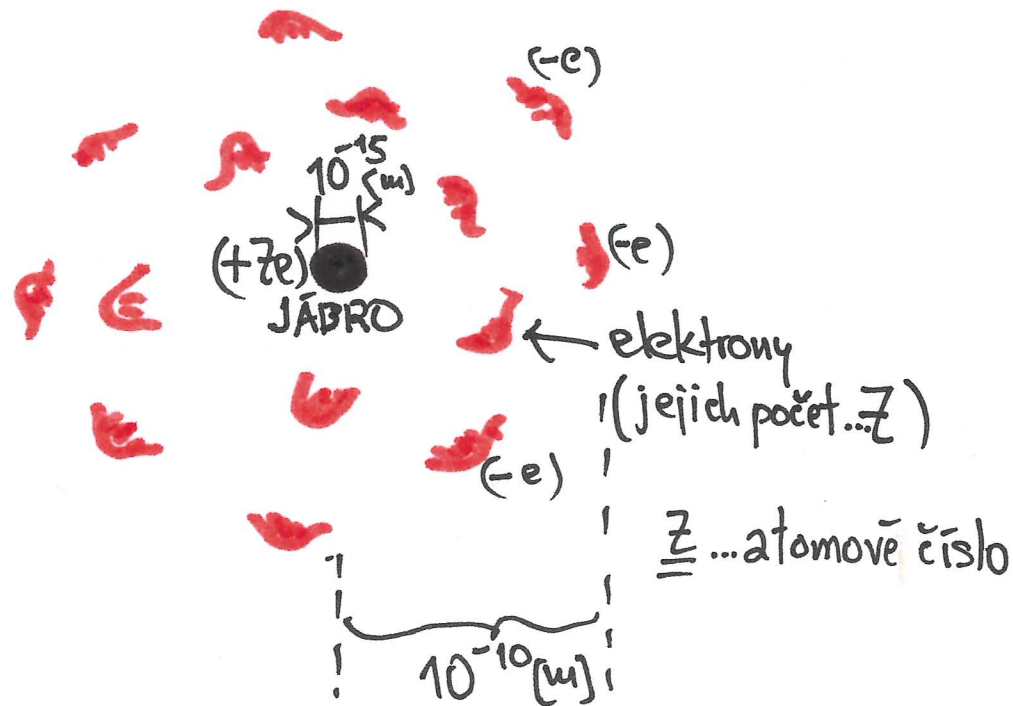


9. týden

ATOMOVÉ JÁDRO



(1)

ATOM

hmotnost elektronu 9.1×10^{-31} [kg]

hmotnost jádra cca 1000 x větší.

Hmotnost atomů měříme v jednotkách

$$1u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ [kg]} \quad (2)$$

atomová hmotnostní jednotka .

Velikost této jednotky byla získána jako $\frac{1}{12}$ hmotnosti nejčastěji se vyskytujícího atomu v přírodě, tj. atomu uhlíku C^{12} ($Z=12$).

● Z čeho se skládá atomové jádro ?

Protony s nábojem $(+e)$, spinem $\frac{1}{2}$,
hmotností $1.0073 u$.

Neutrony bez náboje, se spinem $\frac{1}{2}$,
hmotností $1.0087 u$.



(3)

Proton a **neutron** lze chápat jako
2 kvantové stavy jediné mikročástice, zvané
nukleon.

Počet nukleonů v jádře označujeme symbolem **A**
a nazýváme **hmotnostní číslo jádra**.

Počet protonů, tj. počet kladných nábojů v jádře
musí kompenzovat Z záporných nábojů elektronů,
takže je roven **atomovému číslu Z**.

Počet neutronů v jádře je tedy **$(A - Z)$** .

