

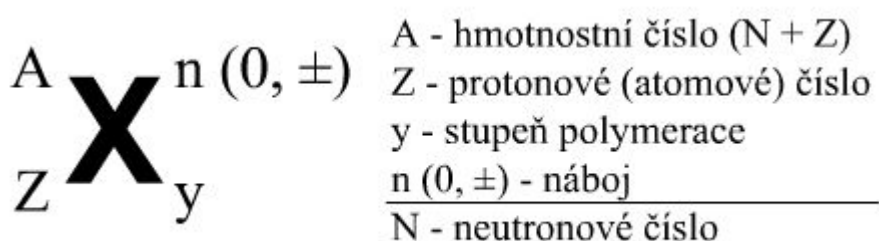
2. Atomové jádro a jeho stabilita

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_1H , ^2_1H a ^3_1H .

Prvky polyizotopické				
Prvek	A_r	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
Uran		^{235}U	0,72	235,03493
		^{238}U	99,28	238,050760

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

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

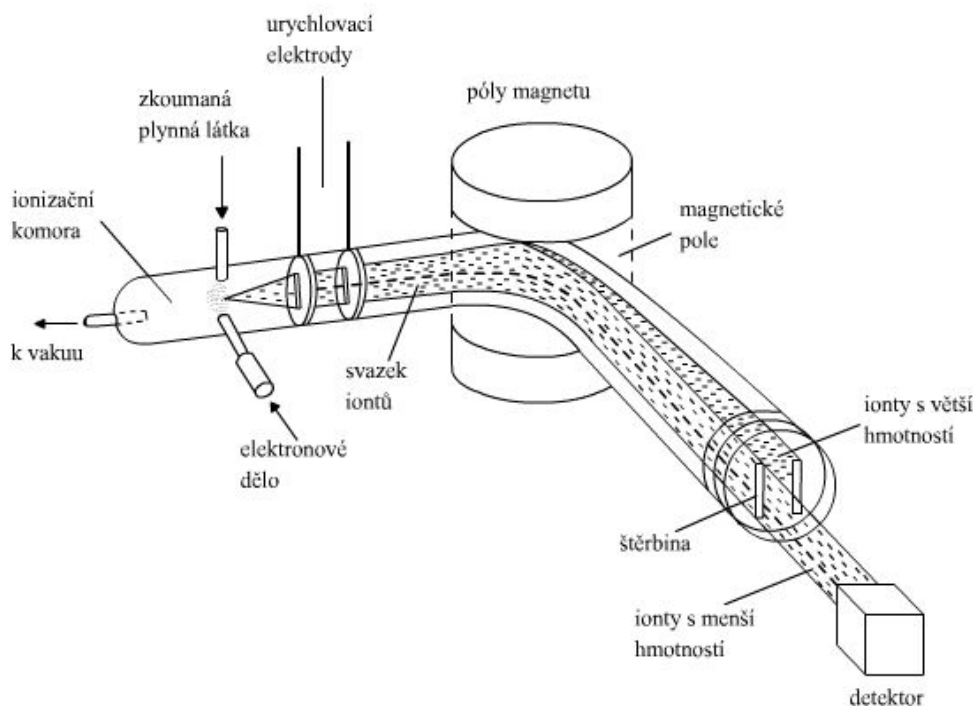
- Pojem **izobary** (používá se v množném čísle) je vyhrazen nuklidům, které mají stejné nukleonové a různé protonové číslo, např.



