

2. Atomové jádro a jeho stabilita

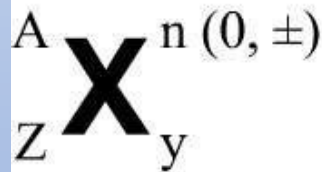


Atom je nejmenší hmotnou a **chemicky nedělitelnou částicí**.

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_1e



A - nukleonové číslo N+Z
 Z - protonové (atomové) číslo
 y - stupeň polymerace
 n (0, ±) - náboj
 N - neutronové číslo

protonové (atomové) číslo Z
 nukleonové číslo A
 neutronové číslo N

počet protonů v jádře
 počet nukleonů, tj. protonů a neutronů v jádře
 počet neutronů v jádře





Definice prvku

Soubor atomů, které mají stejné atomové číslo Z (N mohou mít různé) se nazývá **prvkem**.

Definice nuklidu

Soubor naprosto identických atomů, které mají stejné atomové číslo Z a neutronové číslo N , přičemž $Z \neq A$ (jediná výjimka je jádro lehkého vodíku ${}^1\text{H}$), se nazývá **nuklidem**. Vykazuje-li nuklid radioaktivitu, pak jde o **radionuklid**.

1



Definice pojmu izotop

Pojem **izotop** je nutno na rozdíl od pojmu nuklid chápat spíše kvalitativně, **nechápe se jako soubor atomů**. 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 v přírodě zastoupen třemi izotopy. Jsou to nuklidy ${}^1_1\text{H}$; ${}^2_1\text{H}$; ${}^3_1\text{H}$

2

Prvky polyizotopické

Prvek	A _r (str.)	Izotop	Výskyt v přírodní izotopové směsi (%)	A _r
Vodík	1,0179	¹ H	99,985	1,007825
		² H	0,015	2,014102
Lithium	6,941	⁶ Li	7,52	6,015126
		⁷ Li	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



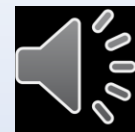
Prvky monoizotopické	beryllium (⁹ Be)	fosfor (³¹ P)
	fluor (¹⁹ F)	kobalt (⁵⁹ Co)
	sodík (²³ Na)	jod (¹²⁷ I)
	hliník (²⁷ Al)	zlato (¹⁹⁷ Au) aj.

Přirozené radionuklidy



Radionuklid	Poměrný výskyt (%)	Poločas (roky)	Základní emise a jejich zastoupení (‰)	Energie záření (MeV)
⁴⁰ K	0,012	1,26 · 10 ⁹	β ⁻ (89) γ (11)	1,33 1,46
⁵⁰ V	0,25	6 · 10 ¹⁵	β ⁻ (30) γ (70)	0,78 1,55
⁸⁷ Rb	27,9	4,8 · 10 ¹⁰	β ⁻ (100)	0,28
¹¹⁵ In	95,8	6 · 10 ¹⁴	β ⁻ (100)	0,48
¹³⁸ La	0,089	1,12 · 10 ¹¹	β ⁻ (80) γ (70)	0,21 0,81; 1,43
¹⁴⁴ Nd	23,9	2,4 · 10 ¹⁵	α	1,83
¹⁴⁷ Sm	15,1	1,05 · 10 ¹¹	α	2,23
¹⁵² Gd	0,20	1,1 · 10 ¹⁴	α	2,1
¹⁷⁴ Hf	0,163	2 · 10 ¹⁵	α	2,5
¹⁷⁶ Lu	2,6	2,2 · 10 ¹⁰	β ⁻ , γ	0,43
¹⁸⁷ Re	62,7	4,3 · 10 ¹⁰	β ⁻	0,003

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



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.

