



Úvod – jaderná fyzika

- Jak lze vypočítat velikost jádra?
- Jak lze zachytit jaderné projevy?
- Jak lze jádro popsat?
- Jaké jsou základní vlastnosti jádra atomu?

- Co je nuklid?

- Co je jednotkou atomové hmotnosti?

- Jak použít $E = mc^2$ pro určení vazební energie z jádra?



<http://cwx.prenhall.com/bookbind/pubbooks/giancoli3/chapter42/deluxe.html>

Rozměry atomu a rozměry atomového jádra

- Experiment --- objem atomového jádra je přímo úměrný počtu nukleonů, které jádro obsahuje.
- Počet nukleonů v jádře určuje nukleonové číslo (býv.hmotnostní) A .
- Předpokládáme kulový tvar jádra, pak jeho objem je úměrný nukleonovému číslu A . Poloměr atomového jádra se pak určuje ze vztahu

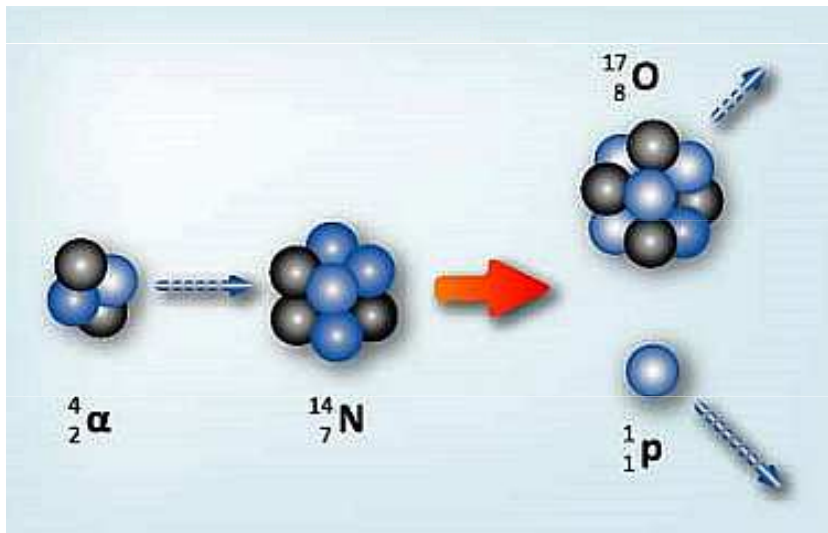
$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}, \quad \text{kde } R_0 = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m.}$$

- Za poloměr jádra označíme vzdálenost, v níž ještě na nukleon působí jaderné síly.

U velkých jader (např. uran, thorium apod.) se poloměry pohybují kolem 10^{-14} m.

Objev protonu

- Rutherford sledoval ve Wilsonově mlžné komoře stopy částic α . Ty narážely na atomy dusíku. Z místa srážky vycházely 2 stopy. Bylo zjištěno, že jedna stopa patří ionizovanému atomu kyslíku (resp. jádru kyslíku), druhá pak lehké částici, která je totožná s jádrem vodíku. Tato částice byla pojmenována proton.
- Došlo vlastně k přeměně atom.jádra, která byla vyvolána srážkou. Taková přeměna se v analogii s chemií označuje jako jaderná reakce. Pro její zápis můžeme použít zápisu



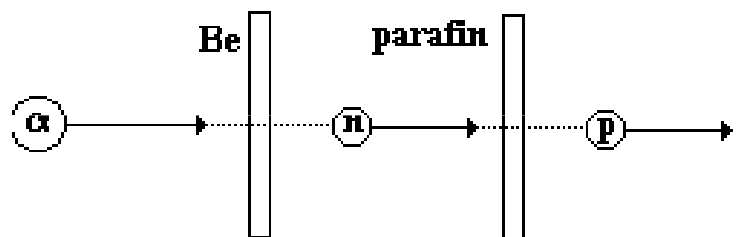
Vlastnosti protonu

- Jeho spinové kvantové číslo $s = \frac{1}{2}$ - fermion (částice s poločíselnými hodnotami s , liché násobky $1/2$).
- kladný elektrický náboj = elementárnímu elektrickému náboji e .
- klidová hmotnost protonu je $(1,672\,648\,5 \pm 0,000\,008\,6)10^{-27}$ kg.
- proton je stabilní částicí s neomezenou střední dobou života
- (podle některých nových teorií by měl mít konečnou střední dobu života, která ale není menší než asi 10^{32} let).
- Proton tvoří jádro atomu vodíku. Odtud plyne alternativní značení v jaderných reakcích místo p , H .

Objev neutronu

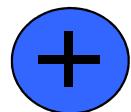
- Neutron byl objeven až v r.1932 –J.Chadwickem. Pomocí α částic ozařoval beryllium a zjistil, že při následné reakci vzniká záření, které se neodchyluje od původního směru ani v el.poli ani v magnet. poli.
- Navíc velice snadno reaguje s parafínem (vodík). Z parafinu poté vylétávají protony s energií, kterou před vytržením protonu z parafinu nesla částice o zhruba stejné hmotnosti. Tak byl objeven neutron.

Příslušná **jaderná reakce** je tato: ${}^4_2\text{He} + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$



Atomové jádro

Částice tvořící atomy byly ve třicátých letech byly považovány za elementární.



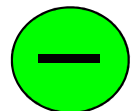
Proton

$$m_0 \doteq 938.27 \text{ MeV}$$



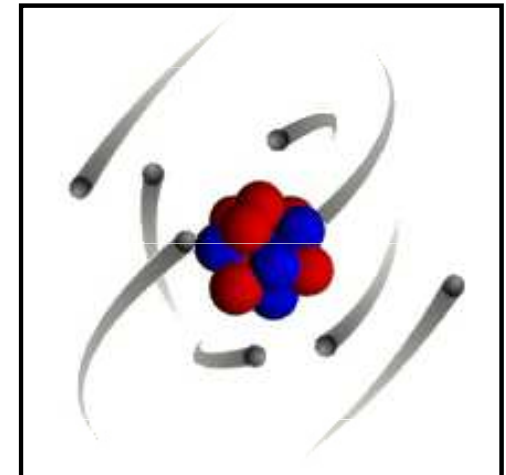
Neutron

$$m_0 \doteq 939.56 \text{ MeV}$$



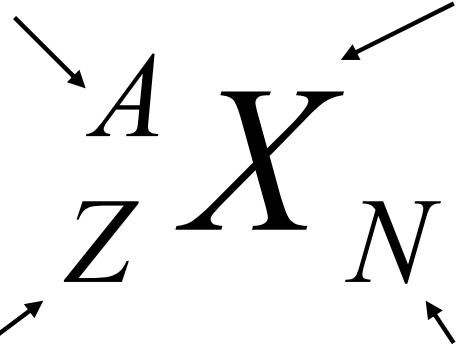
Elektron

$$m_0 \doteq 0.511 \text{ MeV}$$



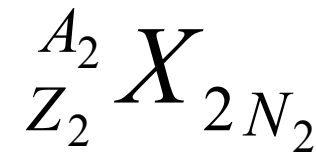
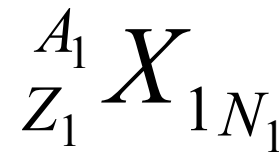
počet nukleonů
(protony + neutrony)

chemická
značka prvku



počet protonů

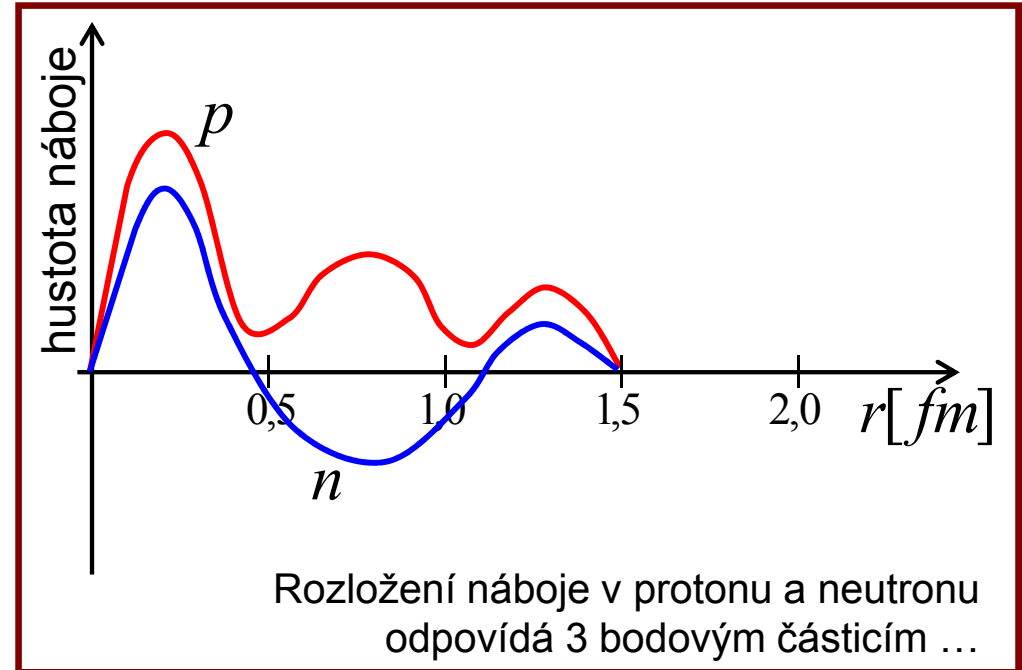
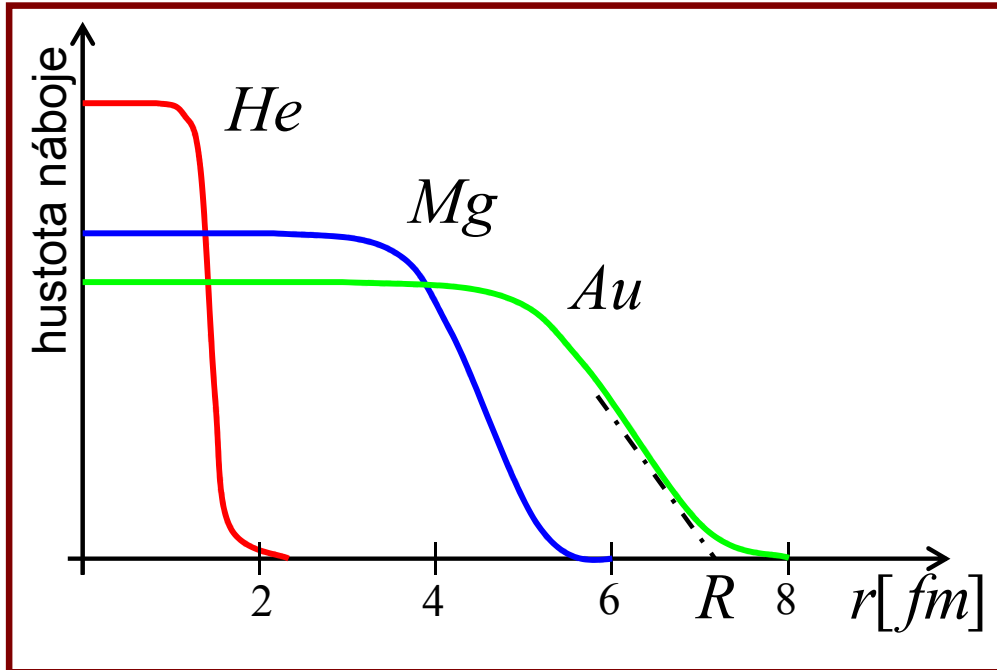
počet neutronů



izotopy	$Z_1 = Z_2$	stejný počet protonů
izotony	$N_1 = N_2$	stejný počet neutronů
izobary	$A_1 = A_2$	stejný počet nukleonů
izomery	vše =	různé E hladiny

Elektrický náboj a hustota jádra

Rozložení náboje v jádru lze zjistit pomocí ostřelování materiálu elektrony.



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

$$r_0 \doteq 1.45 \times 10^{-15} \text{ m}$$

elektrický poloměr jádra

Použijeme-li elektrický poloměr jako odhad poloměru geometrického, vyjde nám pro hustotu jaderné hmoty:

$$\rho = \frac{m}{V} \doteq \frac{A \cdot m_u}{\frac{4}{3} \pi \cdot R^3} = \frac{A \cdot m_u}{\frac{4}{3} \pi \cdot r_0^3 \cdot A} = \frac{3 \cdot m_u}{4 \cdot \pi \cdot r_0^3} \doteq 1.3 \times 10^{17} \text{ kgm}^{-3}$$

Pro srovnání – hustota vody je přibližně 1000 kgm^{-3} . Koule z jaderné hmoty o hmotnosti země by měla poloměr cca 200 m. Krabička od zápalek naplněná jadernou hmotou by vážila jako několik plně naložených nákladních vlaků.

