sup>4</sup> <sub>2</sub> He	2	2	0
<sup>16</sup> <sub>8</sub> O	8	8	0
<sup>3</sup> <sub>2</sub> He	2	1	1/2 nespárovaný neutron na hladině 1s <sub>1/2</sub>
<sup>10</sup> <sub>5</sub> B	5	5	2x3/2= 3 nespárovaný proton i neutron jsou na hladině 1p <sub>3/2</sub>

## 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

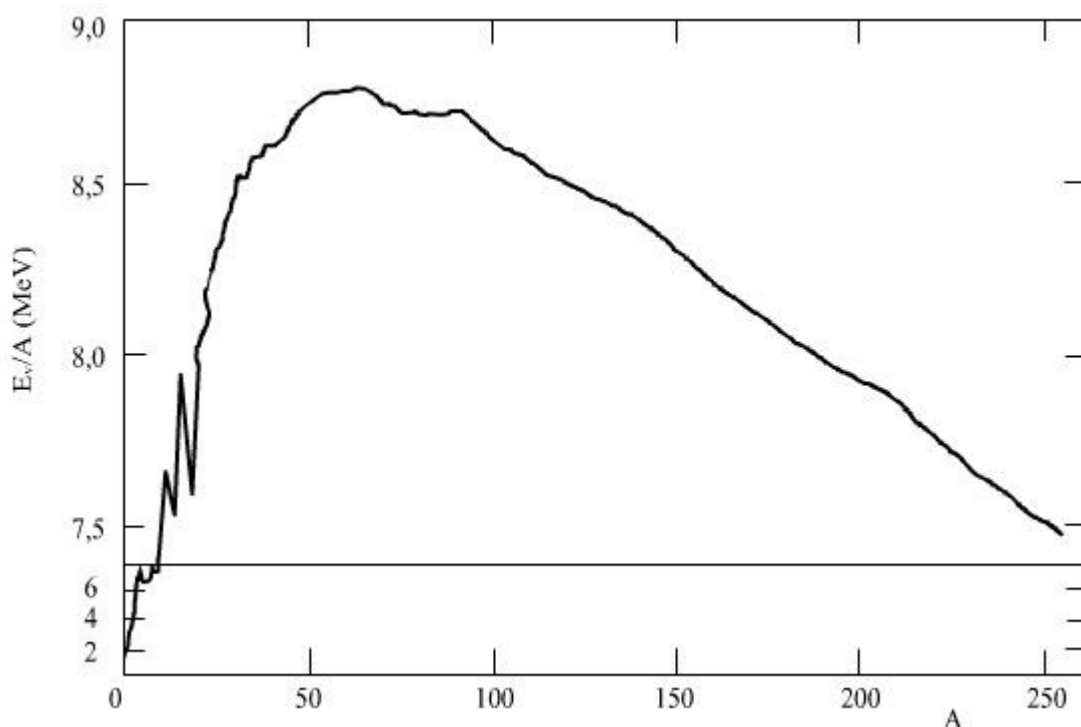
$$E_v = - \Delta \cdot c^2$$

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:

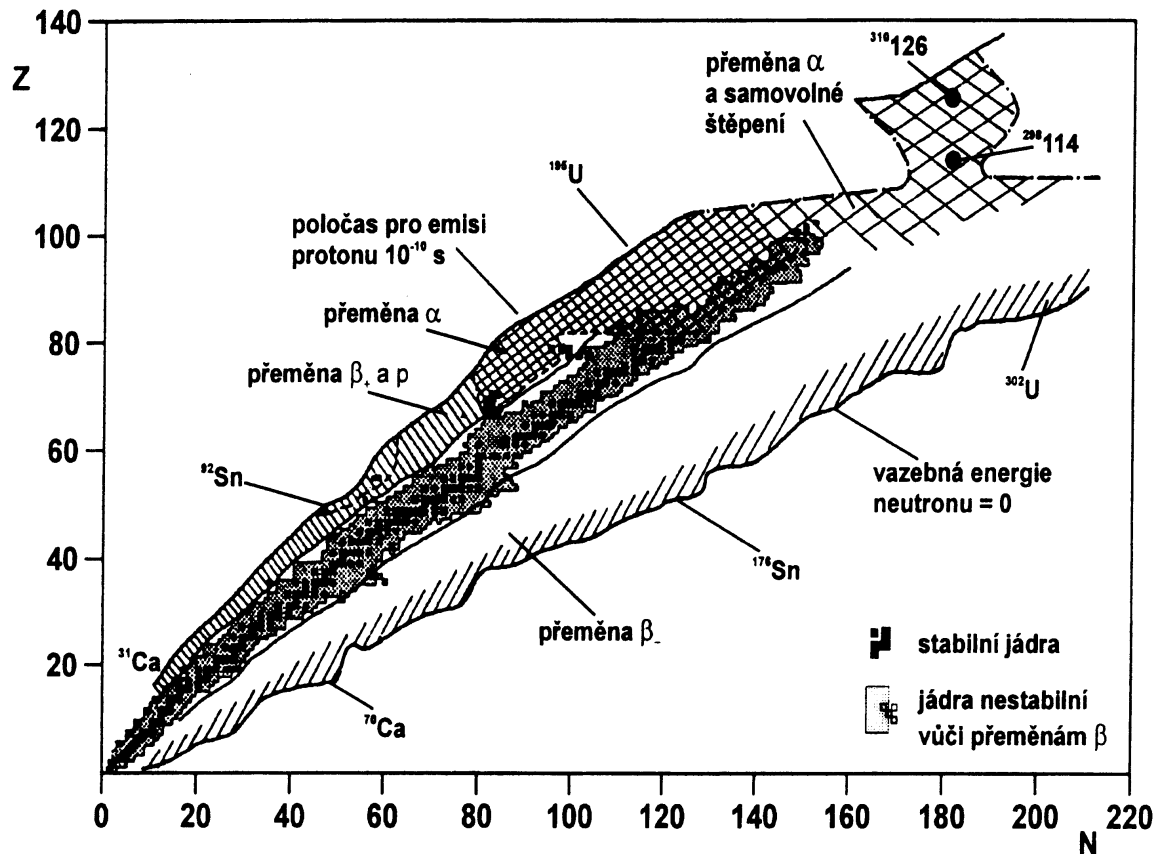
$\Delta = 5,000618 \cdot 10^{-29} \text{ kg} = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ J/atom} = 2,71 \cdot 10^{12} \text{ J/mol}$ . Toto množství tepla ohřeje 6500 tun vody z  $0^\circ\text{C}$  k varu.

**Vazebná energie jádra vztažená na jeden nukleon**  $\epsilon = E_v / A$  se dá chápat jako energie potřebná k uvolnění nukleonu z jádra.



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

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

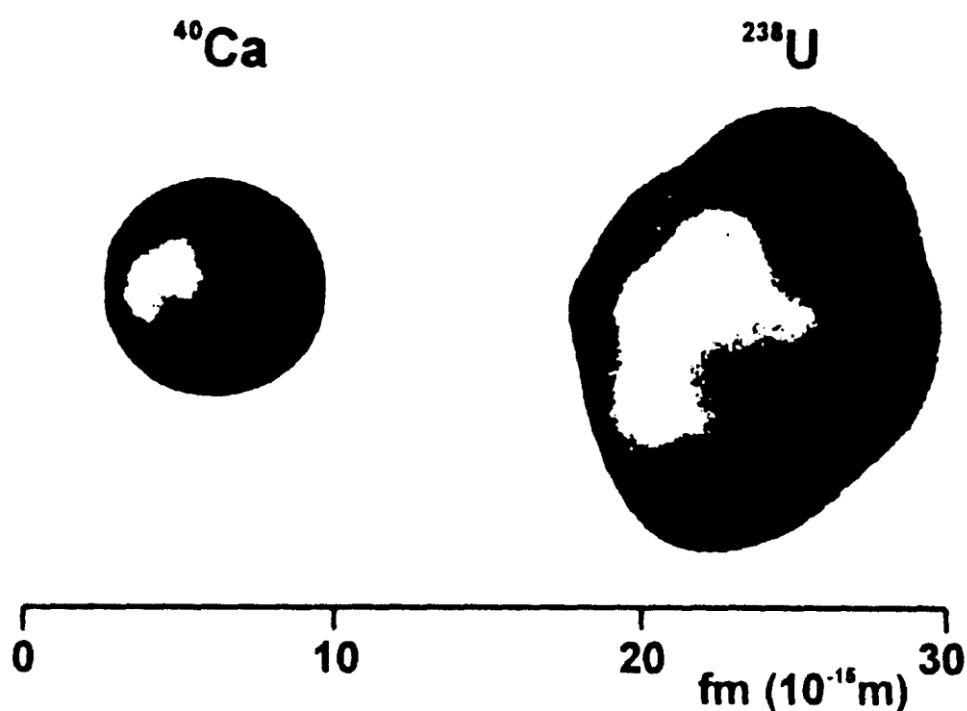


## Kapkový model jádra

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. Pomocí tohoto modelu lze odvodit vztah pro např. pro **hmotnost jádra** (viz Hála str. 28).

## 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.

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