^{40}Ar

^{40}K

^{40}Ca



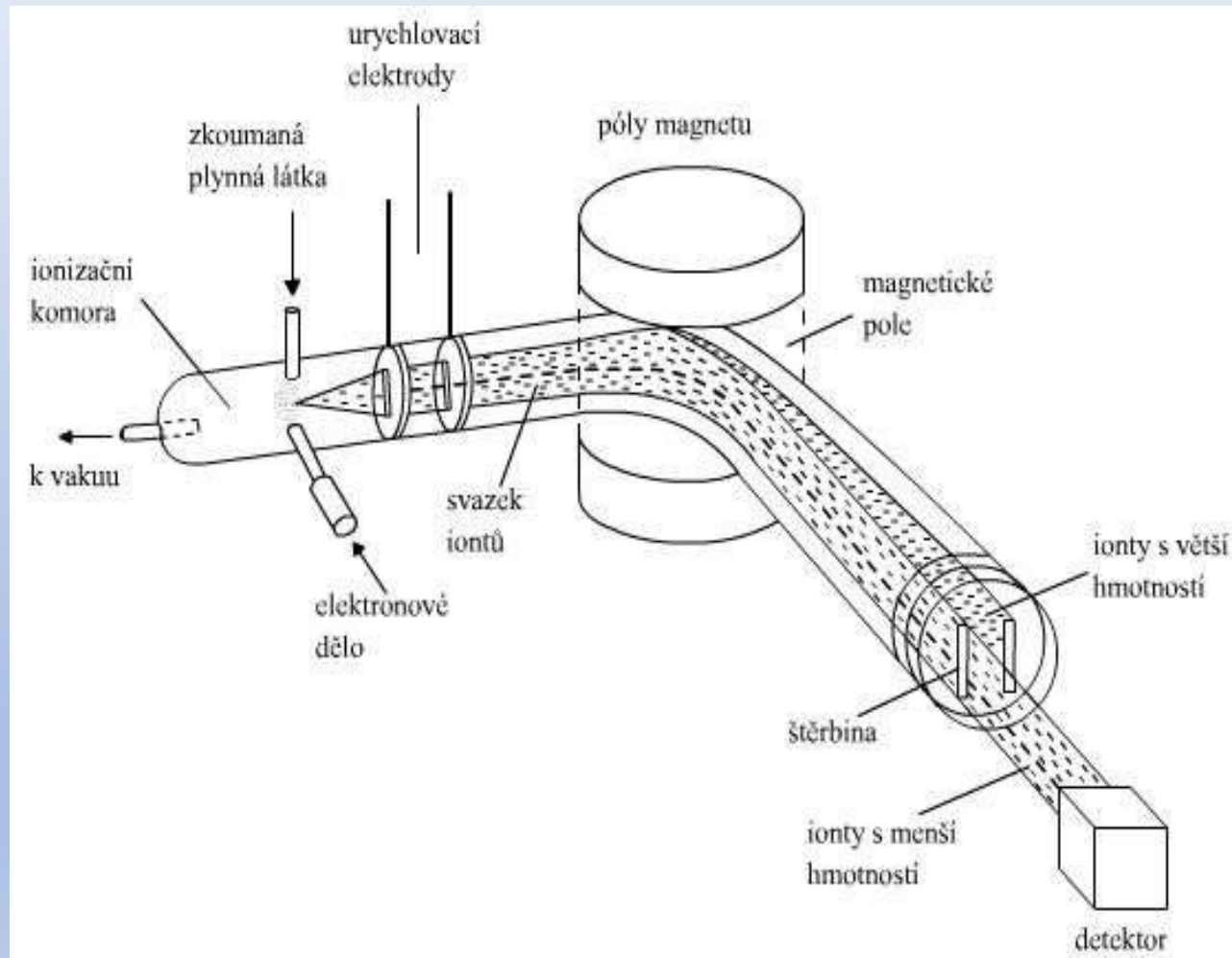
(Platí Mattauchovo pravidlo, které říká, že v takové řadě nuklidů, které mají stejné nukleonové číslo, ale liší se v čísle protonovém, bývá prostřední nuklid radioaktivní).