Jádra atomů proto označujeme symboly

$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$

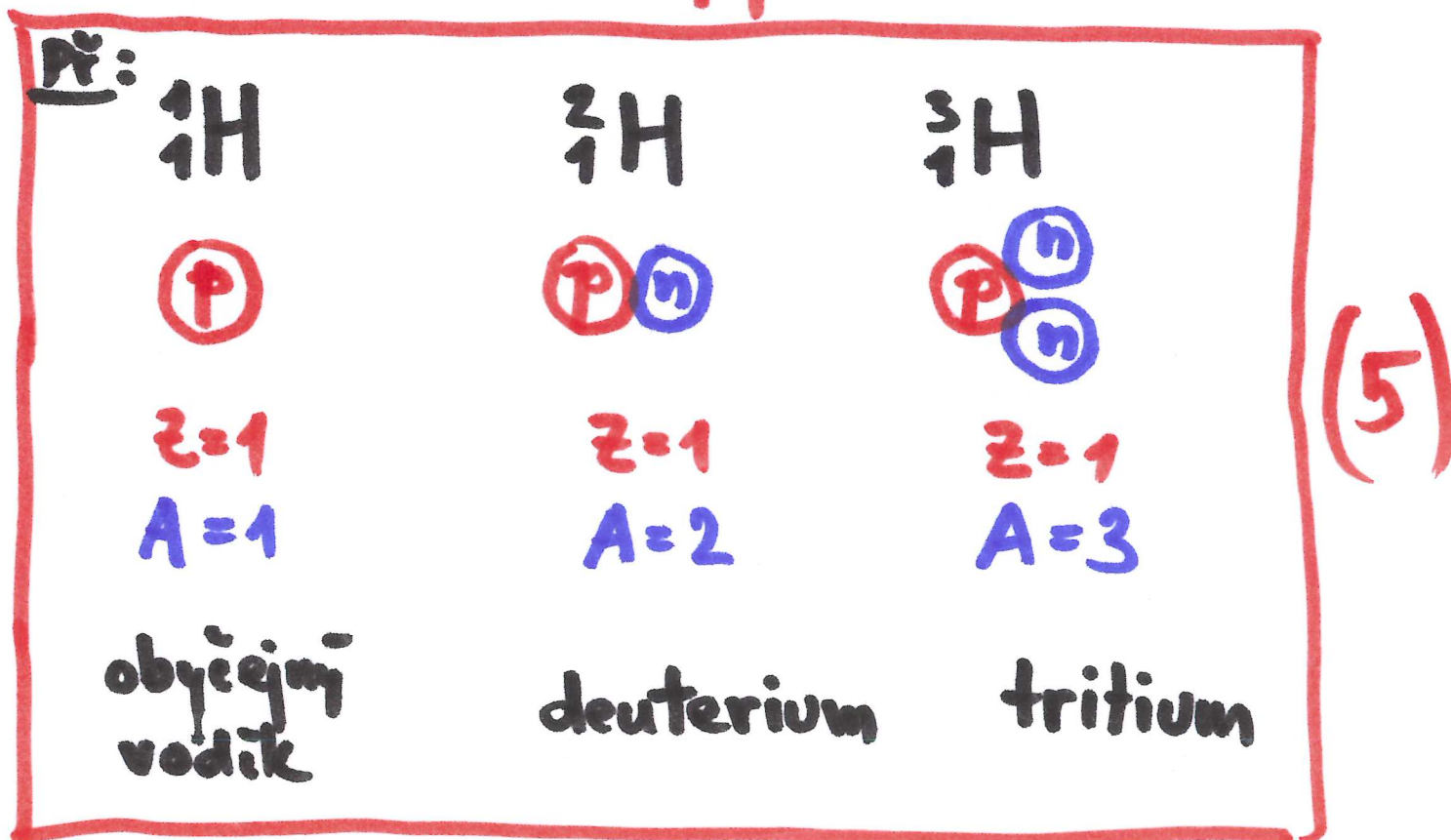
X ... chemické označení atomu podle
periodického systému

Z ... atomové číslo atomu = počet protonů v jádře

A ... hmotnostní číslo jádra = počet nukleonů,
tj. počet protonů + neutronů v jádře

(4)