Spin jádra

Jak proton, tak neutron jsou částice, které mají spin $\frac{1}{2}$. Jádro, které se z nich skládá, pak může mít spin různý – to závisí na přesném složení a konfiguraci protonů a neutronů. Závisí na tom, zda je počet protonů a neutronů sudý či lichý a kolik částic jádro obsahuje. Obecně lze říct :

- **Jádro je sudo-sudé : sudý počet částic spárované po dvou**

Spin jádra je celočíselný : $I = 0$

- **Jádro je licho-liché : sudý počet částic**

Spin jádra je celočíselný : $I = 1, 2, 3, \dots$

- **Jádro je sudo-liché nebo licho-sudé : lichý počet částic**

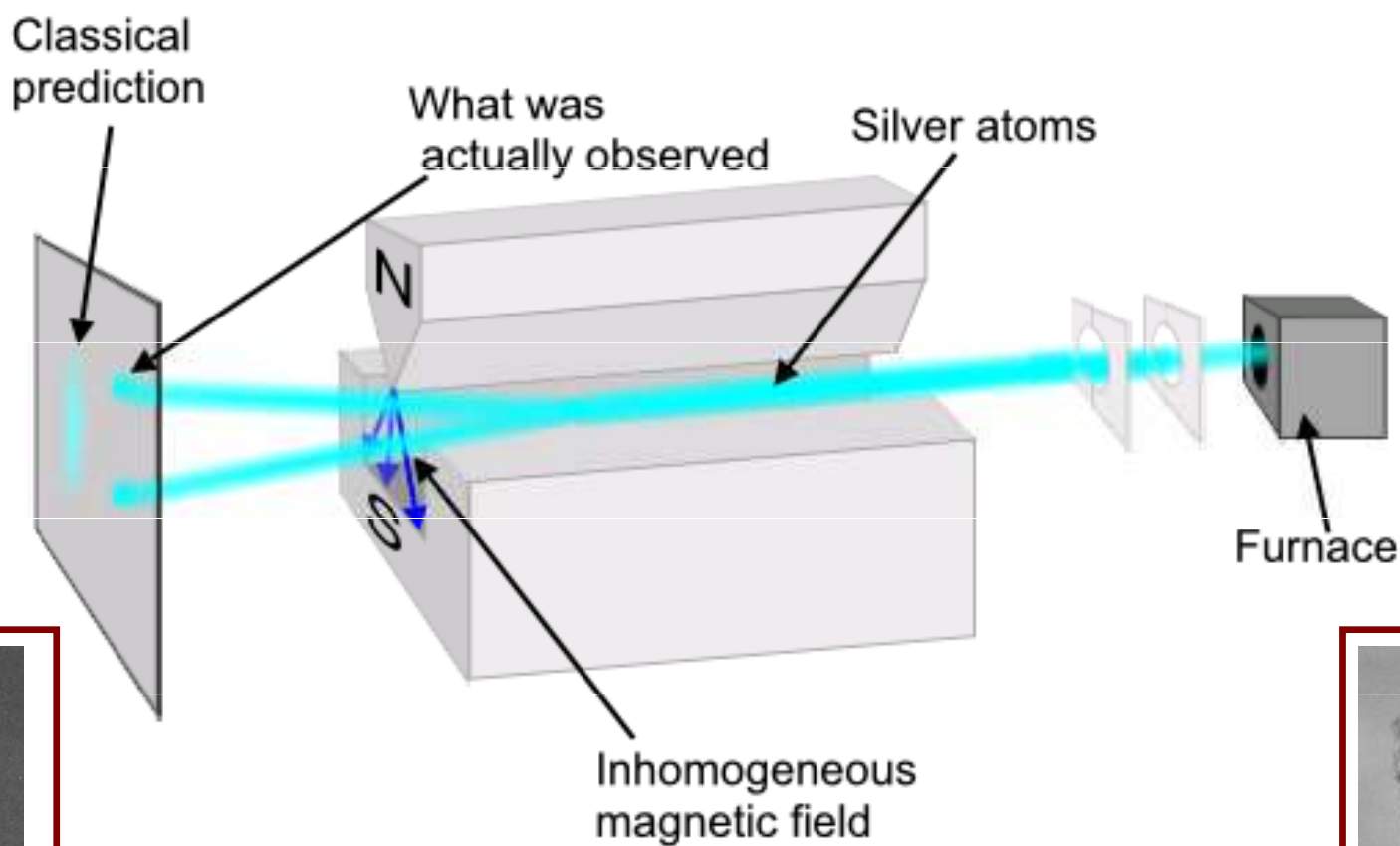
Spin jádra je poločíselný : $I = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$

Každé jádro s nenulovým spinem má rovněž nenulový magnetický dipólový moment. Pro jádra v základním stavu byl naměřen spin z intervalu $\langle 0, 8 \rangle$. Například

$$I\left({}_{71}^{176}\text{Lu}\right) = 7, \quad I\left({}_{83}^{204}\text{Bi}\right) = 8$$

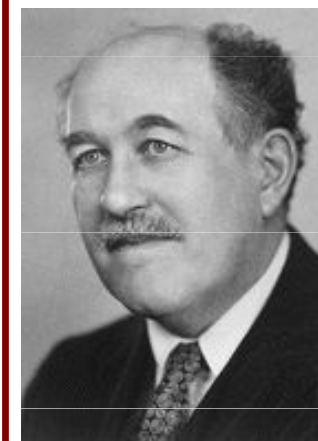
Spin jądra

Důkaz existence kvantovaného magnetického dipólového momentu jádra (a tedy spinu) podal Stern-Gerlachův experiment.



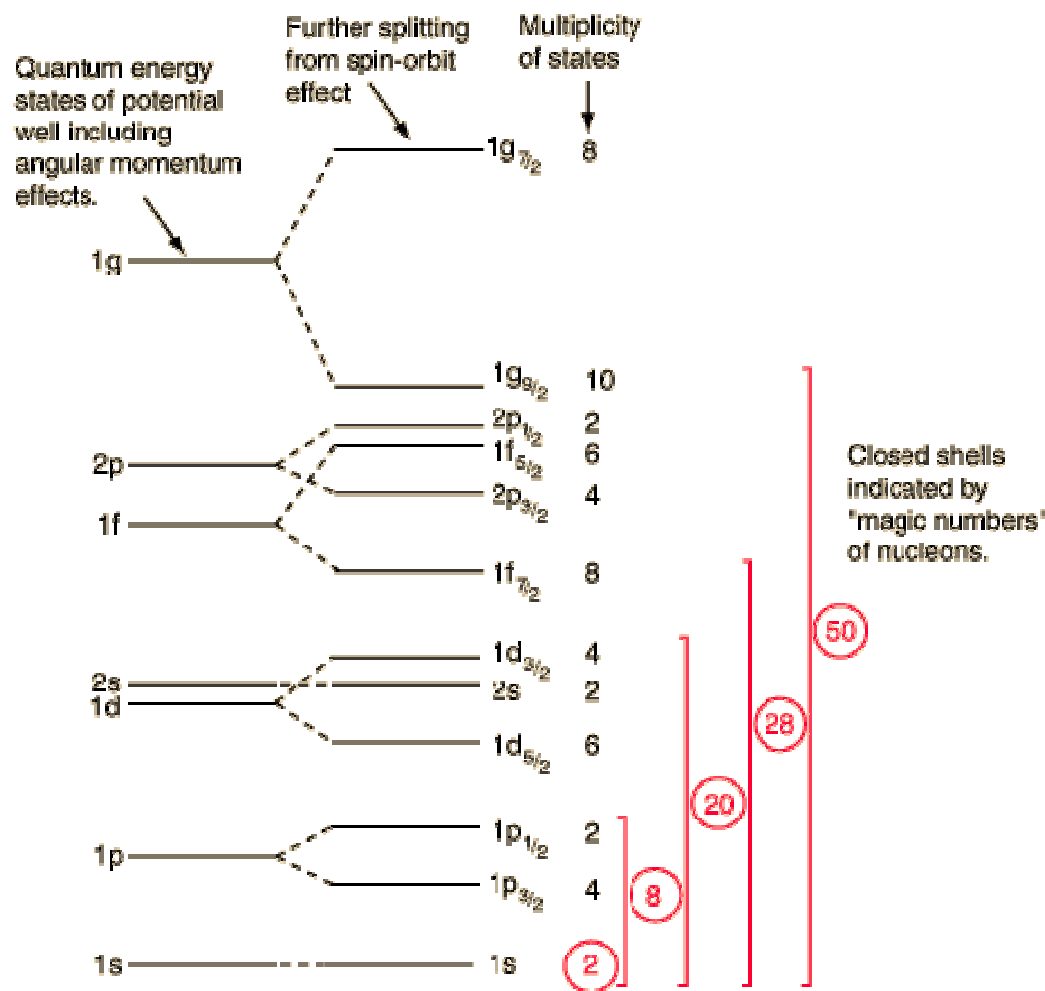
Walter Gerlach
1889 - 1979

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/stern-gerlach>



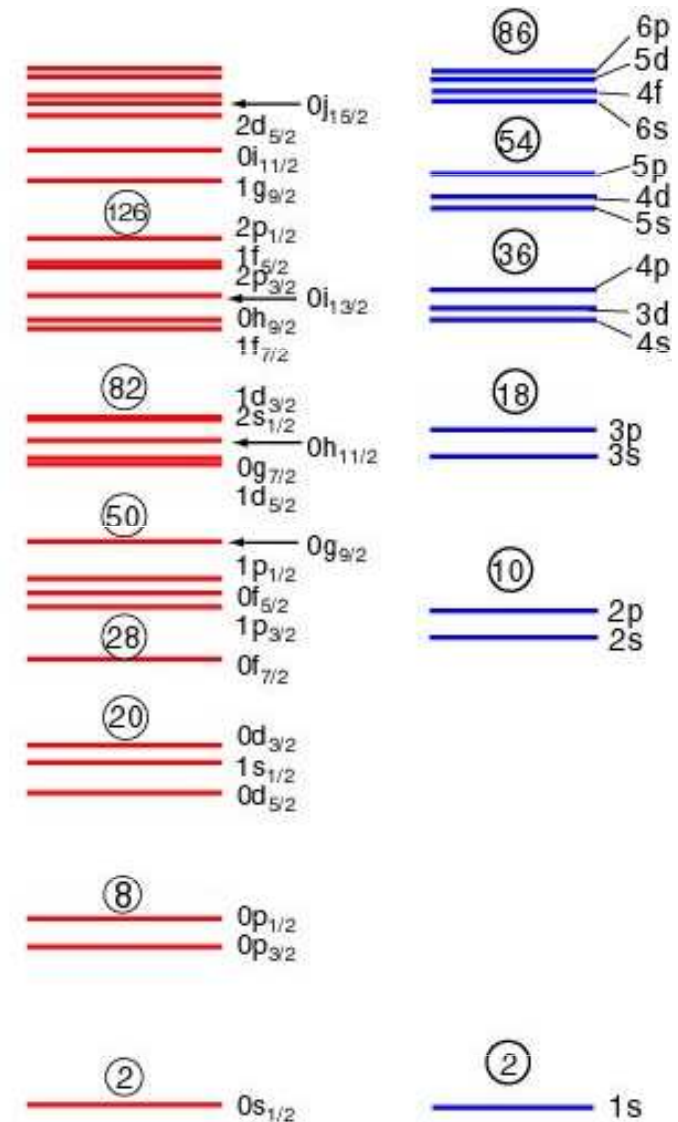
Otto Stern
1888-1969

Energetické stavy jádra



V jádře hrají obrovské vlivy vazby mezi orbitálním magnetickým momentem částic a jejich spinem (v elektronovém obalu jsou tyto efekty velmi malé). Energetické hladiny jádra jsou proto velmi složité a dají se spočítat jen přibližně.

Stejně jako elektronový obal je i jádro členěno na energetické hladiny. Protony a neutrony mají zvlášť své energetické stavy.