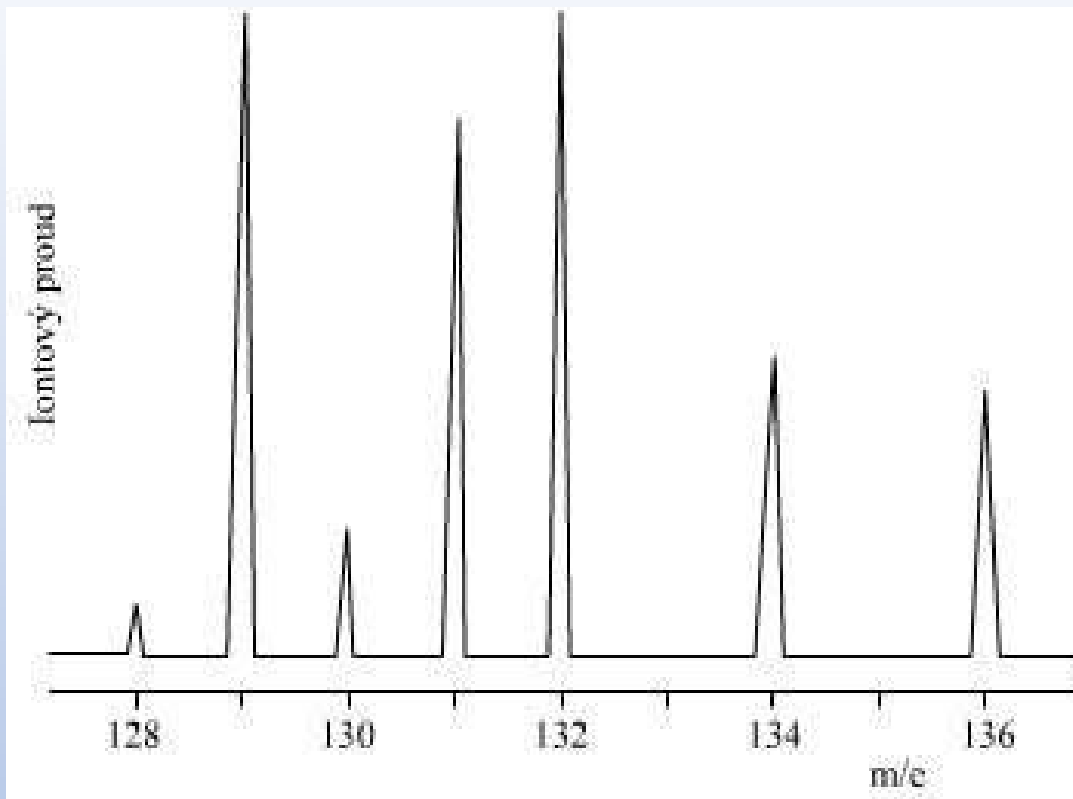
⇒ ^{40}K je přirozeným beta zářičem, součástí přirozeného radioaktivního pozadí



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

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





Hmotnostní spektrum xenonu

Izotopové složení přírodního xenonu [%]

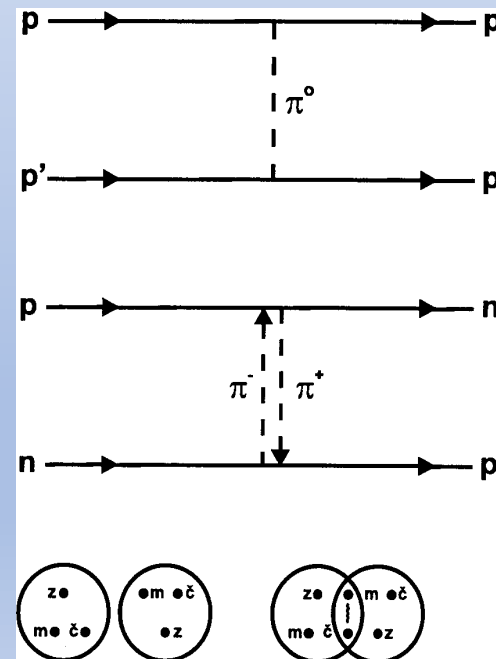
^{124}Xe	0,095	^{129}Xe	26,44	^{132}Xe	26,89
^{126}Xe	0,090	^{130}Xe	4,08	^{134}Xe	10,44
^{128}Xe	1,915	^{131}Xe	21,18	^{136}Xe	8,87

Atomové jádro



- Jádra běžných atomů se skládají z protonů a neutronů, mezi kterými existují silné jaderné interakce. **Jaderné síly** jsou nábojově nezávislé (možnost výměny mezi protonem a neutronem), krátká doba interakce (10^{-23} s).
- Je v nich soustředěna prakticky veškerá hmotnost atomu.
- Nukleony mají svůj jaderný spin rovný $\frac{1}{2}$.
- Mezi nukleony působí silné jaderné interakce, které jsou podstatou jaderných sil (**výměna virtuálního pionu**).