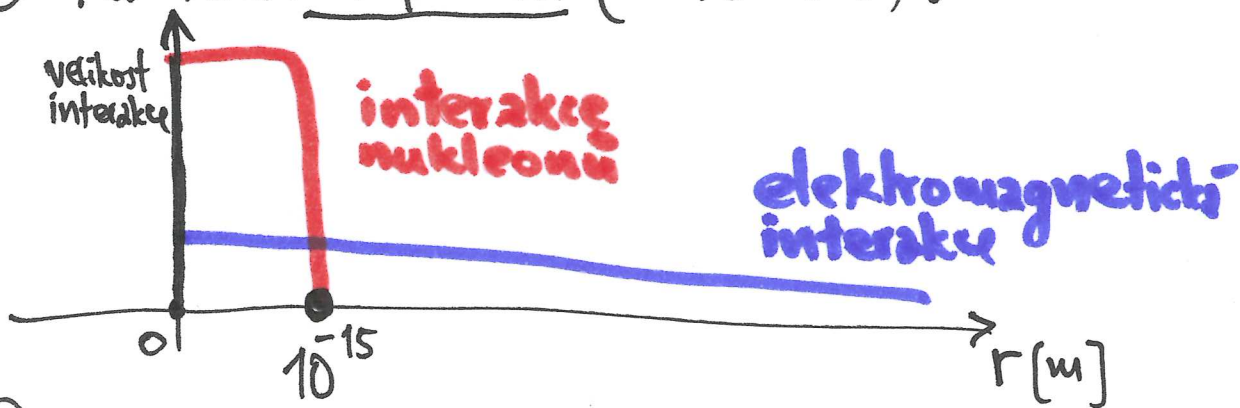
Přítomnost neutronů v jádře způsobuje existenci různě hmotných atomů téhož chemického prvku, kterým se říká **izotopy**:



Tři izotopy atomového jádra chemického prvku vodík (H)

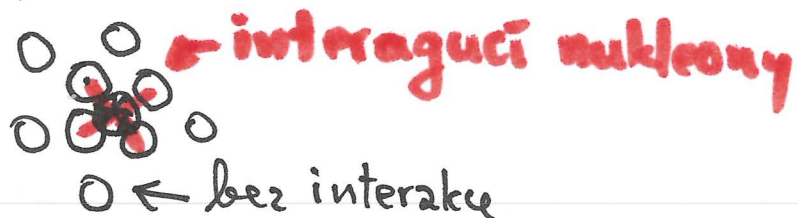
• Vlastnosti interakce nukleonů:

- ① Je nezávislá na nábojích, tj.
 $(p \rightarrow p)$, $(p \rightarrow n)$, $(n \rightarrow n)$ mají stejnou velikost.
- ② Je pouze přitažlivá a velice silná (cca 10^6 krát silnější než elektromagnetická interakce).
- ③ Má velmi krátký dosah ($\sim 10^{-15} \text{ m}$).