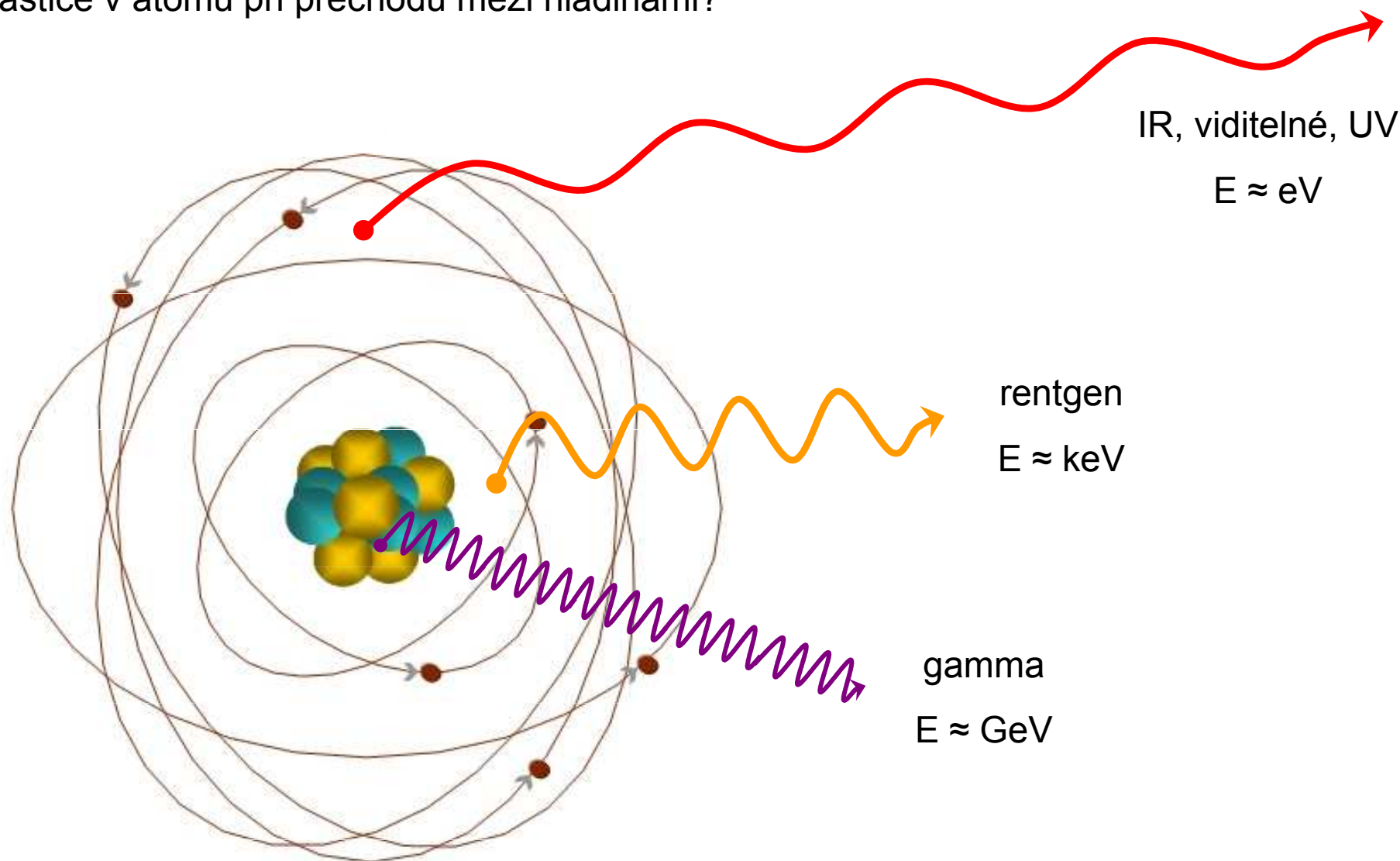


Shell Model of Nuclei

Shell Model of Atoms

Elektromagnetické vyzařování atomu

Jaké druhy elektromagnetického záření pohlcují/vyzařují částice v atomu při přechodu mezi hladinami?



Detektory částic

3 základní skupiny:

- **Detektory zobrazující přímo stopy částice** - např. mlžná komora, bublinová komora, fotografické emulze;
- **Detektory počítající částice** - plynový ionizační detektor, proporcionální komora, Geigerův - Müllerův počítač, drátová komora;
- **Kalorimetry** - detektory měřící energii částic.

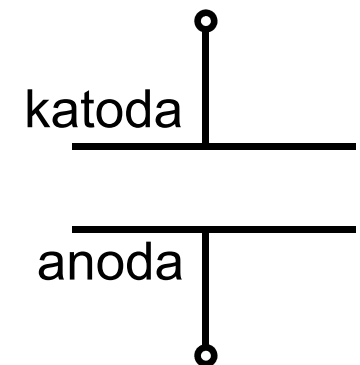
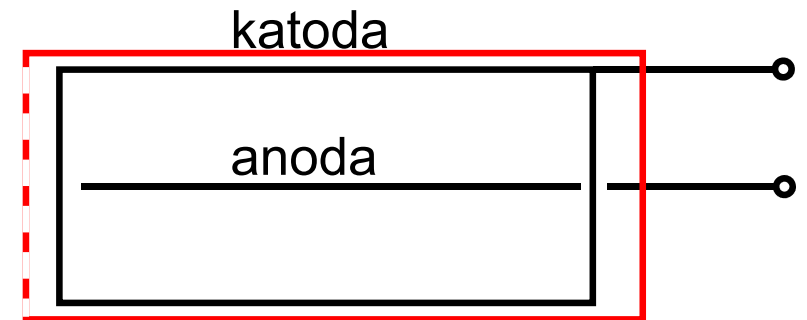
Plynové detektory

Detekce prošlého náboje (proudu) kondenzátorem v důsledku ionizace plynné náplně

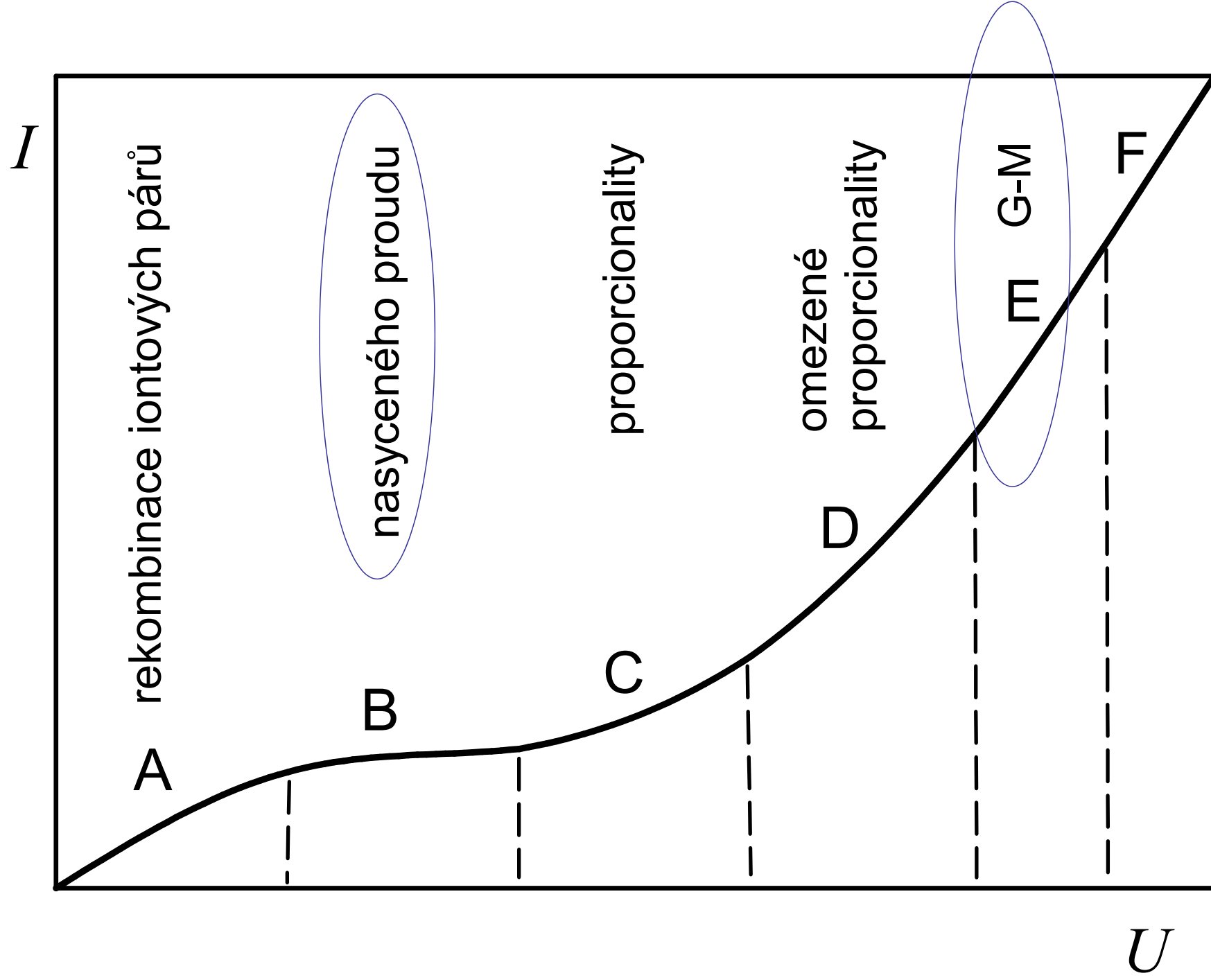
Charakteristiky detektoru závisejí na režimu plynového det. podle voltampérové charakteristiky

Oblasti:

- A) rekombinace iontových párů
- B) nasyceného proudu (ioniz. komory)
- C) proporcionality (proporc. det.)
- D) omezené proporcionality
- E) Geiger-Müllerova (G-M) detektory
- F) trvalý výboj (koronové detektory)

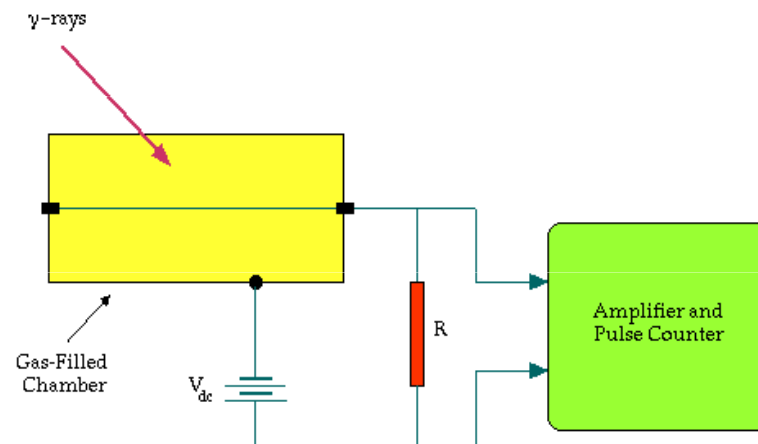


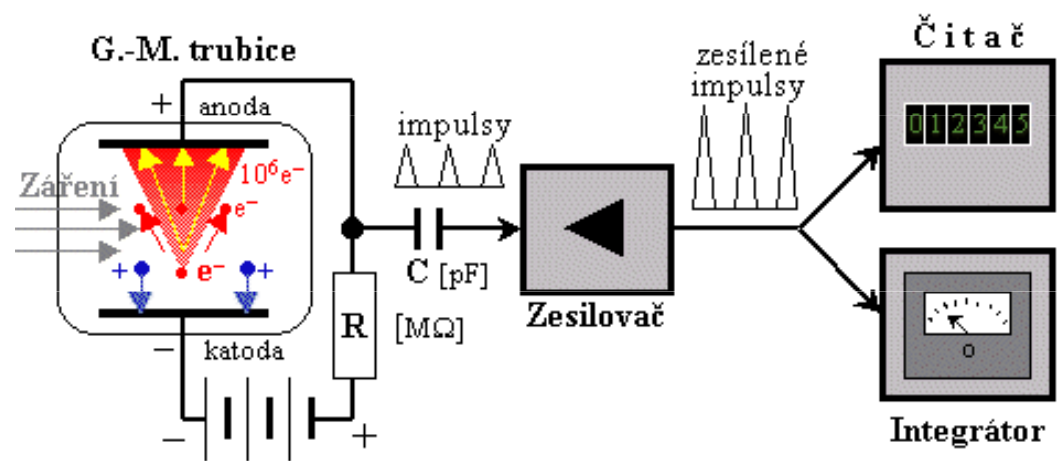
Plynové detektory



Ionizační komora

- Ionizační komora je tvořena kondenzátorem : 2 elektrodami umístěnými v plynném prostředí a připojenými do obvodu. Pracují v oblasti nasyceného proudu.
- Vnikne-li do prostoru mezi elektrodami ionizující záření, vyráží z původně neutrálních atomů plynu elektrony a mění je na kladné ionty. Obvodem začne protékat slabý elektrický proud způsobený iontovou vodivostí ionizovaného plynu mezi elektrodami. Proud, měřený mikroampérmetrem, je přímo úměrný intenzitě ionizujícího záření. Protože počet iontu závisí od hustoty ionizace, je možné rozlišit různé





Wilsonova mlžná komora

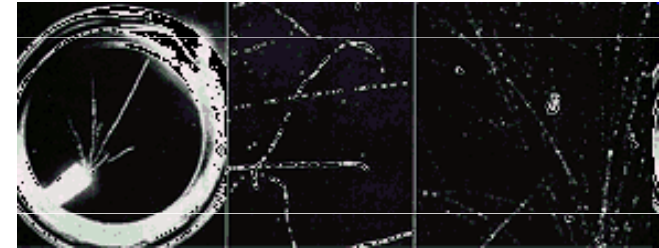
- Je-li třeba zaznamenat celou trajektorii částice a změřit energii a hybnost částice, používá se jaderná fotografická emulze nebo dráhové komory.
- Jednou z nejstarších je Wilsonova mlžná komora naplněná přehřátou párou. Proletí-li komorou ionizující částice, vytvoří vzniklé ionty kondenzační jádra, a na nich vzniknou malé viditelné kapičky kapaliny