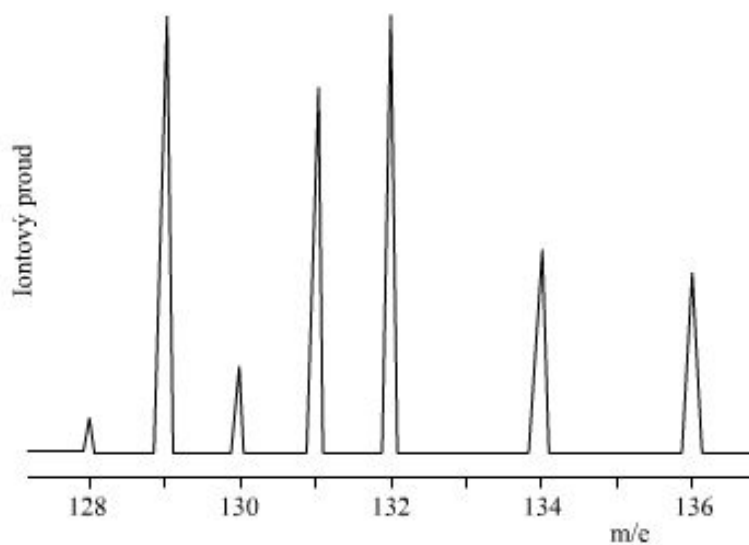
(Platí Mattauchovo pravidlo, které říká, že v takové řadě nuklidů bývá prostřední radioaktivní).

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

Hmotnost nuklidů a jejich zastoupení v přírodní směsi se dá zjistit např. [hmotnostní spektrometrií](#).



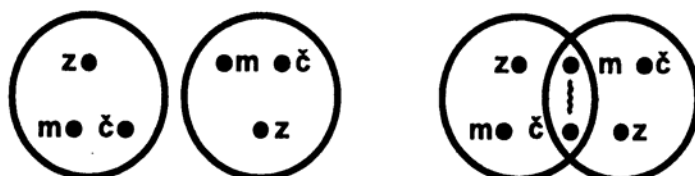
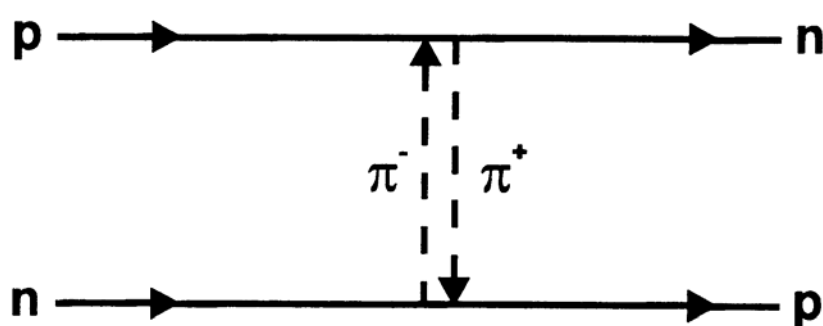
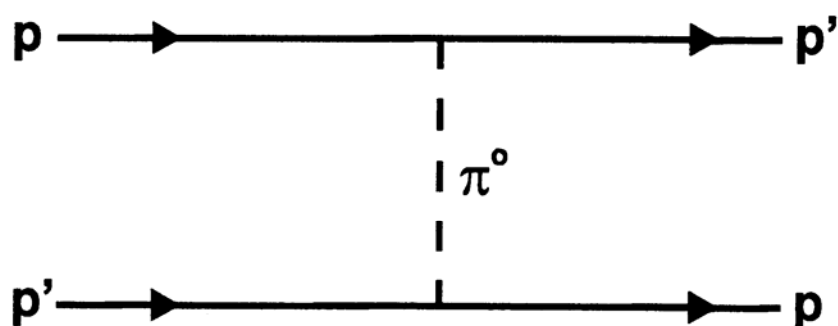
Hmotnostní spektrum xenonu



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)