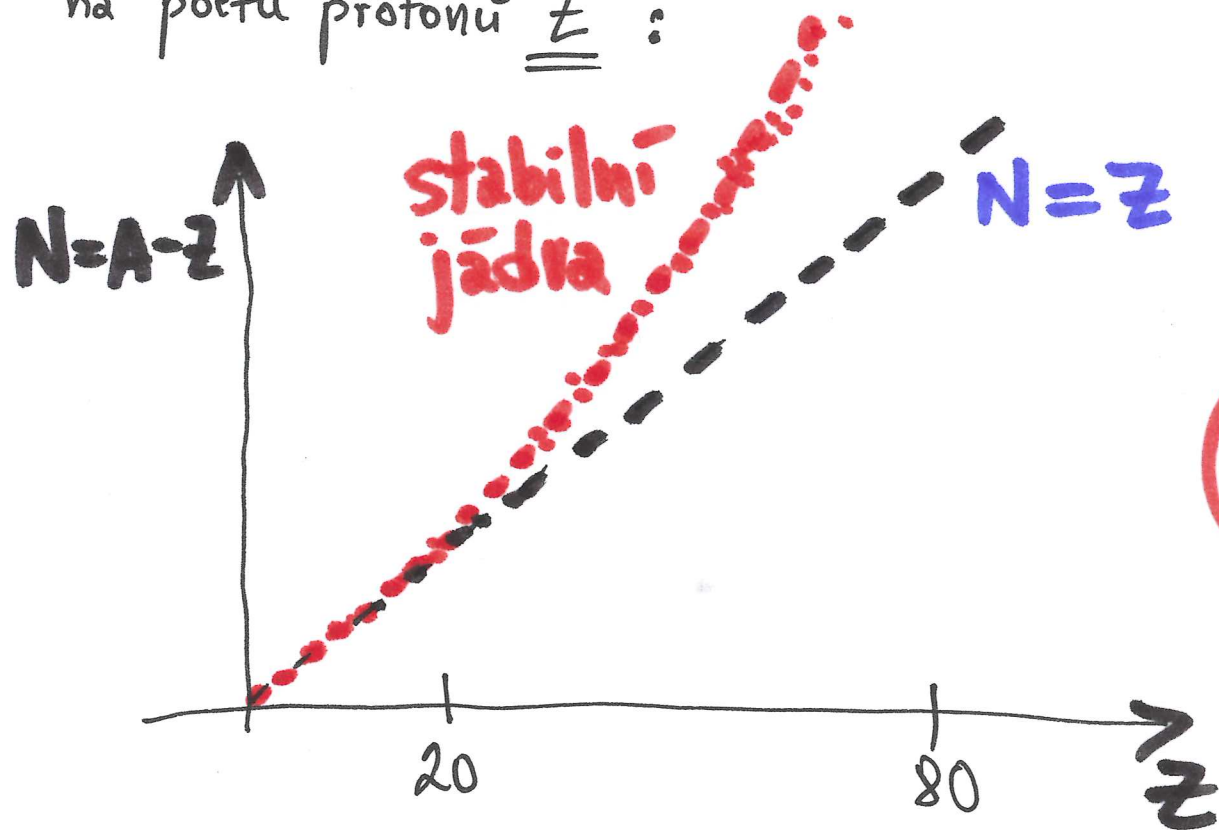
(6)

- ④ Vykazuje saturační efekt, tj. interagují jen nukleony v nejmenší vzdálenosti



S těmito vlastnostmi souvisí **stabilita jader**

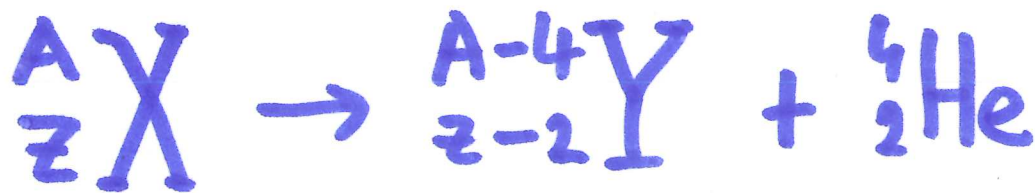
popsaná závislost počtu neutronů $N = A - Z$
na počtu protonů Z :



Důvod odchylky od situace stejného počtu protonů a neutronů je zřejmý: Protony jsou kladně nabitě, takže se odpužují. Aby jádro bylo stabilní, musí toto odpuzování být kompenzováno přitažlivou interakcí nadbytečných neutronů.

Protože interakce mezi neutrony má **krátký dosah**, zatímco elektromagnetické odpuzování protonů má **libovolně daleký dosah**, existuje určitá **limita schopnosti neutronů udržet jádro stabilním** pro velké hodnoty A .
 Tato limitu představuje izotop vizmutu ${}_{83}^{209}\text{Bi}$, který je **nejtěžším stabilním jádrem**.
 Všechna těžší jádra ($A > 209$) spontánně přecházejí na lehčí prostřednictvím **α - a β -rozpadu**:

• **α -rozpad:**



- dochází zde k emisi jednoho jádra atomu He, tj. 2 protonů a 2 neutronů.