Wilsonova mlžná komora

Konstrukce

Uzavřená komora s okny pro pozorování drah resp. fotografování, zaplněná plynem s příměsí nasycených par kapaliny, např. metylakoholu \Rightarrow rychlá adiabatická expanze \Rightarrow ochlazení plynu \Rightarrow přesycená pára \Rightarrow kondenzace na iontech

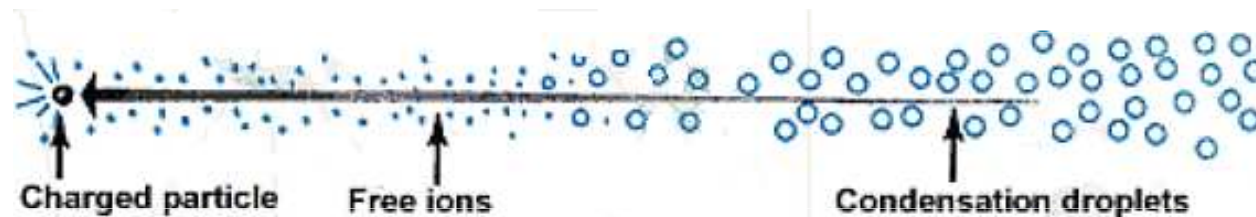


Pozorovat lze jen krátce po adiabatické expanzi

Tento nedostatek odstraňují difuzní mlžné komory – mezi dnem a vrškem objemu se udržuje tepelný gradient

Pomocí mlžné komory objevil r. 1932 Anderson první antičástici – pozitron (v kosmickém záření)

Komory se umisťují třeba do magnetického pole \Rightarrow náboj, hybnost částice



Scintilační detektory

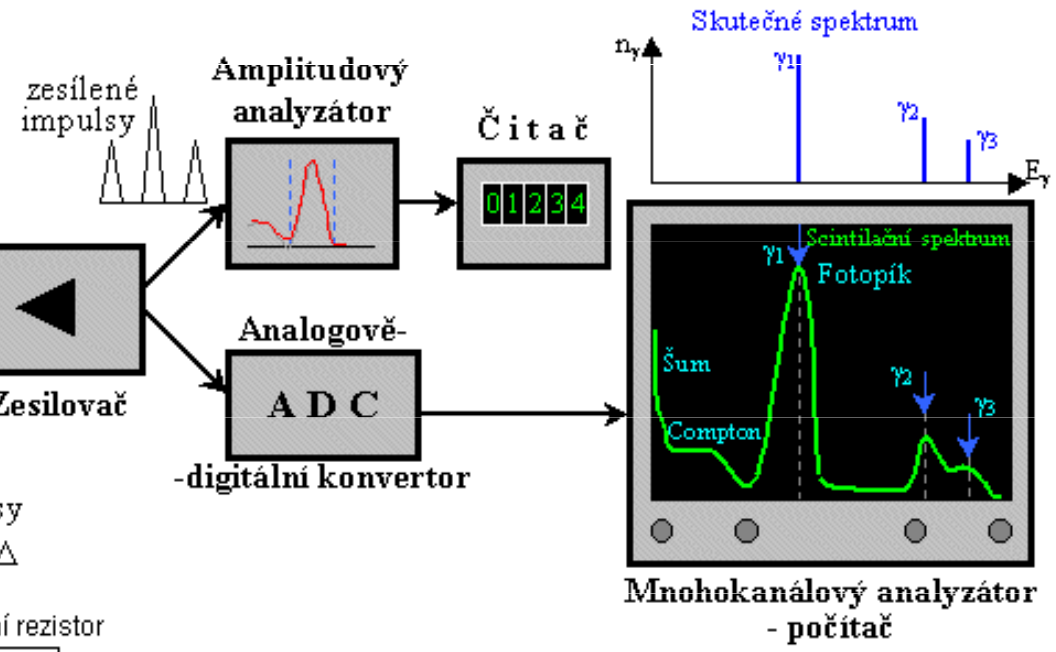
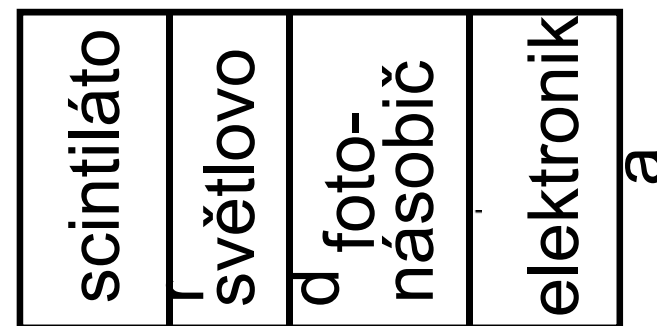
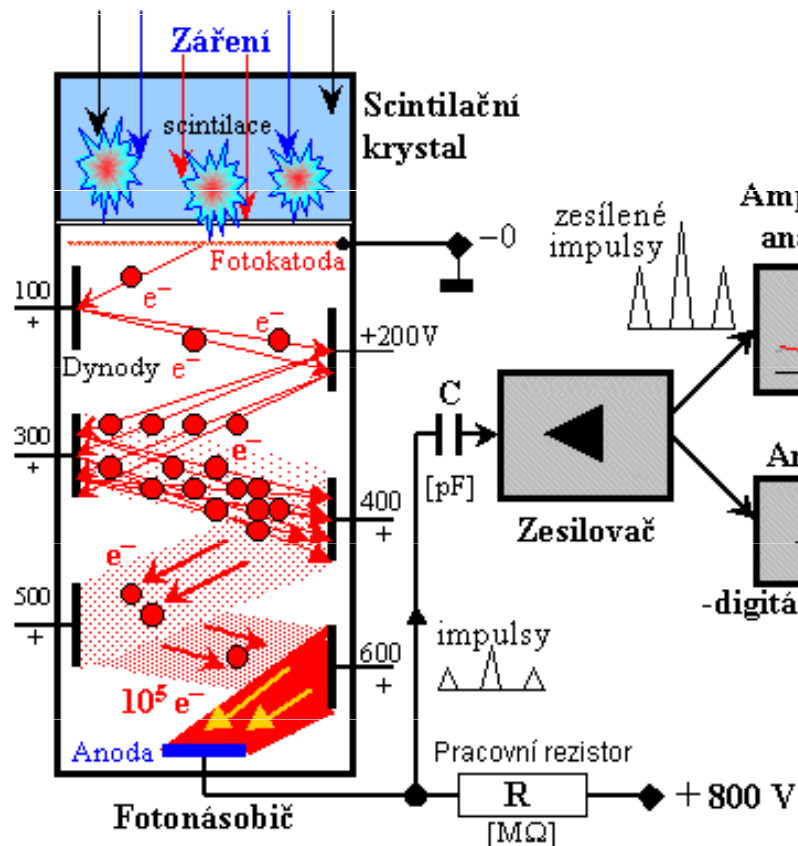
Vizuální pozorování záblesků, ZnS (Rutherford), dnes – automatická registrace záblesků (scintilací) přes fotonásobič

Scintilace = vznik fotonů v oblasti viditelného nebo UV světla při průchodu IZ (excitace a ionizace \Rightarrow návrat do zákl. ener. stavu \Rightarrow vyzáření fotonů)

Scintilátor

Organický, anorganický

Plynový, kapalný, pevný

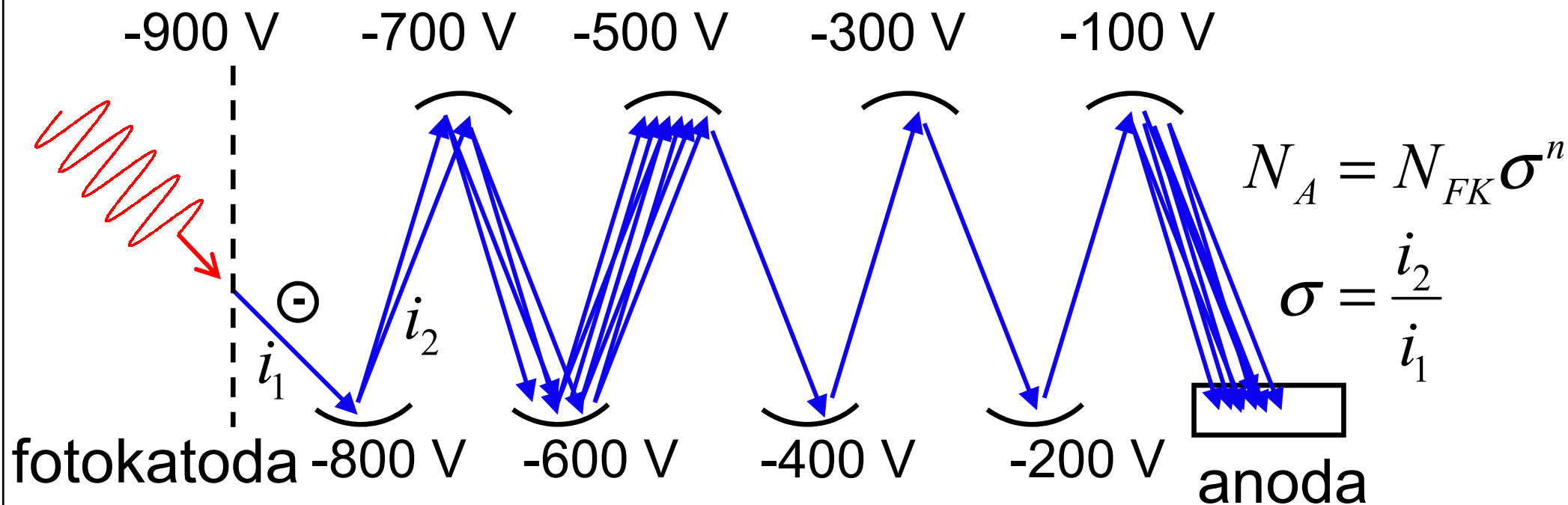


Scintilační detektory

Fotonásobič

Zesílení elektrického proudu uvolněním dalších elektronů opakovaným nárazem elektronu na dynody

Napěťový dělič



Modely atomového jádra

Jádro je kvantový systém nukleonů interagující hlavně silnou jadernou interakcí.

Teorie atomového jádra musí popsat:

- stavbu jádra (rozložení a charakteristiky jaderných hladin)
- vazebnou energii a jaderné reakce (dynamické vlastnosti jádra)

tři hlavní problémy:

1. Není znám přesný tvar sil působících mezi nukleony v jádře.
2. Rovnice popisující chování nukleonů v jádře jsou komplikované - problém matematického popisu.
3. Jádro má zároveň příliš mnoho nukleonů (nedá se popsat pohyb každé jeho částice) i příliš málo (nedá se popsat jako makroskopické spojitě prostředí).

Proto neexistuje úplná teorie atomového jádra - existují pouze modely.

<http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/prednasky/subatom/modely/osnova.html>

Základní charakteristiky jader

Složení atom.jádra lze vyjádřit pomocí 2 čísel, protonového Z , a nukleonového čísla A .

Atomy se stejným protonovým,ale různým nukleonovým číslem se nazývají **izotopy** (3 izotopy vodíku).

Protonová a nukleonová čísla mají význam pro stabilitu jader (stabilní jsou jádra, jejichž A i Z je sudé).