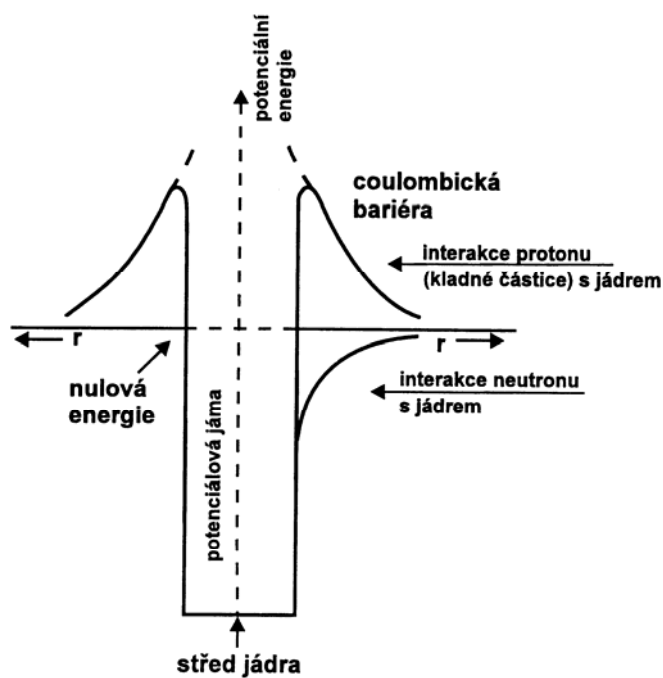
- působnost jaderných sil je omezen na oblast jádra – síly mají krátký dosah (cca 10^{-15} m). Hovoříme o **p** **poloměru jádra**

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

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

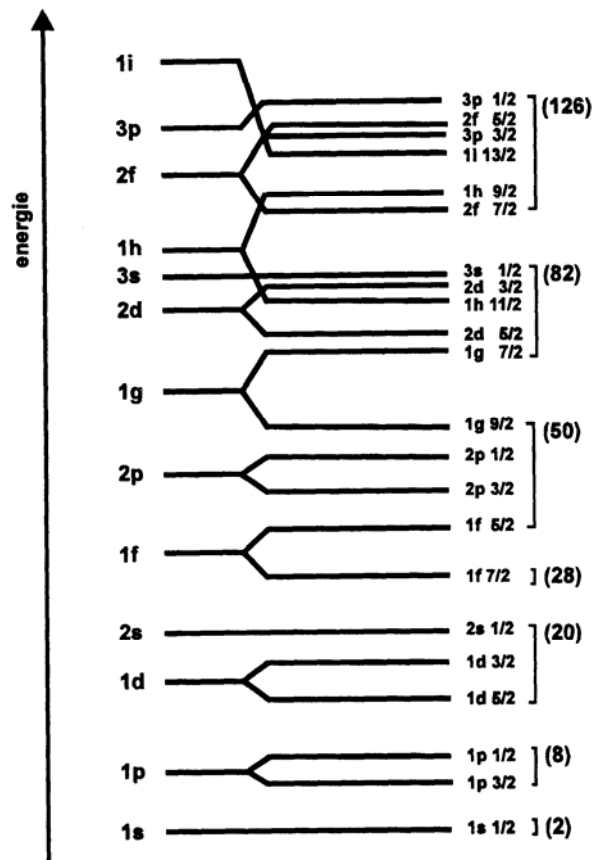
$$B = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \quad (\text{obdoba Coulombova zákona})$$