**Výměnné reakce
nukleonů**



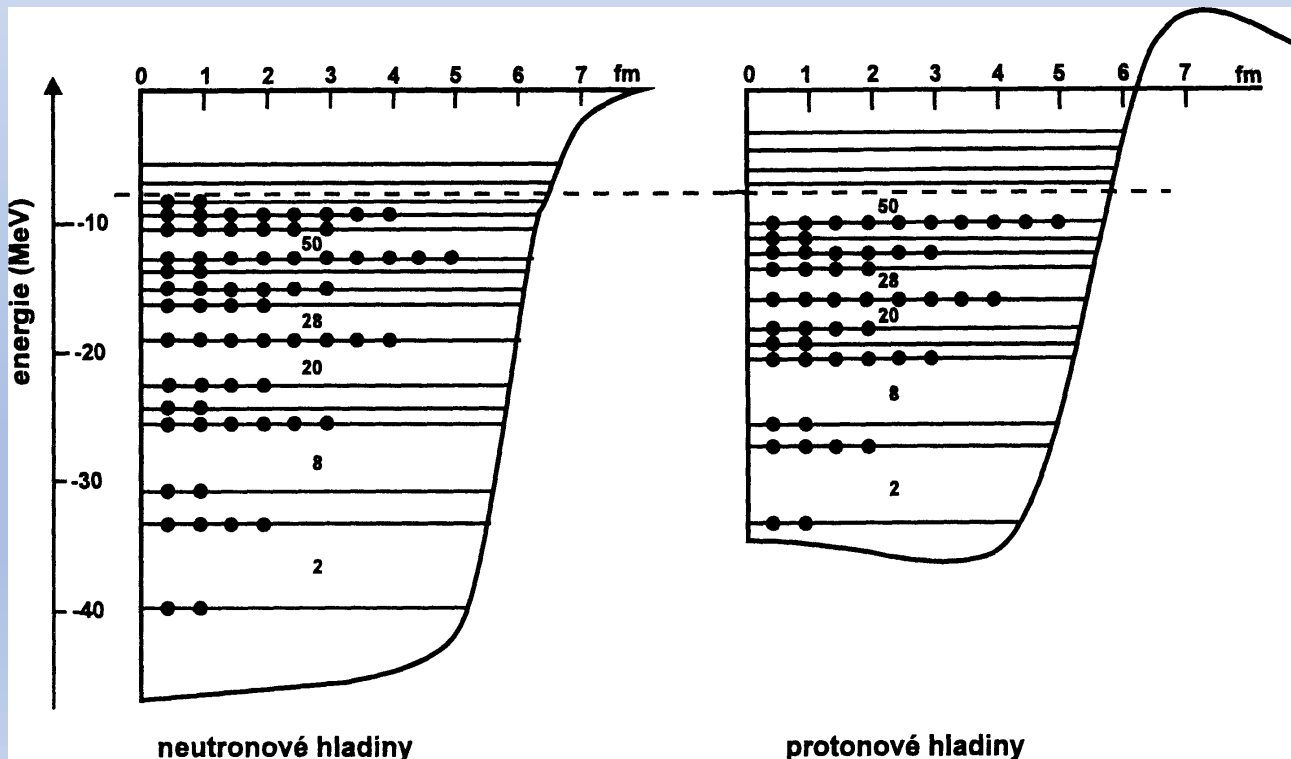
**Výměna gluonu mezi
dvěma nukleony**



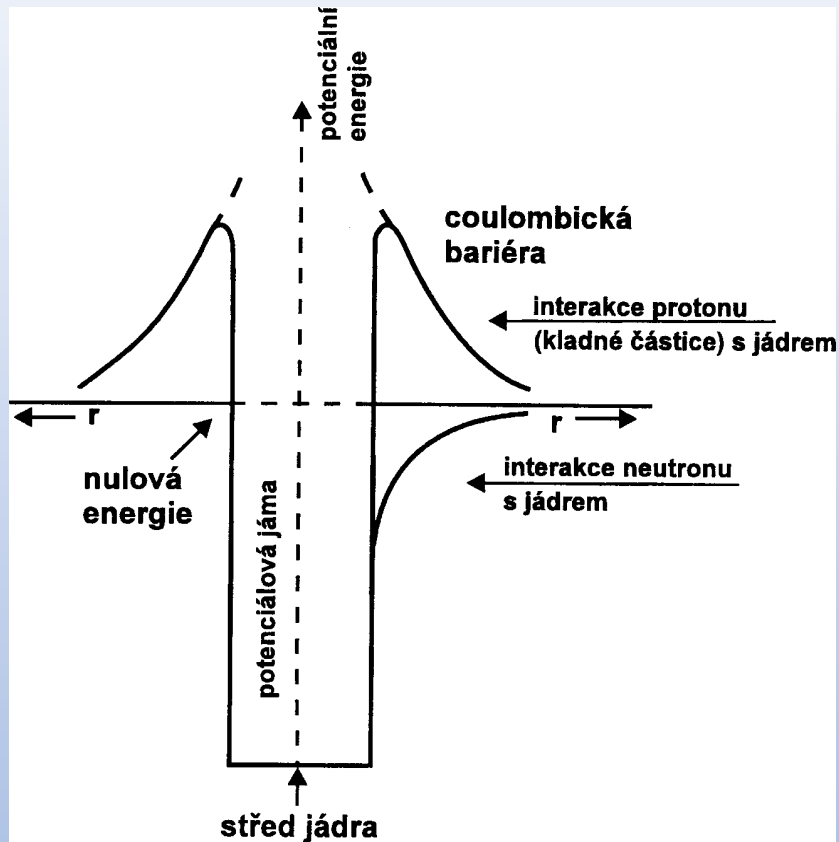
Hladinový model jádra



- 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)
- pro protony a neutrony existují samostatné soustavy energetických hladin



Potenciálová jáma a energetická 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



Poloměr jádra

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