Hmotnost atomového jádra se uvádí pomocí hmotnostní jednotky

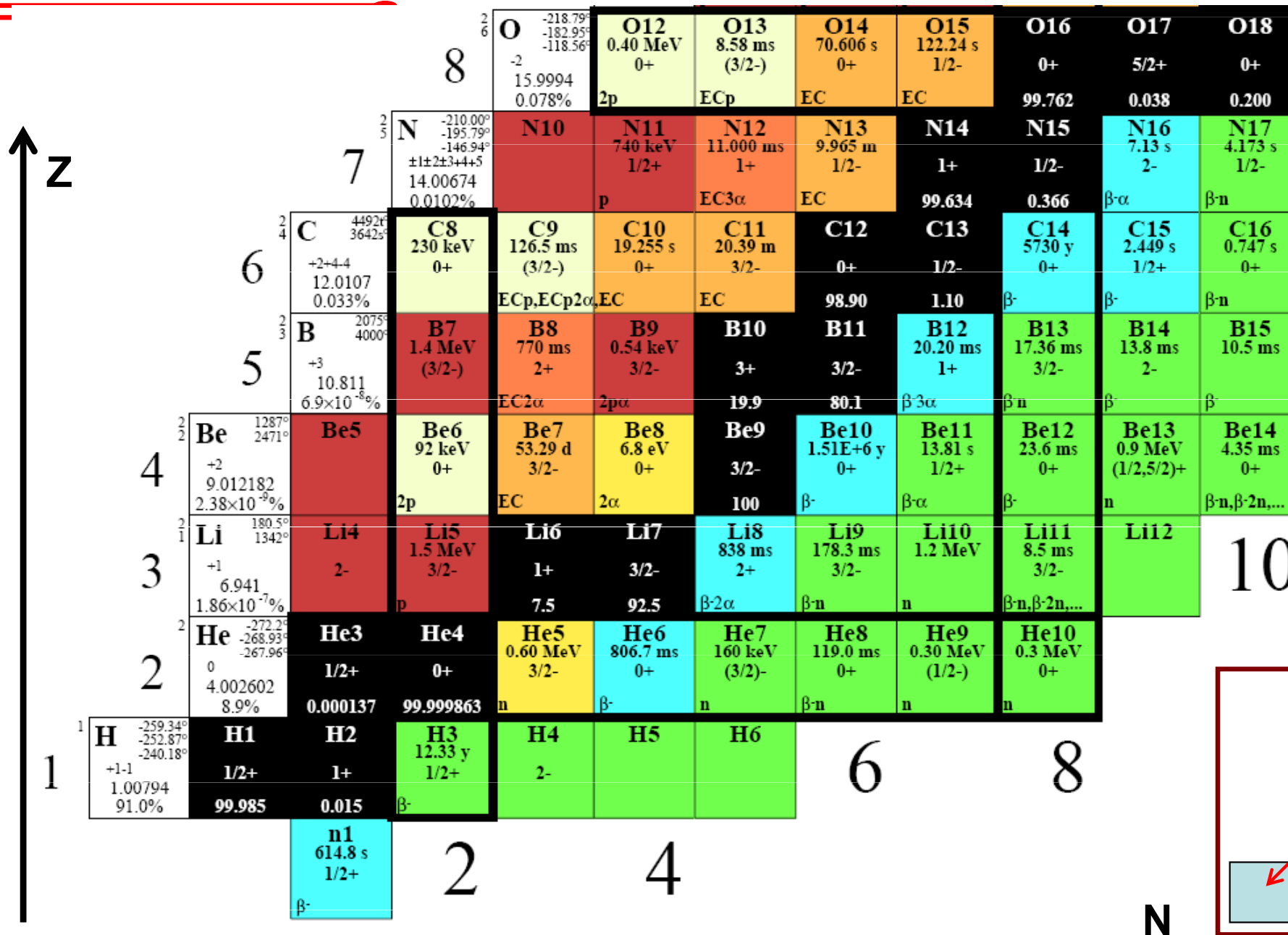
$$u = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \qquad 931,5 \text{ MeV}$$

Hmotnost jádra je dána vztahem

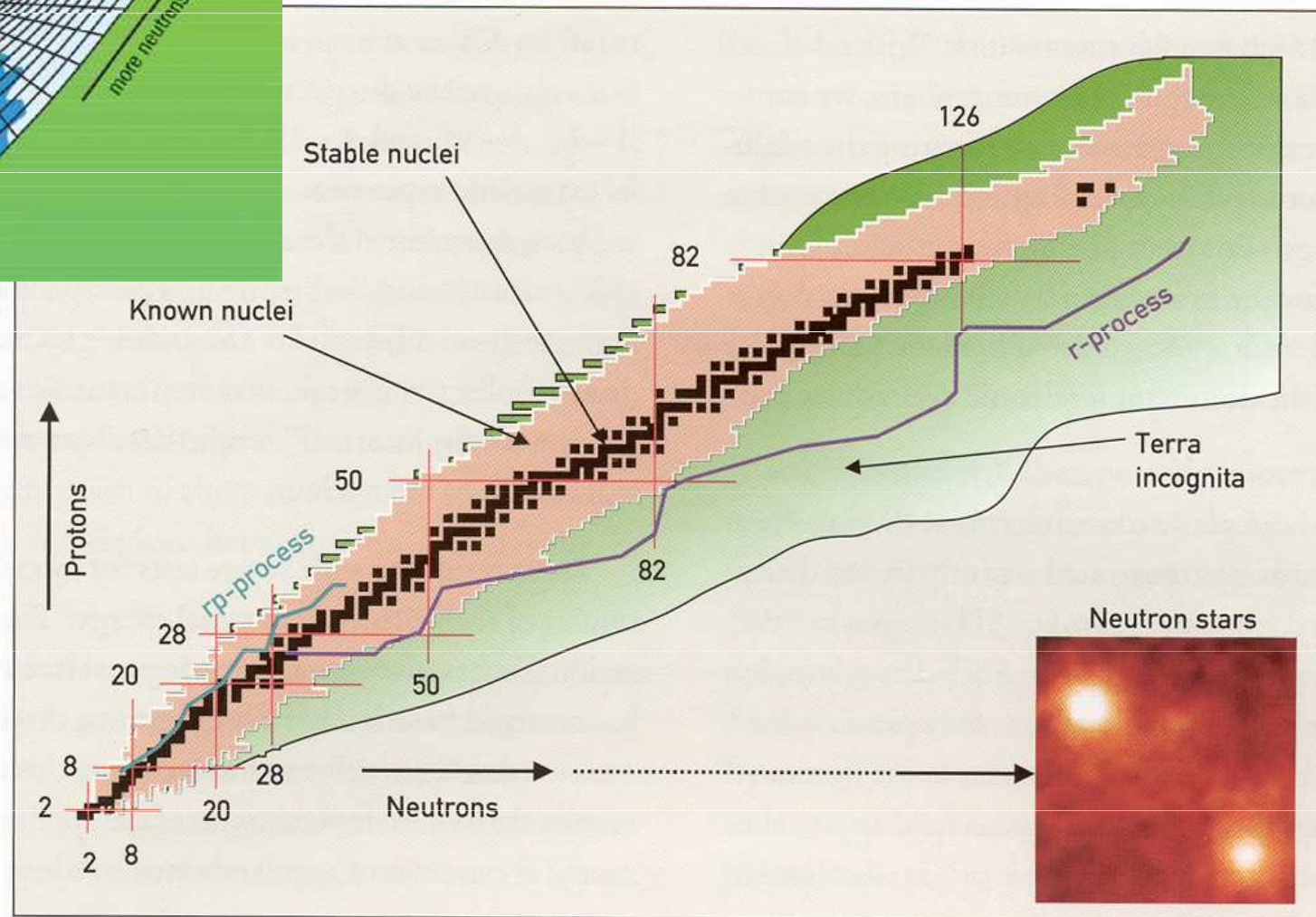
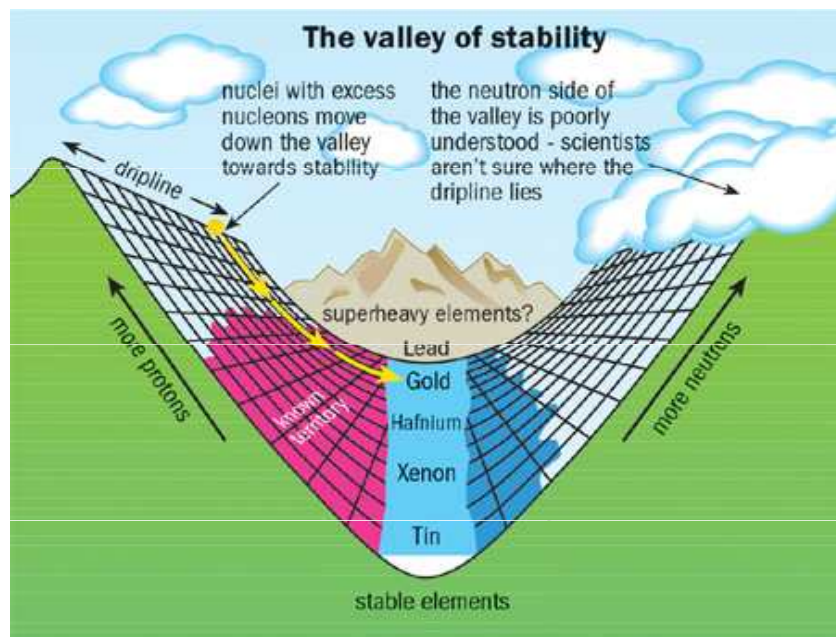
$$M(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n - B(A, Z).$$

Poslední člen,úměrný vazbové energii,říká,jak silně jsou nukleony v jádře vázány

Tabulka nuklidů

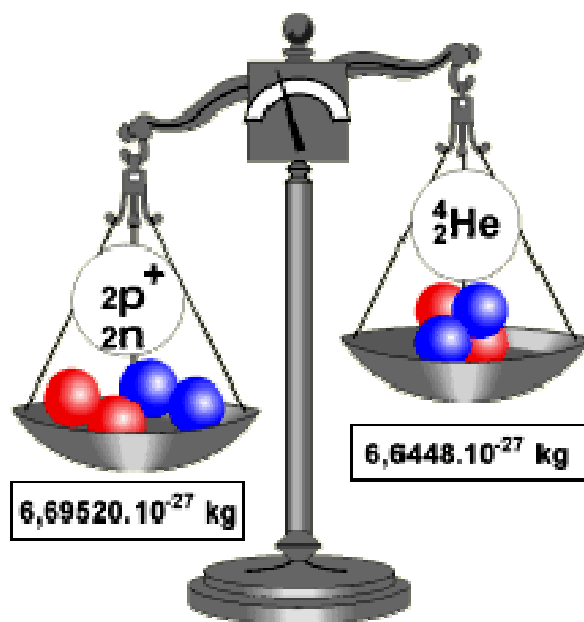


Tabulka nuklidů – údolí stability



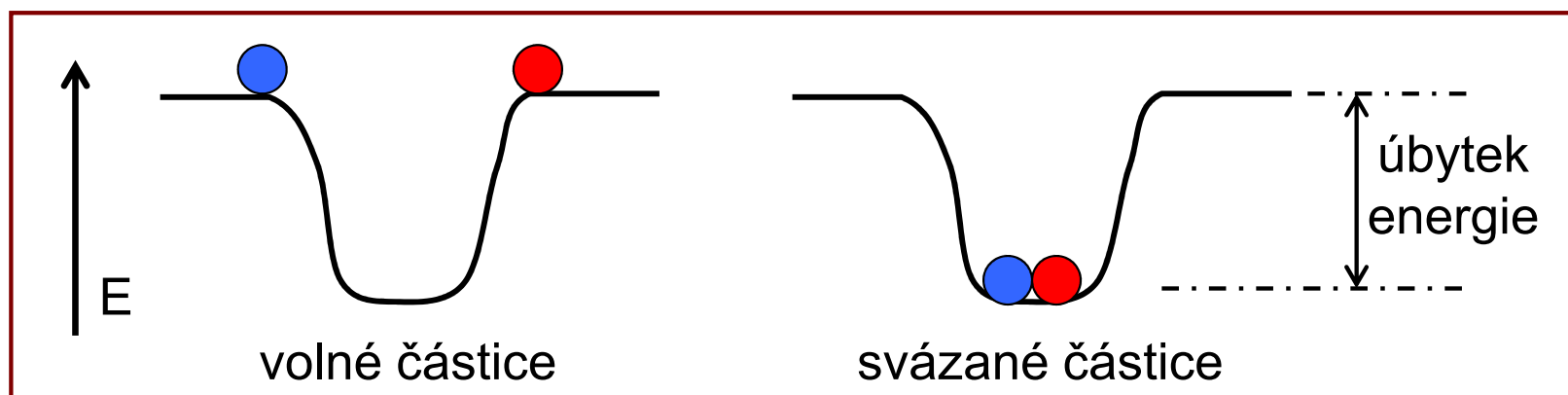
Hmotnost a vazebná energie jádra

Každá jednotlivá částice v jádře má svoji klidovou energii $E = m_0c^2$. Stejně tak má klidovou energii jádro. Tyto energie (a tedy hmotnosti) si ale nejsou rovny.



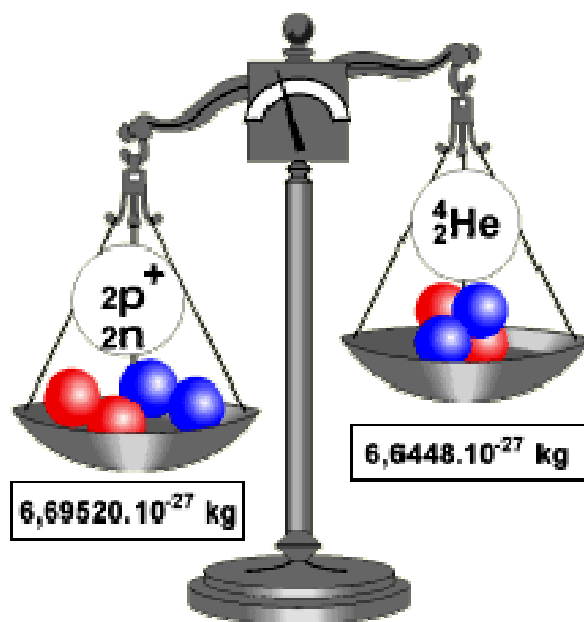
$$m_{\text{He}} < 2 \cdot m_n + 2 \cdot m_p$$

Úbytek hmotnosti je dán vazebnou energií – tedy energií, která byla uvolněna při „svázání“ částic jádra dohromady.



