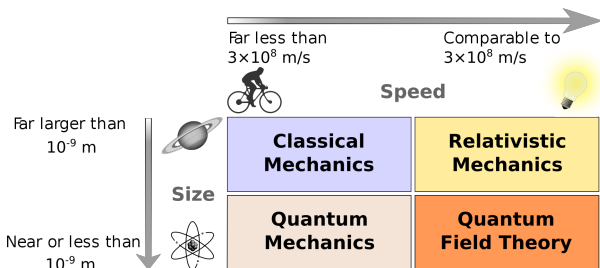


Základy moderní fyziky (rozšířená verze)

Zbyněk Fišer

Úvod – Co je moderní fyzika?

- *Není jednoduché přesně definovat pojem moderní fyziky, nejjednodušeji ji můžeme popsat takto: moderní fyzika je fyzika, která začala vznikat na začátku 20. století*
- Důvodem vzniku nové (moderní) fyziky byla neschopnost klasické fyziky popsat nově pozorované jevy
- Ve 20. století tak začala vznikat kvantová mechanika, *ale cesta k jejímu vytvoření a „pochopení“ byla složitá a dlouhá*
- Pod pojmem moderní fyzika je schována řada jednotlivých oblastí fyziky



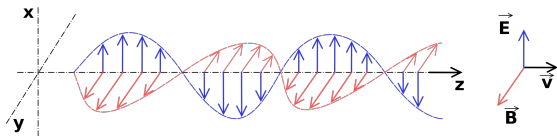
(zdroj: en.wikipedia.org)

Úvod – stručná historie klasické fyziky

- 17. století:
 - Klasická mechanika – I. Newton (Newtonovy pohybové zákony), G. Galilei (Galileův princip relativity)
 - M. Koperník, J. Kepler – heliocentrický model a pohyb planet
- 19. století:
 - Elektrodynamika – A.-M. Ampère, M. Faraday, J. C. Maxwell, H. R. Hertz
 - 1865 – Maxwell popsal elektromagnetické pole a ukázal, že se změny elektromagnetického pole šíří v podobě elektromagnetického vlnění rychlostí c
 - 1888 – Hertz experimentálně potvrdil existenci elektromagnetické vlny, jedná se o světlo ⇒ **spojení elektrodynamiky a optiky**



James Clerk Maxwell (zdroj: en.wikipedia.org)



elektromagnetické vlnění (zdroj: en.wikipedia.org)

Historie povahy světla

- Nebylo zřejmé, zdali má světlo částicovou nebo vlnovou podstatu
- Částicovou podstatu světla zastával I. Newton a vlnovou Ch. Huygens (Huygensův princip)
- Na začátku 19. století provedl T. Young dvojitěrbínový experiment s interferencí světla a dokázal jeho vlnovou povahu (tuto teorii poté rozšířil A.-J. Fresnel)
- Světlo bylo reprezentováno jako kmitání éteru
- V roce 1881 (1886) A. A. Michelson pomocí svého interferometru ukázal, že pro světlo neplatí klasické skládání rychlostí a že éter neexistuje
- V téže době dochází ke spojení elektrodynamiky a optiky

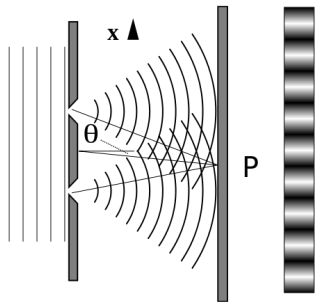
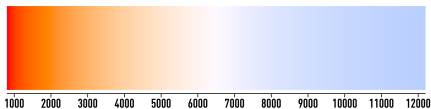


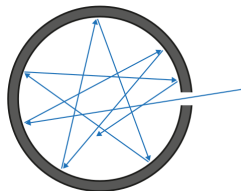
schéma Youngova experimentu (zdroj: en.wikipedia.org)