α -částice

(8)

• β^- - rozpad:



• dochází zde k přeměně neutronu na proton:



β^- -částice
(= elektron)

(9)

• β^+ - rozpad



• dochází zde k přeměně protonu na neutron:



β^+ -částice
(= pozitron)

(10)

• Jaderné velikosti a tvary :

Experimenty ukázaly, že objem zaujímaný jádrem je přímo úměrný počtu nukleonů :

$$\left| \frac{4}{3} \pi R^3 = \text{koust. } A \right| \quad (11)$$

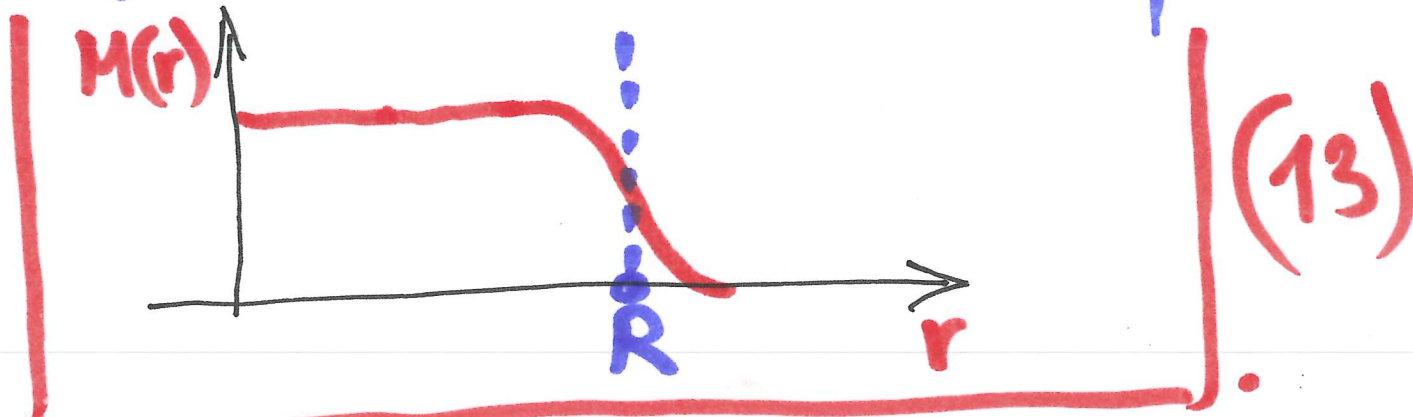


$$\left| R = \underbrace{1.2 \times 10^{-15} \text{ [m]}}_{R_0} \cdot A^{1/3} \right| \quad (12)$$

poloměr jádra

$\left(\begin{smallmatrix} 12 \\ 6 \end{smallmatrix} \text{C} \right) \dots R = 2.7 \times 10^{-15} \text{ [m]}$

• Prostorové rozložení hmotnosti jádra :



● Hustota jaderné hmoty :

Vezměme konkrétní jádro ${}^{12}_6\text{C}$, jehož poloměr jsme již spočítali ... $R = 2.7 \times 10^{-15} [\text{m}]$.

$A=12$, takže hmotnost jádra je $m = 12u$, kde u je atomová hmotnostní jednotka (2).

Pro **hustotu** tak máme

$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi R^3} = 2.4 \times 10^{17} [\text{kg m}^{-3}]$$

! (14)

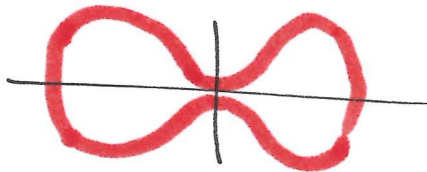
Ukazuje se, že prakticky všechna jádra v přírodě mají řádově srovnatelnou hustotu, tj. $\sim 10^{17} [\text{kg m}^{-3}]$.

✓ Pro představu: napakujte 3 Slunce do koule 10 km a máte hustotu $\sim 10^{17} [\text{kg m}^{-3}]$.

I když v přírodě dominuje sférický tvar jader, existují i jádra komplikovanějších tvarů, např.:



elipsoidální jádro

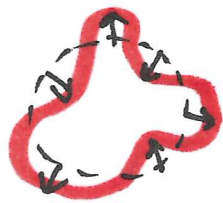


kapkovité jádro

(15)

Tvar jader nemusí být statický. Jádra mohou

vibrovat,



sférický vibrátor

nebo

rotovat



deformovaný rotátor

(16)

• Vazbová energie jádra :

Uvažujme jádro deuteria ${}^2_1\text{H}$, které obsahuje 1 proton a 1 neutron.