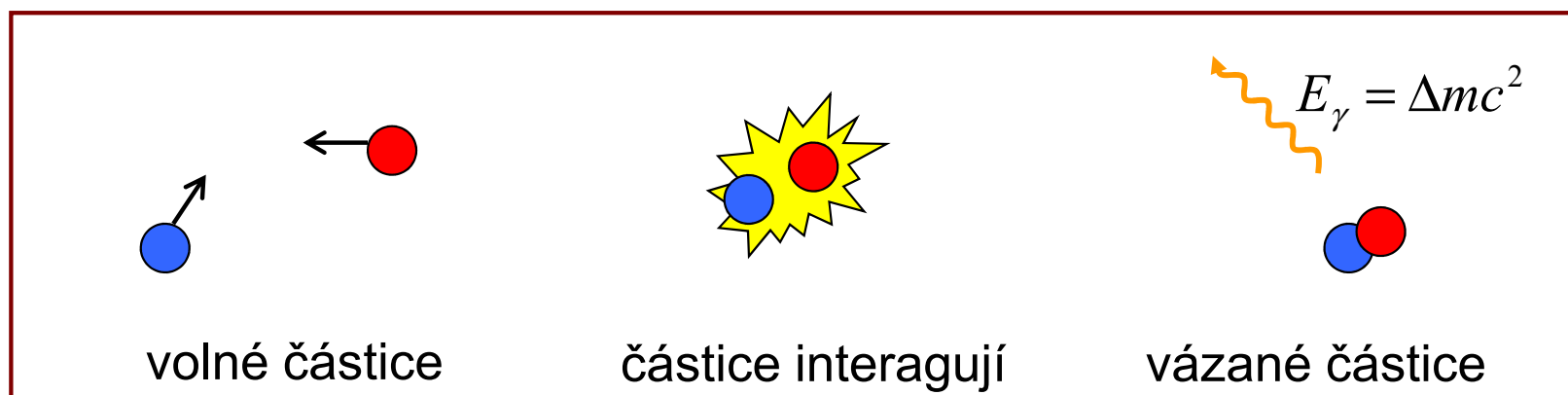
Hmotnost a vazebná energie jádra

Každá jednotlivá částice v jádře má svoji klidovou energii $E = m_0c^2$. Stejně tak má klidovou energii jádro. Tyto energie (a tedy hmotnosti) si ale nejsou rovny.



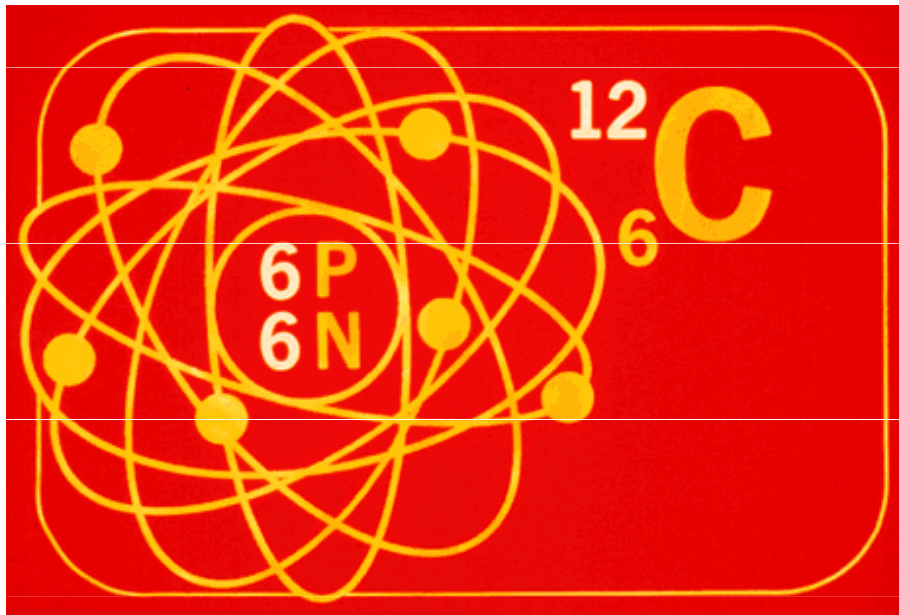
$$m_{\text{He}} < 2 \cdot m_n + 2 \cdot m_p$$

Úbytek hmotnosti je dán vazebnou energií – tedy energií, která byla uvolněna při „svázání“ částic jádra dohromady.



Hmotnost a vazebná energie jádra

Hmotnost atomu, hmotnost jádra a součet hmotností nukleonů se liší. Pro jednoduchost byla zavedena univerzální jednotka, založena na hmotnosti běžného izotopu uhlíku :



$$u = \frac{M({}_{6}^{12}\text{C})}{12}$$

$$u \doteq 931.481 \text{ MeV}c^{-2}$$

$$\doteq 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

relativní atomová hmotnostní jednotka

$$M\left({}_{Z}^{A}X\right) = m(Z, A) + Z \cdot m_e + \varepsilon_e \cdot c^{-2}$$

$$\varepsilon_e \quad ? \quad 0$$

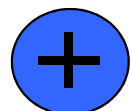
hmotnost jádra

hmotnost
elektronů

vazebná energie
elektronového
obalu

Hmotnost a vazebná energie jádra

V tabulkách jsou hmotnosti obvykle udávány v MeVc⁻² nebo v násobcích u – tzv. relativní hmotnosti :



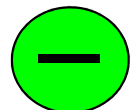
Proton

$$m_0 \doteq 938.27 \text{ MeV} \doteq 1.007\,276 \text{ } u$$



Neutron

$$m_0 \doteq 939.56 \text{ MeV} \doteq 1.008\,665 \text{ } u$$



Elektron

$$m_0 \doteq 0.511 \text{ MeV} \doteq 5.485\,899 \times 10^{-4} \text{ } u$$

$$m(Z, A) = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n + \varepsilon \cdot c^{-2}$$

hmotnost
protonů

hmotnost
neutronů

vazebná energie
jádra

$$\varepsilon = \left(m(Z, A) - Z \cdot m_p - (A - Z) \cdot m_n \right) \cdot c^2$$

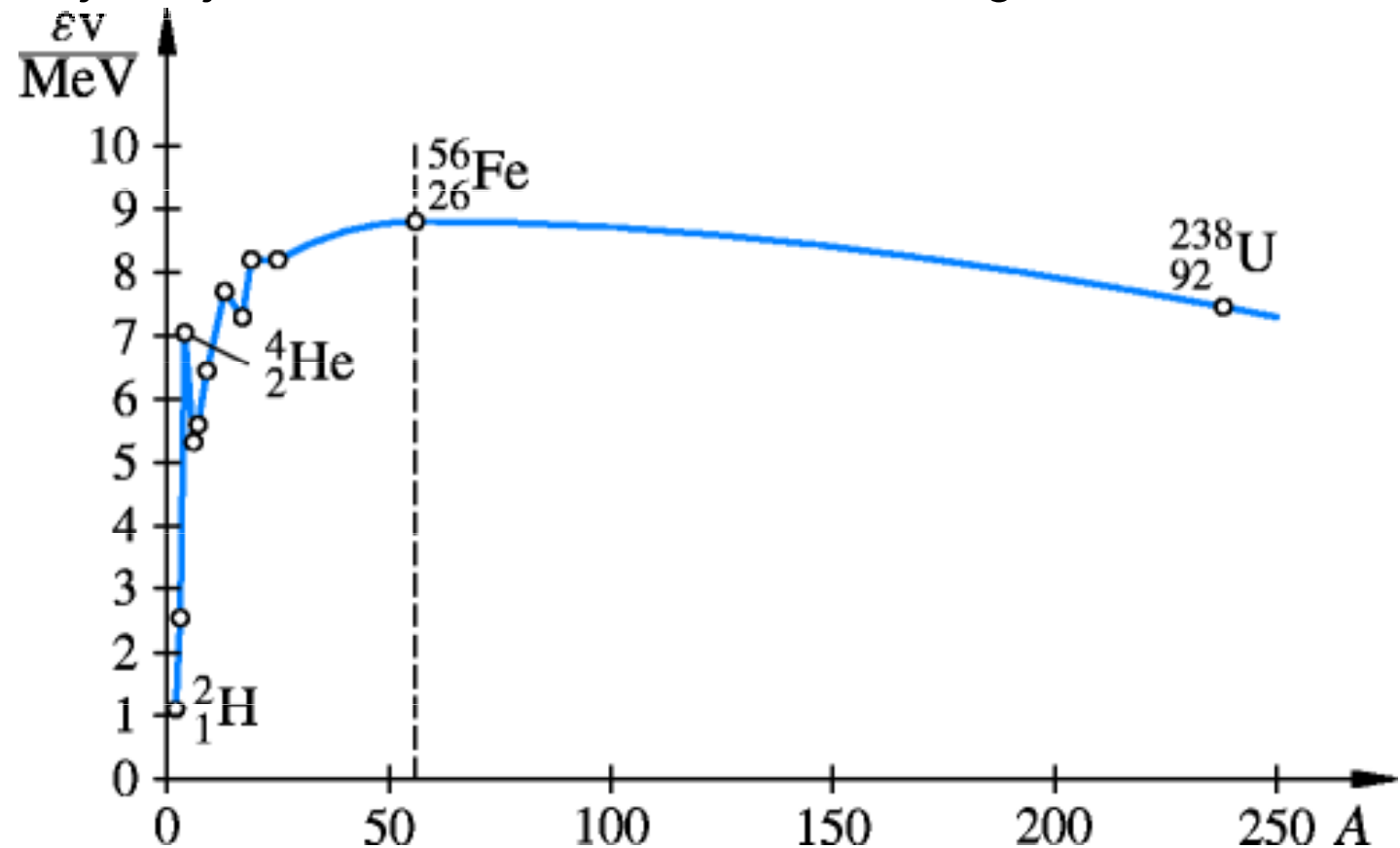
Vazebná energie jádra

Hmotnost a vazebná energie jádra

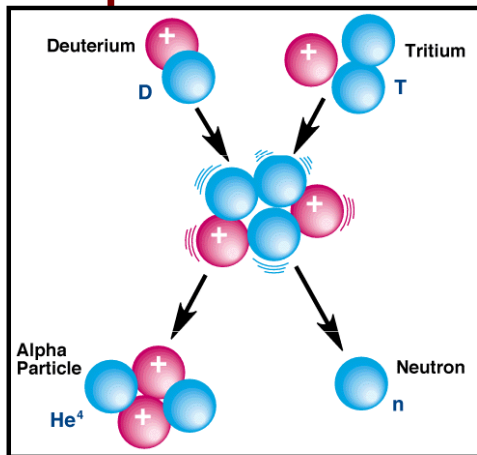
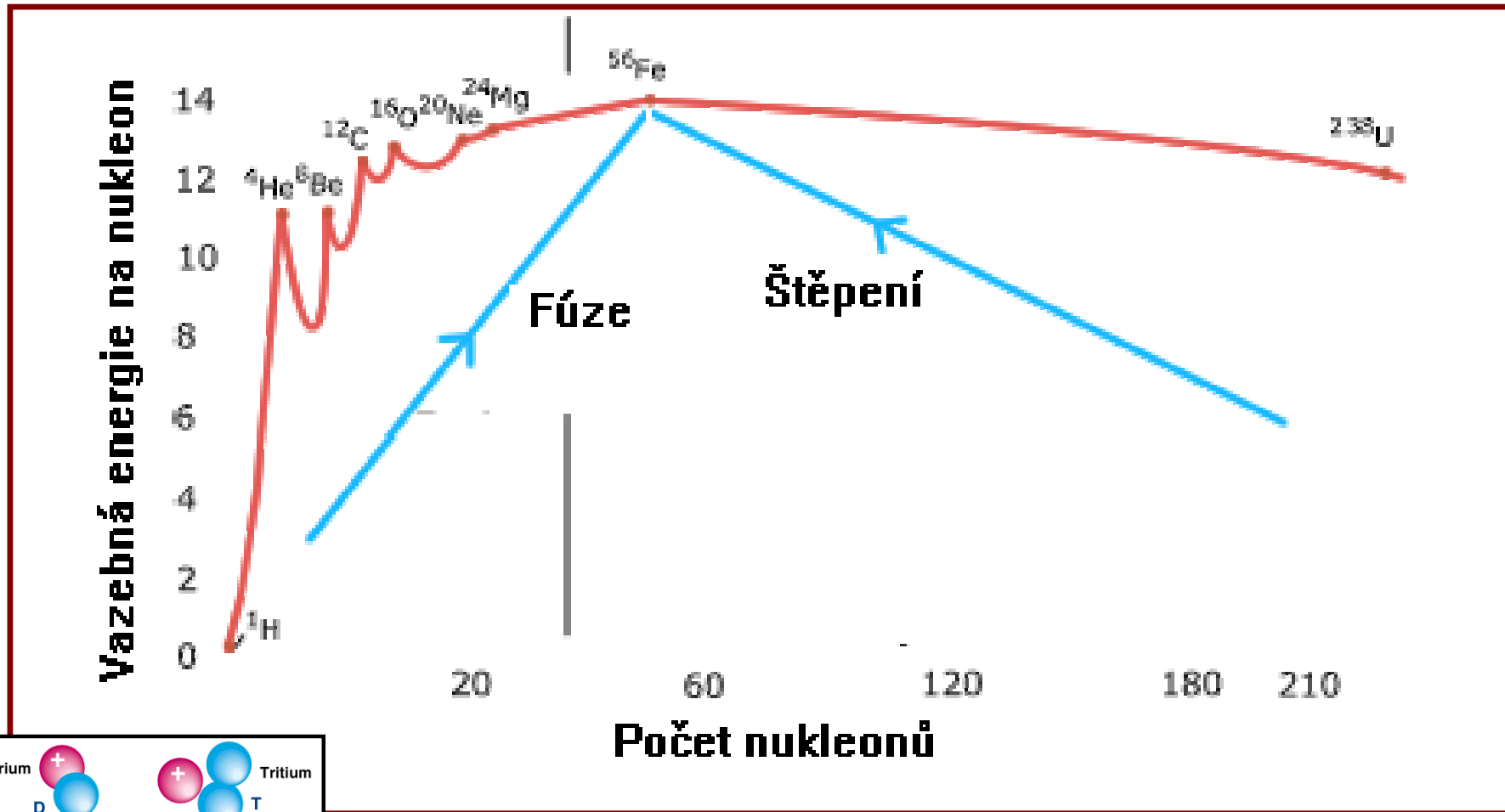
$$\varepsilon = \left(m(Z, A) - Z \cdot m_p - (A - Z) \cdot m_n \right) \cdot c^2$$