Historie povahy světla – záření černého tělesa

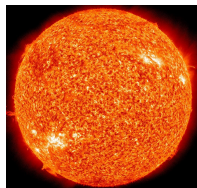
- Záření se při dopadu na těleso může absorbovat, odrazit nebo rozptýlit
- Při absorpci roste teplota tělesa a pomocí vyzařování se těleso zbavuje přebytečné energie
- V 19. století se zkoumalo rovnovážné tepelné vyzařování (těleso je v rovnováze s okolím, co absorbuje, vyzařuje)
- Model černého tělesa = dokonalý absorbér (nic neodráží)
- Má-li černé těleso určitou teplotu, tak vyzařuje do okolí elektromagnetické záření



závislost barvy černého tělesa na teplotě (zdroj: en.wikipedia.org)



model černého tělesa (zdroj: en.wikipedia.org)



Slunce je černým tělesem s povrchovou teplotou okolo 6000 K (zdroj: cs.wikipedia.org)

Historie povahy světla – záření černého tělesa

- Byla známa následující fakta o záření černého tělesa:
 - S rostoucí teplotou roste celková intenzita vyzářeného záření
 - S rostoucí teplotou se maximum intenzity posouvá k menším vlnovým délkám

- Stefanův-Boltzmannův zákon:

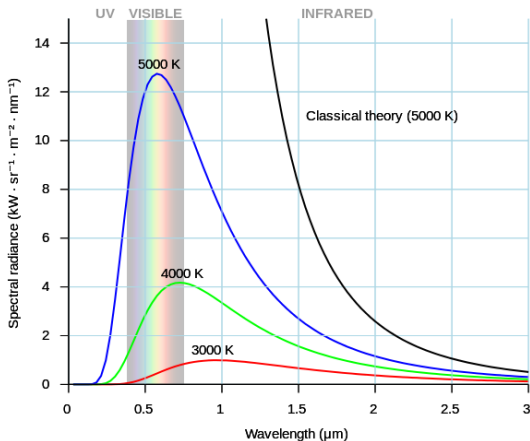
$$U = \sigma T^4$$

- U je celková intenzita záření a σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta

- Wienův posunovací zákon:

$$\lambda_{\max} = \frac{\text{konst.}}{T}$$

- λ_{\max} je vlnová délka, které odpovídá maximum vyzařované intenzity



závislost intenzity záření černého tělesa na vlnové délce
(zdroj: en.wikipedia.org)

Historie povahy světla – vznik kvantové hypotézy

- Z experimentů byl znám průběh funkce rovnovážného tepelného záření v závislosti na λ a T
- Klasická fyzika však nebyla schopná tuto závislost popsat
- **Prosinec 1900 – M. Planck** odvodil vztah pro vyzařovací zákon, který se shodoval s experimenty, ale energii tepelného záření musel **kvantovat**
- Záření může být absorbováno a emitováno pouze po určitých kvantech energie E (fotony), které závisí na frekvenci záření f

$$E = hf$$

- h je Planckova konstanta a má hodnotu $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s
- Max Planck bývá považován za otce kvantové fyziky
- Planckův vyzařovací zákon:

$$\rho(f, T) = \frac{8\pi f^2}{c^3} \cdot \frac{hf}{\exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right) - 1}$$



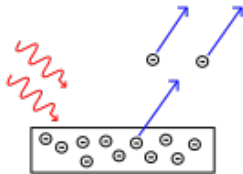
Max Planck (zdroj: en.wikipedia.org)