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

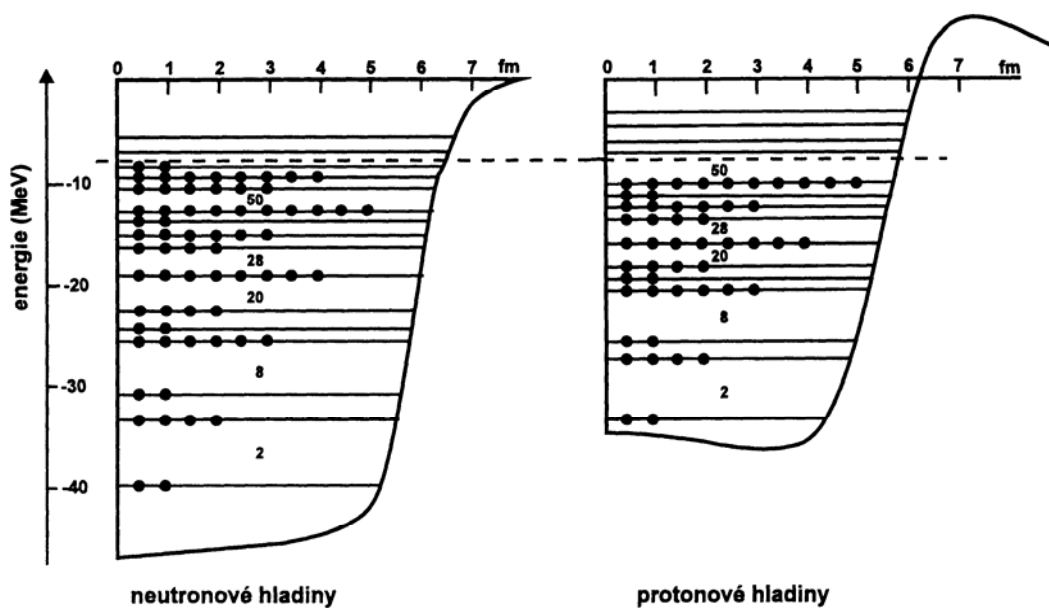
A_1, A_2 – jejich nukleonová čísla

Hladinový model jádra

- spin protonu i neutronu je $1/2$
- 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)
- 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:

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

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).

Spin jádra I

($I=0, 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$)

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: $\vec{I} = \eta \sqrt{I(I+1)}$

jádro	Z	N	jaderný spin I
${}^4_2\text{He}$	2	2	0
${}^{16}_8\text{O}$	8	8	0
${}^3_2\text{He}$	2	1	1/2 nespárovaný neutron na hladině $1s_{1/2}$
${}^{10}_5\text{B}$	5	5	$2 \times 3/2 = 3$ nespárovaný proton i neutron jsou na hladině $1p_{3/2}$