Vazebná energie jádra je až na znaménko rovna práci, kterou je potřeba vynaložit na rozsekání jádra na jednotlivé nukleony. Na toto je třeba práci vždy vynaložit! Jiná situace nastává, když rozsekáme jádro ne na nukleony, ale jen na několik menších částí, nebo když několik lehčích jader spojíme, pak můžeme práci i získat. Pro popis těchto jevů je dobré zavést ještě jednu veličinu, a to vazebnou energii na 1 nukleon:

$$\varepsilon_V = \frac{\varepsilon}{A}$$



Hmotnost a vazebná energie jádra



Fúze viz přednáška
Ing. Svobody
Energie z hvězd.



Jaderné štěpení



Všechny prvky od uranu výš se štěpí samovolně – rozpadají se na menší jádra. Systém má po rozpadu nižší energii než před ním, přebytek energie se vyzáří ve formě fotonů a předá se úlomkům jako kinetická energie. Pravděpodobnost štěpení můžeme výrazně zvýšit přidáním neutronu do jádra.



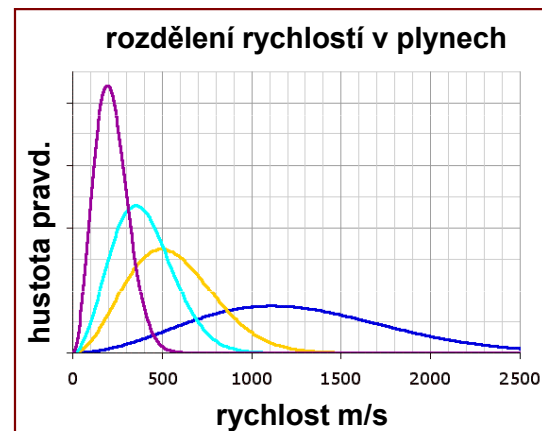
Základní, nejjednodušeji realizovatelná štěpná reakce. Vstupní neutron musí být pomalý, reakce pak má vysokou pravděpodobnost, že proběhne.

Stejně snadno probíhají štěpné reakce s izotopy ${}_{94}^{239} P$ a ${}_{92}^{233} U$, ty jsou však vzácné. Pro další štěpné reakce, například na ${}_{92}^{238} U$, je třeba použít rychlé neutrony a reakce jsou mnohem méně pravděpodobné.

Rychlé neutrony – energie > 1 eV

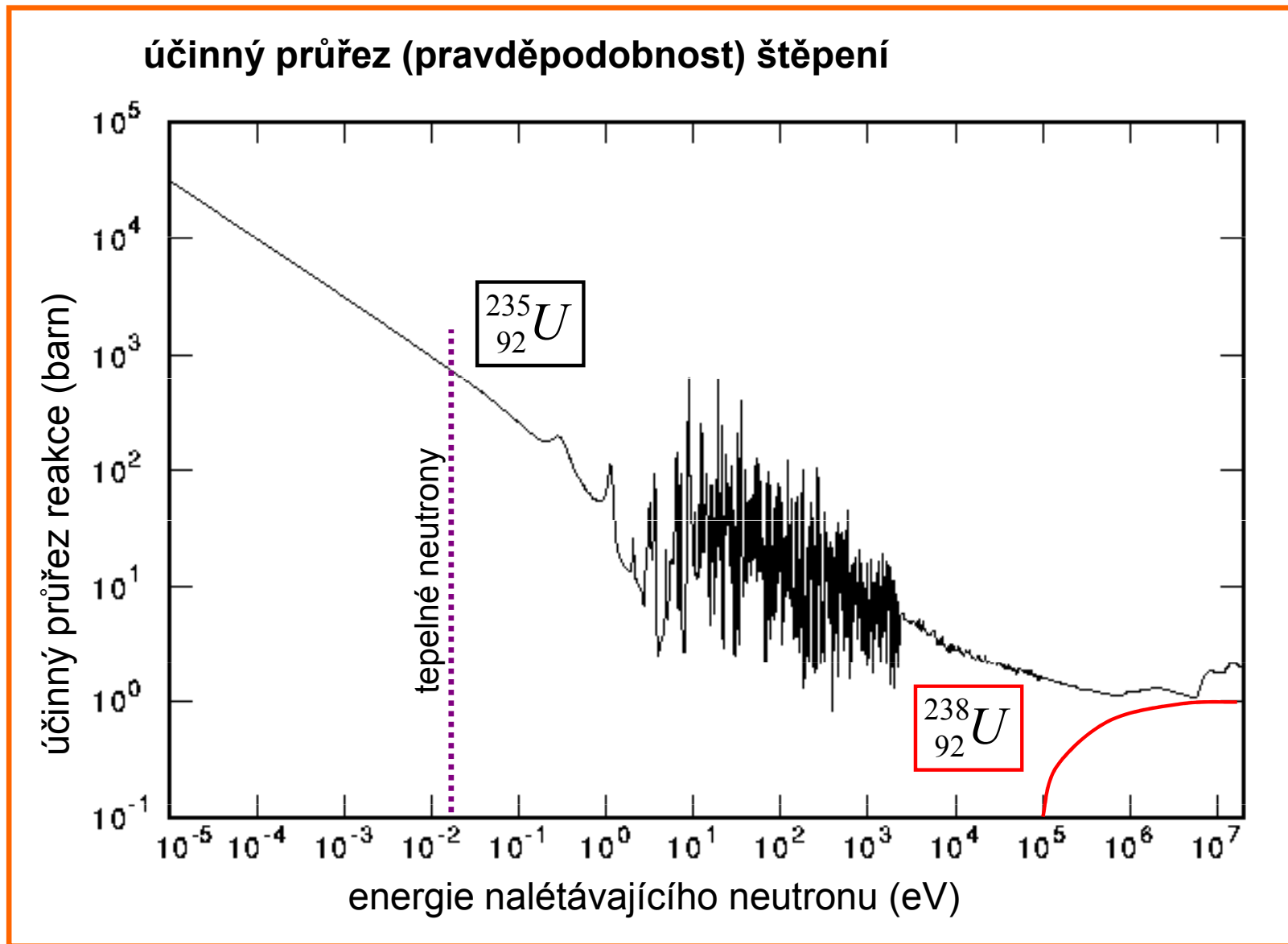
Pomalé neutrony – energie < 1 eV.

Tepelné neutrony – nejpravděpodobnější energie kolem 0.025 eV.



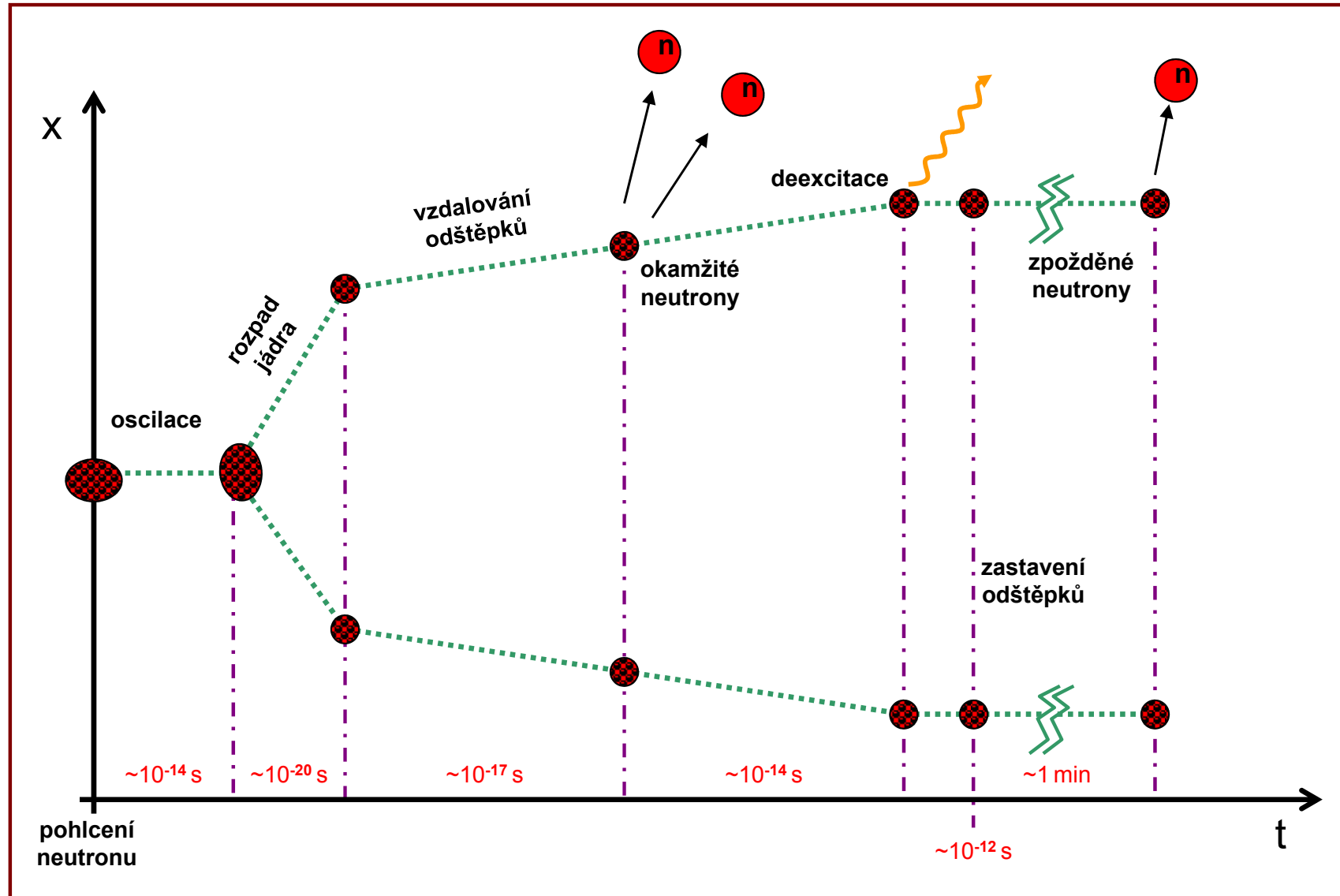
Rychlost, energie a teplota spolu souvisí přes tzv. Maxwell-Boltzmannovo rozdělení.

Jaderné štěpení



Štěpení běžnějšího uranu ${}^{238}\text{U}$ rychlými neutrony je technicky mnohem obtížnější než štěpení ${}^{235}\text{U}$.