Historie povahy světla – fotoelektrický jev

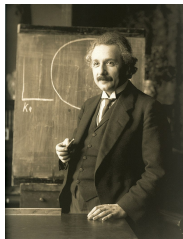
- Fotoelektrický jev objevil H. Hertz během ověřování Maxwellovy teorie
- Fotoelektrický jev souvisí s emisí elektronů z povrchu kovů způsobenou dopadem elektromagnetického záření (povrch kovu se nabíjí kladně)
- Klasická fyzika nedokázala fotoelektrický jev vysvětlit
- 1905 – A. Einstein vysvětlil na základě kvantové (částicové) teorie světla fotoelektrický jev

$$E_k = hf - A$$

- E_k je kinetická energie emitovaných elektronů, f je frekvence dopadajícího záření a A je výstupní práce (energie, kterou musíme elektronům v kovu dodat, aby kov opustily)



fotoefekt (zdroj:
en.wikipedia.org)



Albert Einstein (zdroj:
en.wikipedia.org)

- Kinetickou energii elektronů je možné určit pomocí brzdného napětí U

$$E_k = eU$$

Historie povahy světla – Comptonův jev

- 1917 – A. H. Compton experimentoval s rozptylem rentgenového záření a zjistil, že v rozptýleném záření pozoruje mimo původní vlnovou délku λ ještě vlnovou délku λ' , pro kterou platilo $\lambda' < \lambda$
- Tento jev opět nedokázala klasická fyzika uspokojivě popsat
- Zjistilo se, že fotony o frekvenci f se chovají jako částice s hybností p

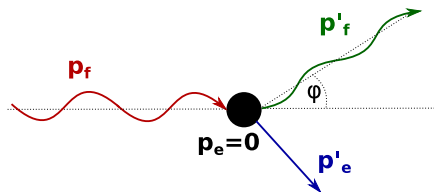
$$p = \frac{hf}{c}$$

- Comptonův jev je rozptyl rtg fotonu na volném elektronu o hmotnosti m_e (foton při interakci předá část svojí hybnosti volnému elektronu)
- Ze ZZE a ZZH lze odvodit vztah pro $\Delta\lambda$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \phi)$$

- Comptonova vlnová délka λ_C

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 2,34 \text{ pm}$$



Historie povahy světla – dualismus vlna-částice

- **1923** – **L. de Broglie** přišel s **dualismem vlna-částice**, s každou částicí mající hybnost p je spojena vlna o vlnové délce λ (tzv. hmotnostní vlny)

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

- Tato teorie platí pro všechny objekty mající hybnost, ale jelikož objekty našeho světa (makrosvětla) mají velkou hmotnost a hodnota Planckovy konstanty je velmi malá, tak jejich vlnová délka je neuvěřitelně malá (neměřitelná)
- V roce 1926 byla de Broglieho hypotéza experimentálně potvrzena pomocí pozorované difrakce elektronů



Louis de Broglie (zdroj: en.wikipedia.org)

objekt : $E = \frac{p^2}{2m} = \frac{1}{2}mv^2$

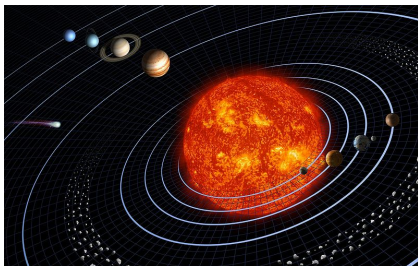
$$p = mv$$

foton : $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$

$$p = \frac{hf}{c}$$

Historie stavby hmoty – historický úvod

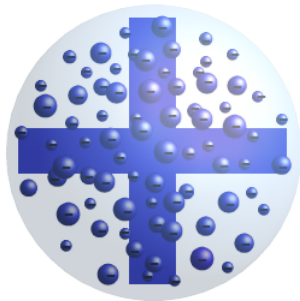
- 19. století:
 - Dalton přišel s atomovou teorií (Brownův pohyb)
 - 1896 – objev radioaktivity (souvisí se stavbou atomu)
 - 1897 – J. J. Thompson objevil elektron
- Na začátku 20. století se začala řešit struktura atomů na základě známých věcí a vzniklo několik modelů atomů:
 - planetární model (1901 – J. B. Perrin, nestabilní model)
 - dynamidový model (1903 – P. Lenard)
 - model Saturnu (1904 – H. Nagaoka, nestabilní model)
- Všechny modely atomů vycházely z předpokladu, že se skládají z určitého počtu elektronů a těžkého kladně nabitého „závaží“ (atomy jsou celkově neutrální)



planetární model vycházel ze Sluneční soustavy (zdroj: en.wikipedia.org)