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

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

Obsazení protonových a neutronových slupek v jádře



- 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:

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



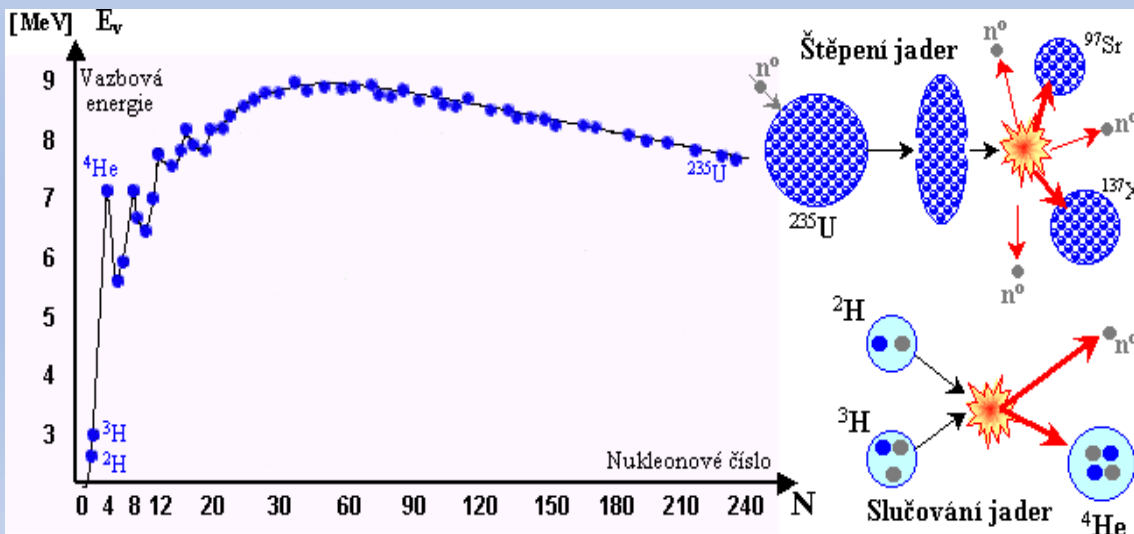
Hmotnost a vazebná energie jádra

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 vztažená na jeden nukleon vypovídá o tom, zda je jádro stabilní nebo nikoliv !!!