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

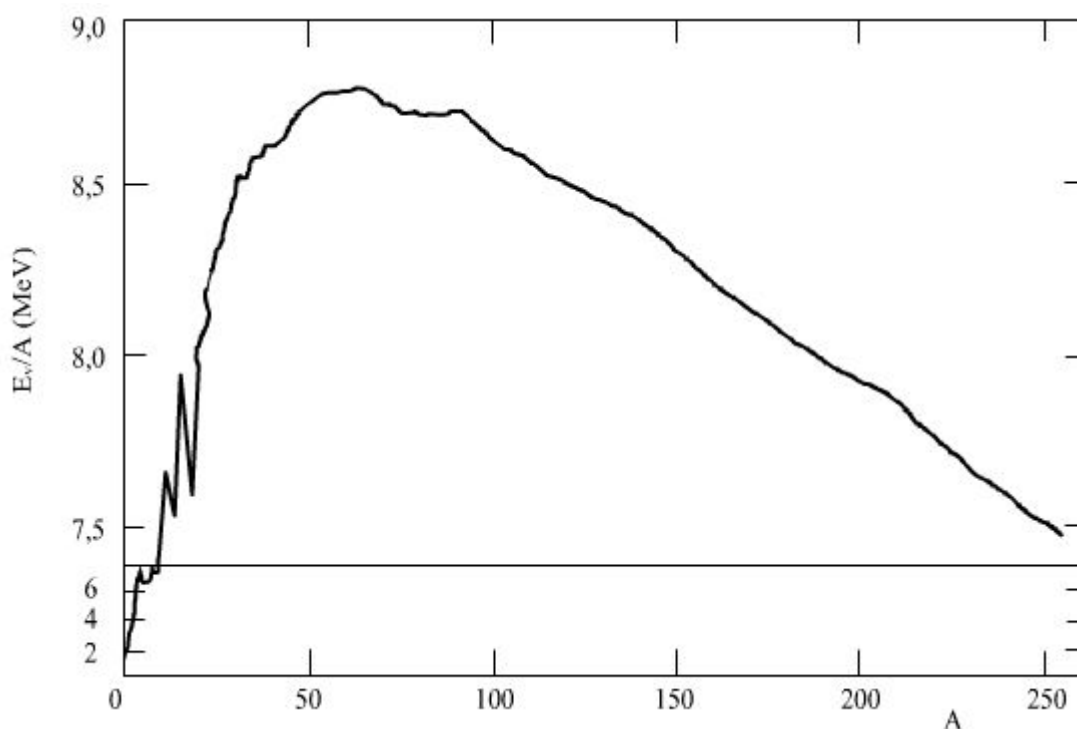
$$E_v = - \Delta \cdot c^2$$

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:

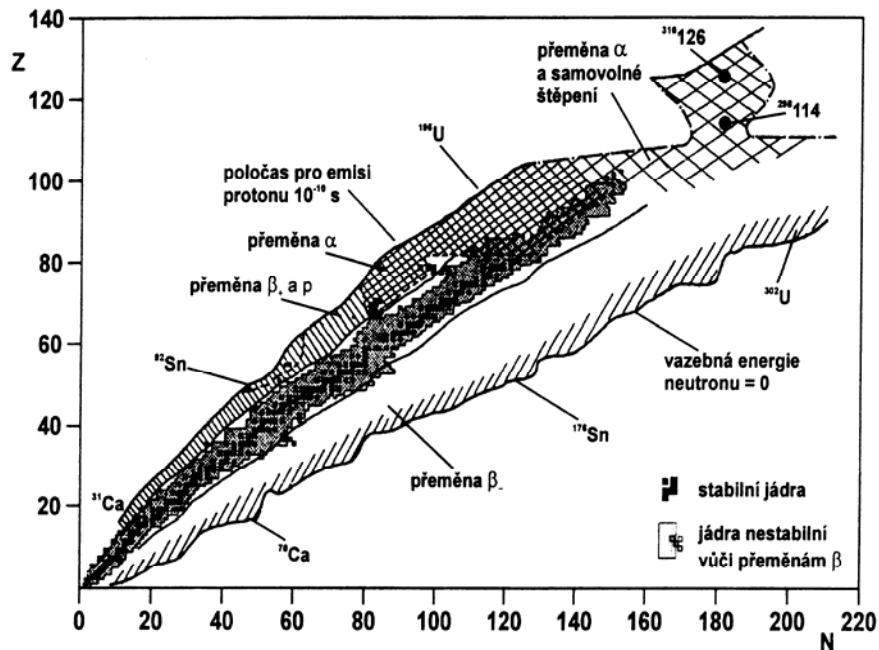
$\Delta = 5,000618 \cdot 10^{-29} \text{ kg} = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ J/atom} = 2,71 \cdot 10^{12} \text{ J/mol}$. Toto množství tepla ohřeje 6500 tun vody z 0°C k varu.

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



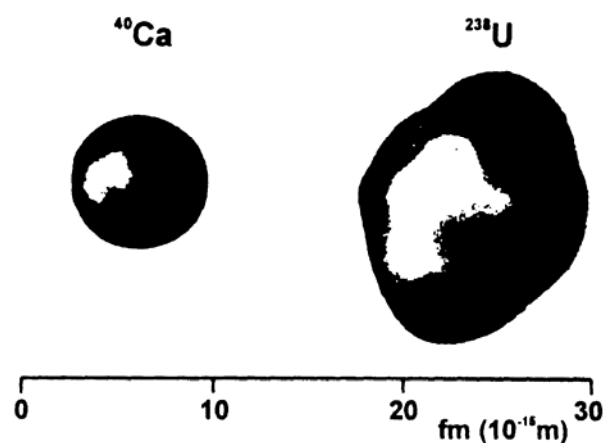
Obecně lze konstatovat, že stabilita jader je záležitostí jejich složité vnitřní struktury. Podle velikosti vazebné energie jádra vztažené na nukleon můžeme jádra rozdělit na:

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



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)