Dalo by se očekávat, že hmotnost ${}^2_1\text{H}$ bude součtem jádra obyčejného vodíku ${}^1_1\text{H}$ a neutronu:

$$m_{{}^1_1\text{H}} + m_{\text{neutron}} = m_{{}^2_1\text{H}} \circ$$

Realita je však jiná :

$$m_{{}^1_1\text{H}} + m_{\text{neutron}} - m_{{}^2_1\text{H}} = 0.0024 \text{ u} \quad (17)$$


tj. jádro ${}^2_1\text{H}$ je **lehčí** než by mělo být.

Uvedenému rozdílu hmotností $\Delta m = 0.0024 \text{ u}$ odpovídá rozdíl energie:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 2.2 \text{ [MeV]} \quad (18)$$

$$\text{MeV} = 10^6 \text{ eV} ; \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Tuto "chybějící" energii jádra ${}^2_1\text{H}$ interpretujeme jako energii, kterou musíme jádru dodat, abychom jádro rozbili na jednotlivé protony a neutrony.
Říká se jí **vázbová energie jádra**.


foton
s energií
2.2 MeV



volný proton
a neutron

(19)

Vázkovou energii mají **vřechna jádra** v přírodě.
Její velikost se pohybuje v intervalu

2.2 MeV až 1640 MeV . ! (20)

Připomeňme, že atomární energie jsou řádově jen
v jednotkách eV ! Jádro je tedy obrovským zdrojem energie.

Z uspořádnání nukleonů v jádře se pro varbovou energii jádra dá odvodit formule:

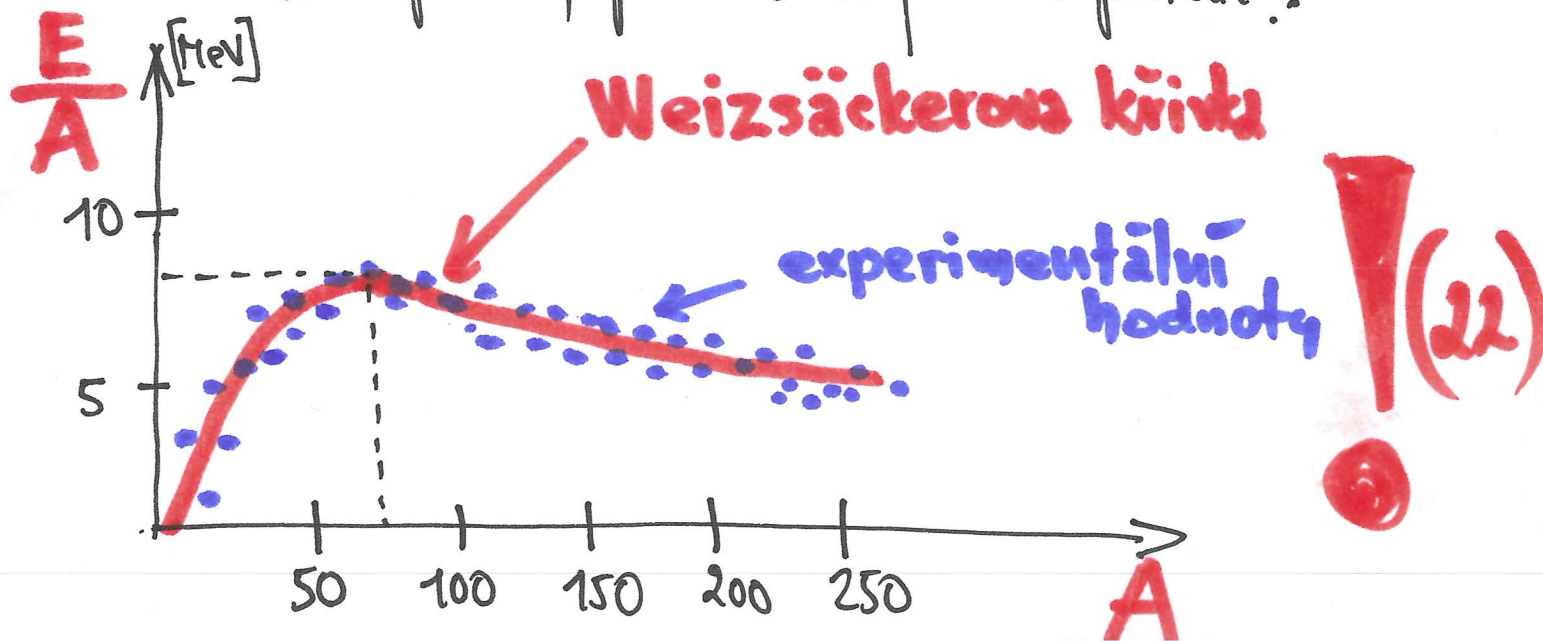
$$E = k_1 \cdot A - k_2 \cdot A^{2/3} - k_3 \frac{1}{A^{1/3}}$$