$$\epsilon = E_v / A$$



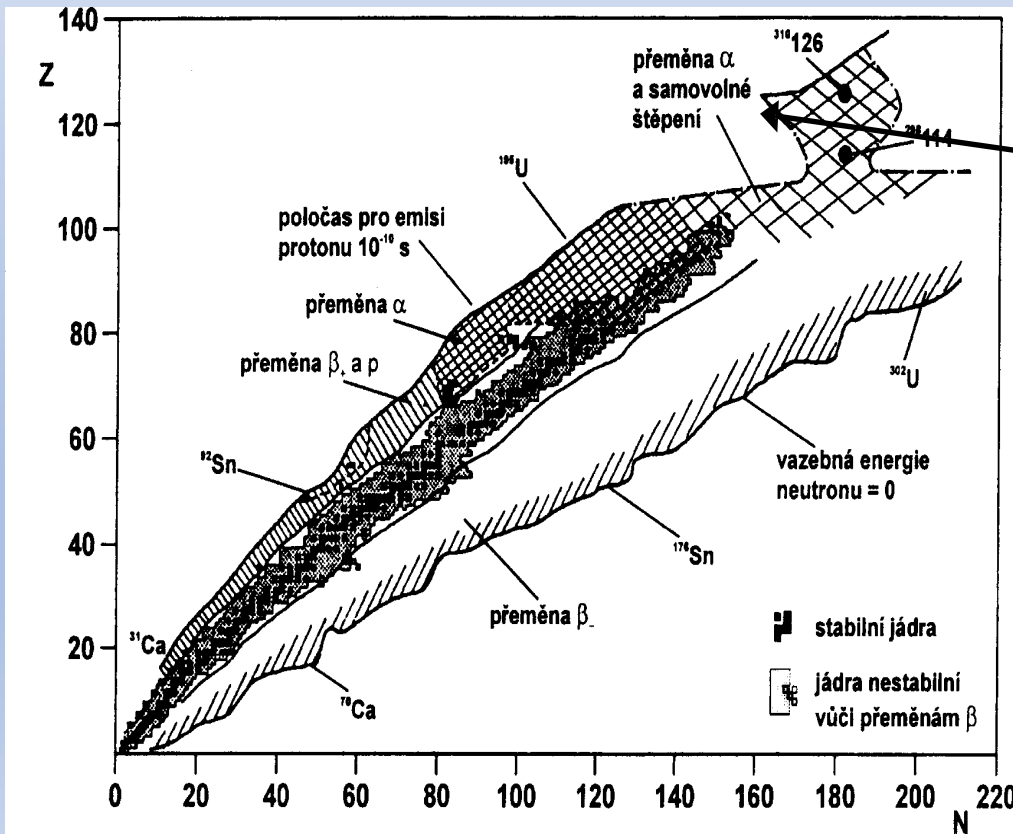
Možnosti uvolnění energie při jaderných přeměnách:



- **spojováním jader** neboli **jadernou syntézou** čili **fúzí nejlehčích jader** (vodík, helium,...) v jádra těžší (termojaderná syntéza)
- **rozštěpením** nejtěžších jader (např. uranu) na jádra lehčí.

V obou těchto procesech mají nukleony ve výsledných jádrech menší vazebnou energii než v jádrech výchozích a rozdíl těchto energií se uvolní v podobě **jadernou energii** (nejčastěji ve formě tepla).

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 a **nukleárně labilní** .



„ostrov stability“

– očekávaný výskyt supertěžkých jader, očekává se jejich relativní stabilita – viz další kapitoly

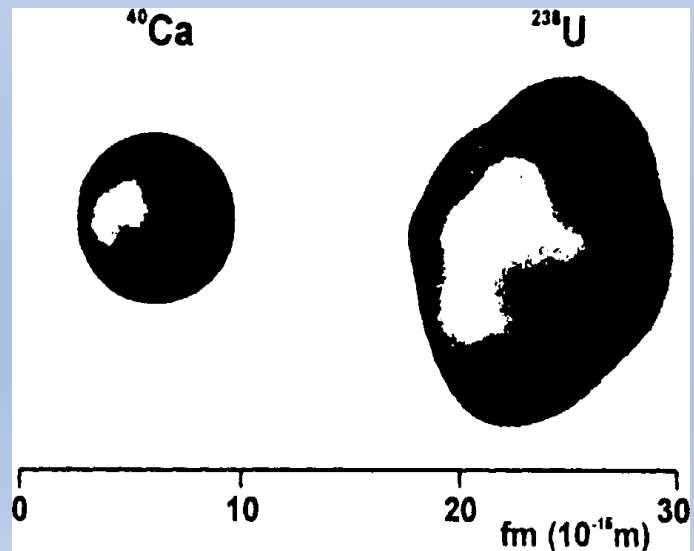




Kapkový model jádra je založen na představě krátkého dosahu jaderných sil, kdy nukleony v jádře interagují pouze se svými sousedy v jádře podobně jako tomu je v kapce kapaliny.

Tvar jádra

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





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)