Historie stavby hmoty – Pudingový model

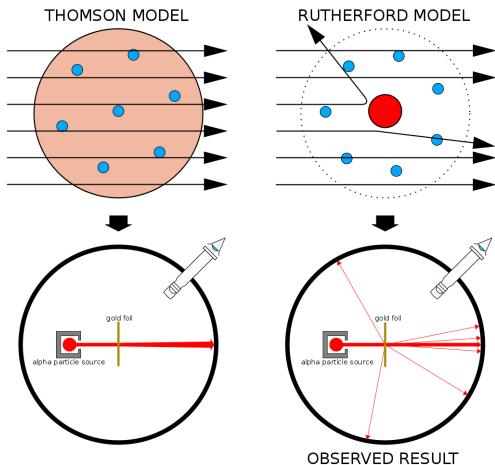
- Autorem pudingového modelu byl J. J. Thomson (1904)
- Pudingový model předpokládal, že elektrony jsou volně rozmístěné v kladně nabitém žele, které vyplňuje celý atom
- Pudingový model se zdál být správný, jelikož měl být stabilní
- Správnost tohoto modelu bylo nutné experimentálně ověřit



pudingový model atomu (zdroj:
en.wikipedia.org)

Historie stavby hmoty – rozptylové experimenty

- Mezi lety 1906-1911 prováděl E. Rutherford rozptylové experimenty s alfa-částicemi na tenké zlaté fólii
- Cílem bylo dokázat pudingový model atomu (malý rozptyl)
- Výsledky rozptylových experimentů vyvrátily pudingový model atomu
- Výsledky experimentů – **kladný náboj se nachází v malé oblasti uprostřed atomu a je zde také soustředěna téměř celá hmotnost atomu**
- Vznikl jaderný model atomu (neřeší elektrony)



modely atomů a odpovídající výsledky rozptylových experimentů (zdroj: en.wikipedia.org)

Historie stavby hmoty – Bohrův model atomu

- **1913 – N. Bohr** přišel s novým modelem atomu vodíku založeném na 2 postulátech
 - elektron se může dlouhodobě nacházet jen v určitých stavech (kvantování momentu hybnosti)
 - přechod mezi těmito stavy je realizován emisí/absorpcí kvanta energie (fotonu)
- Základem Bohrova modelu atomu je kvantovací podmínka pro moment hybnosti elektronu l

$$l = \hbar n \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

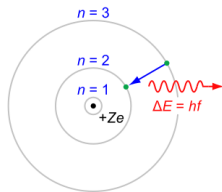
- Tento model předpokládá pohyb v rovině
- S použitím klasické fyziky lze získat vztah pro poloměr kruhové dráhy elektronu

$$r_n = a_0 n^2 \quad a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m} = 0,53 \text{ \AA} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

- a_0 je Bohrův poloměr



Niels Bohr (zdroj: en.wikipedia.org)



Bohrův model atomu vodíku (zdroj: en.wikipedia.org) 14 / 30

Historie stavby hmoty – Bohrov model atomu

- V Bohrově modelu má elektron na dané hladině (na daném r_n) energii E_n , která je dána kinetickou a potenciální energií

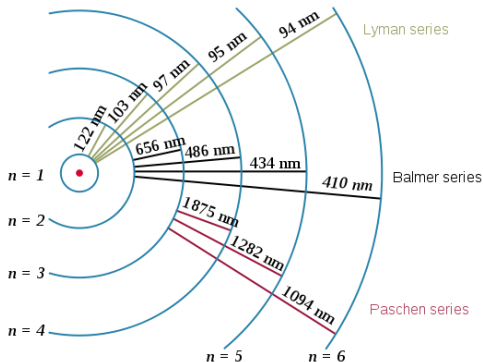
$$E_n = -Ry \frac{1}{n^2}$$

$$Ry = \frac{1}{32} \frac{e^4 m}{\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} = 13,6 \text{ eV}$$