kde $\underline{k_1}$, $\underline{k_2}$ a $\underline{k_3}$ jsou konstanty.

! (21)

Grafické vyjádření této varbové energie vztahené na 1 nukleon, tj. $\frac{E}{A}$ dává výborný souhlas s experimentálními

hodnotami prakticky pro všechna jádra v přírodě:



Weizsäckerova křivka vykazuje **značnou podobnost chování nukleonů v jádře a chování molekul v kapalině.**

Proto hovoříme o **kapkovém modelu jádra.**

Tento model však nedokáže objasnit jiné vlastnosti jádra, které nesouvisí s vazbovou energií.

Za tím účelem byl vyvinut komplikovanější model, který je **zobecněním středního pole**

v atomech a vede ke vzniku **jaderných slupek** (analogu slupek atomárních).

Říká se mu proto **slupkový model jádra.**

• Mezonová podstata jaderných sil

K důkladnému pochopení vlastností atomových jader je potřeba něco vědět o podstatě sil působících mezi nukleony.

Z fyziky atomů víme, že atomy či jejich soubory drží pohromadě díky společnému sdílení elektronů (kovaletní vazba, kovová vazba apod.).

Něco podobného se dalo očekávat i u jader, tj. společně sdílení nějakých mikročástic mezi nukleony. Problém však je, že až elektronů až žádné jiné existující mikročástice neposkytovaly souhlas s experimentálními výsledky.

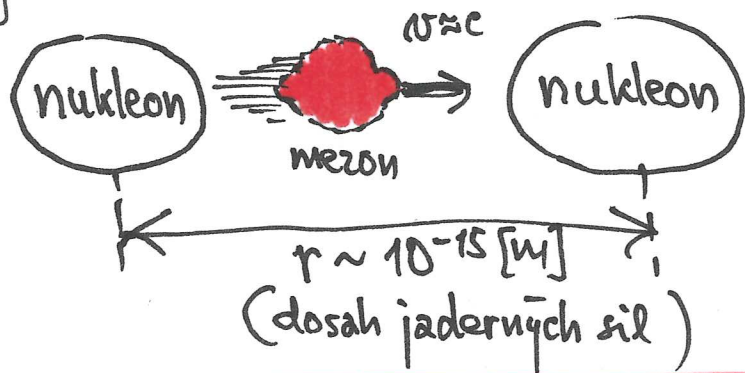
Yukawův objev : Hledejme novou, dosud

nepozorovanou mikročástici a vypočtěme

její parametry tak, aby dávaly souhlas s experimentem.

Tyto nové mikročástice se začaly nazývat **mezony**, když se ukázalo, že jejich hmotnost je mezi hodnotami hmotnosti elektronu a nukleonu.

Yukawova představa byla, že nově mikročástice (mezony) se pohybují mezi nukleony, a to rychlostí srovnatelnou s rychlostí světla ($v \approx c$):



(23)

Označíme-li m hmotnost mezonu, pak z Heisenbergova principu neurčitosti lze snadno odvodit, že musí platit:

$$\underbrace{mc^2}_{\Delta E} \cdot \underbrace{\frac{r}{c}}_{\Delta t} \geq \frac{1}{2} \hbar$$

$$m \geq \frac{\hbar}{2cr} \sim 2 \cdot 10^{-28} \text{ [kg]}$$

pro srovnání: $m_{\text{elektron}} \sim 10^{-30} \text{ [kg]}$; $m_{\text{nukleon}} \sim 10^{-27} \text{ [kg]}$

! (24)