Jaderné štěpení



časový diagram štěpné reakce

Jaderné štěpení

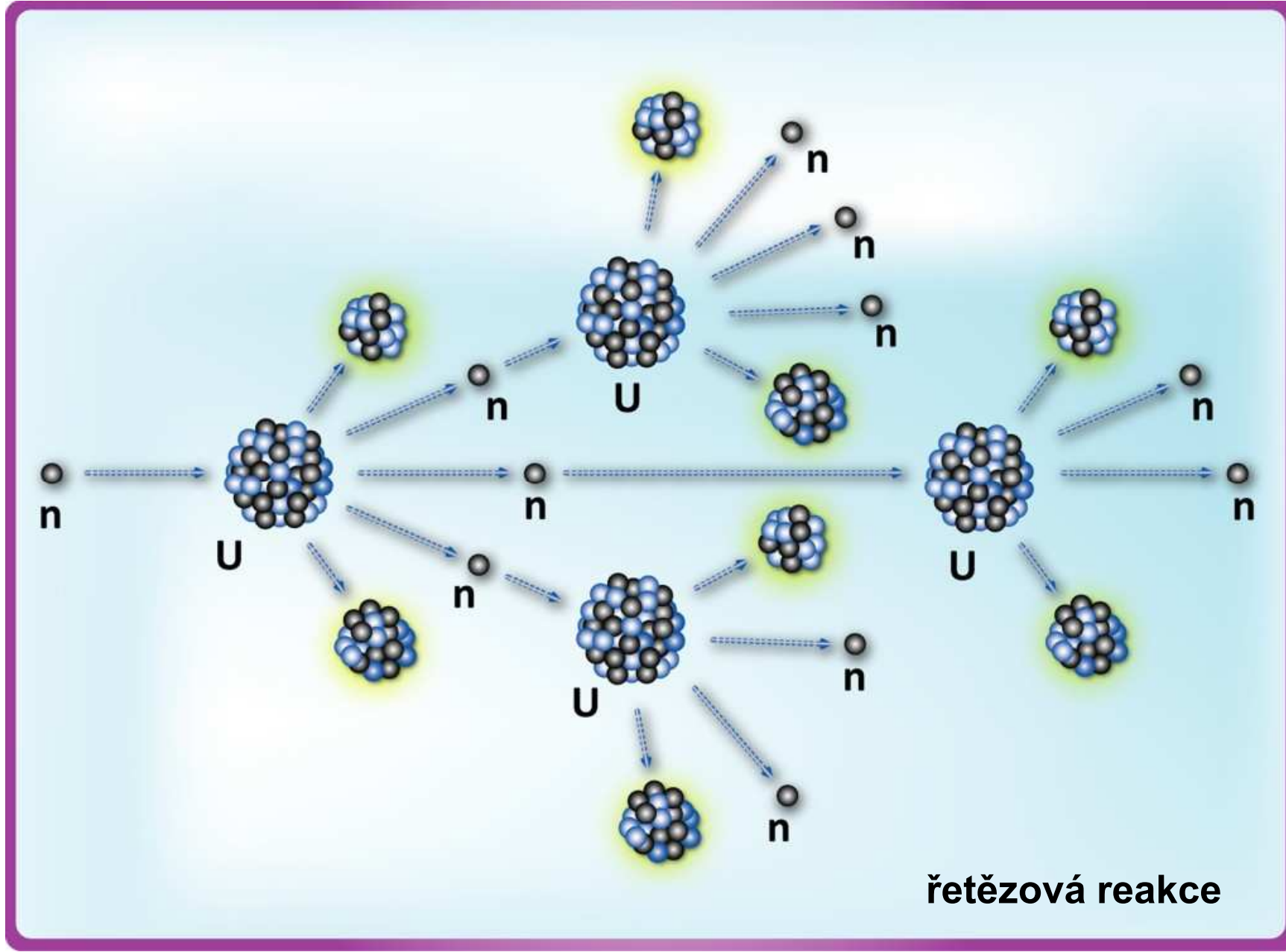


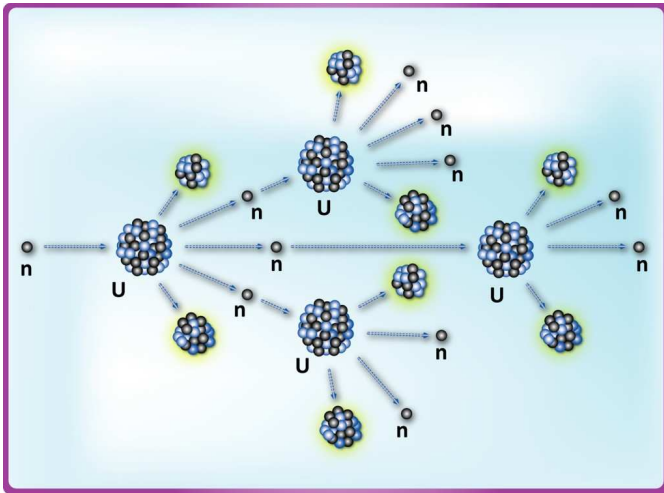
Schéma zobrazuje ideální případ. Ve skutečnosti se mnoho neutronů ztratí – uletí z reakční zóny nebo zinteraguje jiným způsobem.

Jaderné štěpení

Počet zužitkovaných neutronů pro další štěpení lze vyjádřit číslem:

$$\vartheta = P_{\text{palivo}} \cdot P_{\text{stepeni}} \cdot k - P_{\text{absorb}} - P_{\text{utek}}$$

kde P_{palivo} je pravděpodobnost, že emitovaný neutron zasáhne jádro uranu, P_{stepeni} pravděpodobnost, že v takovém případě dojde k štěpné reakci a k je průměrný počet neutronů emitovaných při jedné reakci (2 až 3). P_{absorb} je pak pravděpodobnost toho, že se neutron chytí v něčem jiném, než v palivu a P_{utek} je pravděpodobnost opuštění aktivní zóny.



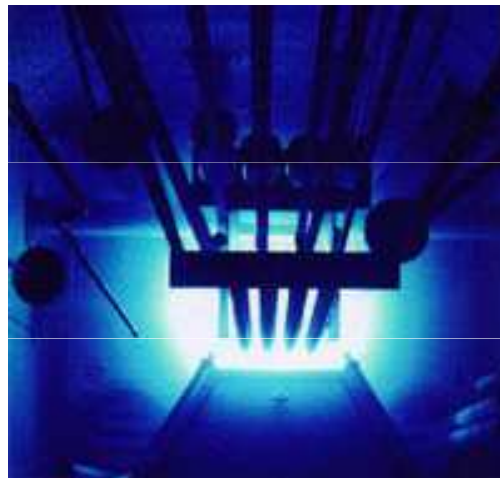
$$\vartheta < 0$$

podkritický stav – reakce má tendenci se zastavit



$$\vartheta = 0$$

kritický stav – reakce běží a lze ji kontrolovat

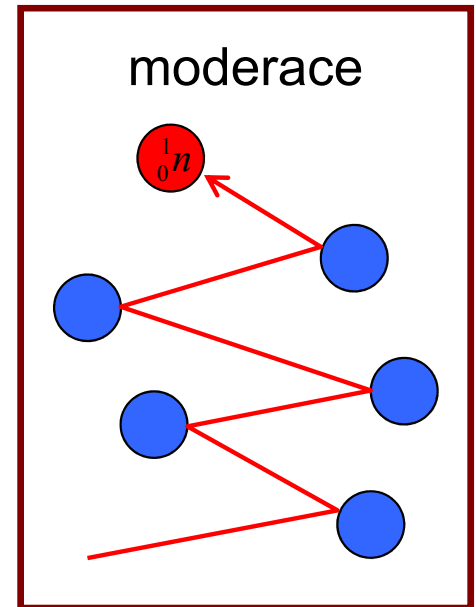
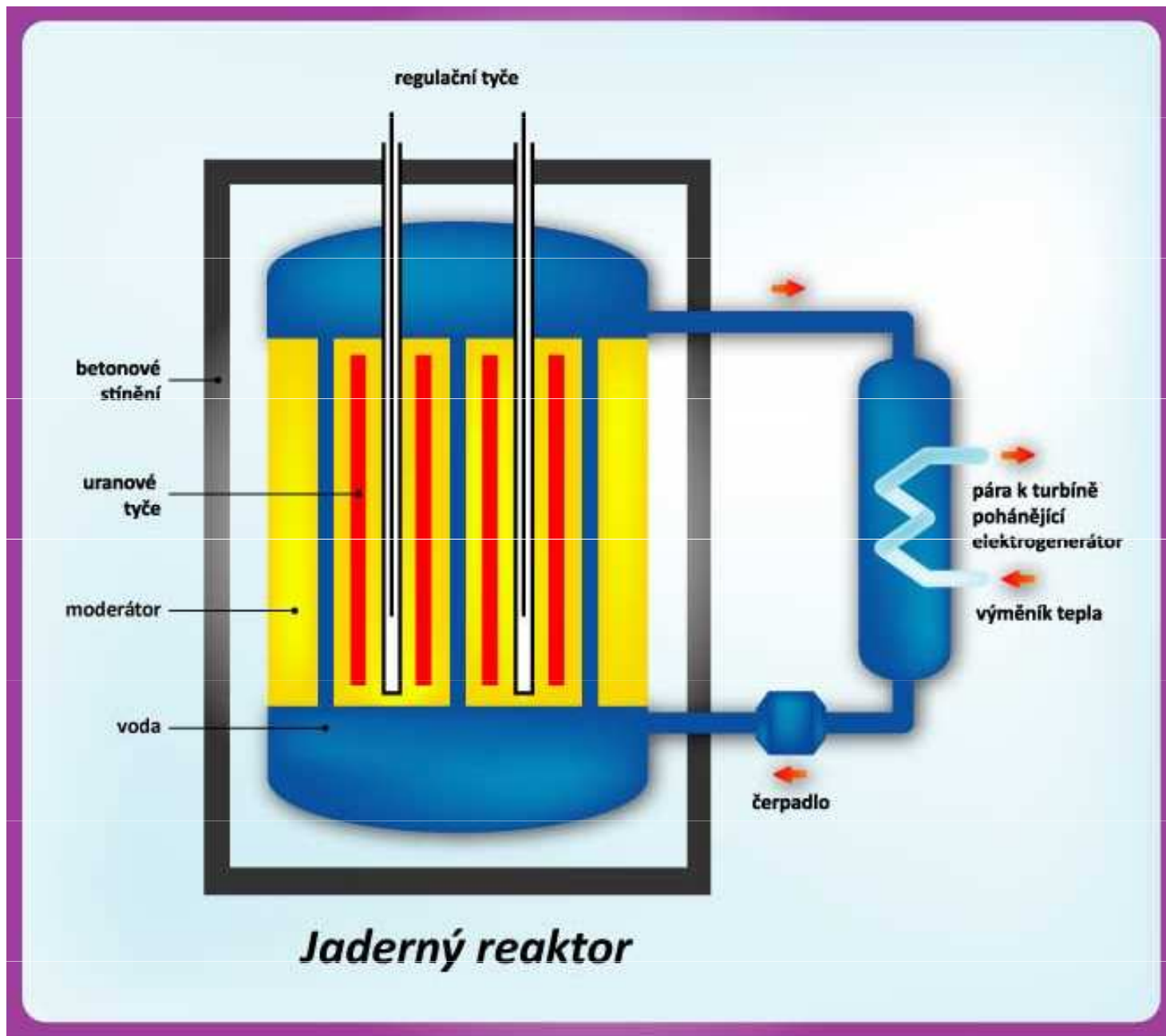


$$\vartheta > 0$$

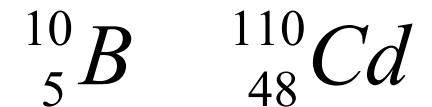
nadkritický stav – rychlost reakce exponenciálně vzrůstá



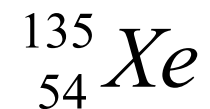
Jaderné štěpení



pohlcování neutronů



reaktorový jed



Jaderné reaktory v ČR



Školní reaktor FJFI ČVUT



Výzkumné reaktory LVR-15 a LVR-0 v ÚJV Řež

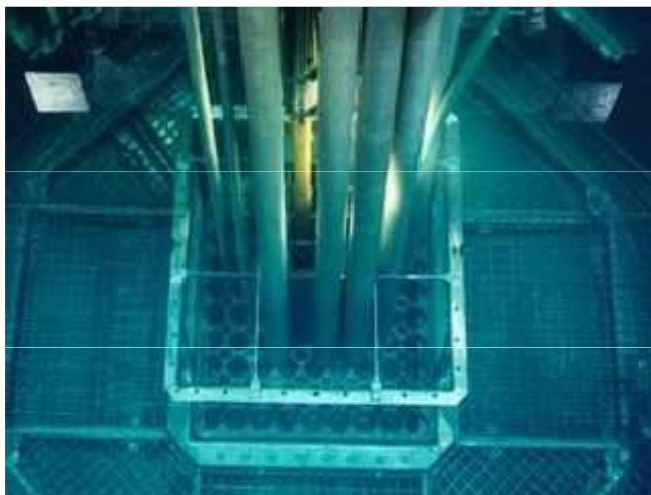


JE Temelín



JE Dukovany

Školní reaktor FJFI VR-1



Typ:	lehkovodní, bazénový
Nominální výkon:	1kW (tepelný), krátkodobě 5kW
Palivo:	Typ IRT-4M, obohacení do 20 % uranem 235
Rozměry nádob:	vnitřní průměr 2300 mm, výška 4720 mm, tloušťka stěny 15 mm
Stínění :	boční: demineralizovaná voda min. 850 mm + těžký beton 950 mm nad aktivní zónou: 3000 mm vrstva demineralizované vody
Provozovatel:	FJFI -katedra jaderných reaktorů

Shrnutí

- Starověký atomizmus, chemický atomizmus
- Objev elektronu
- Objev atomového jádra – Rutherfordův pokus
- Bohrův model atomu
- Řešení Schrödingerovy rovnice pro atom vodíku
- Zeemanův jev
- Spin
- Kvantová čísla, Pauliho vylučovací princip
- Objev neutronu
- Atomové jádro, tabulka nuklidů
- Hmotnost a vazebná energie
- Jaderné štěpení
- Náboj a hustota jádra
- Spin jádra, Stern-Gerlachův pokus
- Energetické hladiny jádra