- Ry je Rydbergova konstanta a má hodnotu 13,6 eV
- Přechod mezi hladinami je realizován emisí/absorpcí fotonu s frekvencí f o energii E dané rozdílem energií těchto hladin

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = |E_m - E_n|$$

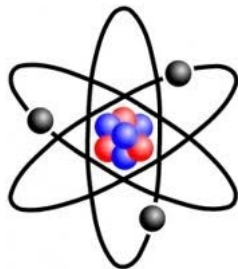
$$E = Ry \left| \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right|$$



spektrální série atomu vodíku (zdroj: en.wikipedia.org)

Historie stavby hmoty – zobecněný Bohrův model atomu

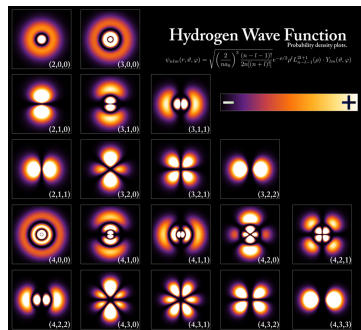
- V roce 1914 byl Bohrův model atomu experimentálně potvrzen (Franck-Hertzův experiment)
- 1915 – A. Sommerfeld a W. Wilson zobecnili Bohrův model atomu (zobecněná kvantová podmínka)
- Elektron se pohybuje po elipse v prostoru (3 kvantové podmínky)
- Elektron je popsán 3 čísly
- Stále je elektron popisován jako klasická částice a je mu přiřazována trajektorie



zobecněný Bohrův model atomu
vodíku (zdroj: www.azoquantum.com)

Kvantová mechanika – kvantově mechanický model

- S tímto modelem přišel E. Schrödinger a L. de Broglie po zavedení nové kvantové mechaniky
- Elektrony jsou popsány vlnovými funkcemi (vlnami) a jejich vývoj stavu řeší Schrödingerova rovnice
- Výskyt elektronů je jen pravděpodobnostní
- Orbital = nejpravděpodobnější oblast výskytu elektronů v atomu
- Elektron je charakterizován 4 kvantovými čísly:
 - Hlavní kvantové číslo určuje energii $n = 1, 2, 3, 4, \dots$
 - Vedlejší kvantové číslo určuje velikost momentu hybnosti $l = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1$
 - Magnetické kvantové číslo určuje průmět momentu hybnosti do daného směru $m = -l, \dots, 0, \dots, l$
 - Spinové číslo $s = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$ (pro elektrony)



vlnové funkce elektronů v atomu vodíku pro různé energetické hladiny (zdroj: en.wikipedia.org)

Kvantová mechanika – nová fyzika, nové myšlení

- Mikrosvět je zcela odlišný od našeho "klasického" světa
- Pohyb částic mikrosvěta popisuje kvantová mechanika, která je zcela odlišná od klasické fyziky
- Objekty mikrosvěta mají pravděpodobnostní výskyt a jsou popsány pomocí vlnové funkce (hmotnostní vlny)
- Kvantová mechanika se z klasického pohledu jeví „šíleně“
- Niels Bohr prohlásil: „Pokud nás kvantová mechanika zcela nezaskočila, tak jsme ji nepochopili.“
- Princip korespondence – při použití kvantové mechaniky na objekty makrosvěta je hodnota h velmi malá a kvantová mechanika v aproximaci přechází na fyziku klasickou

- **1926 – E. Schrödinger** převzal de Broglieho hypotézu a řešil vliv okolí na hmotnostní vlny a odvodil pohybovou rovnici kvantové mechaniky
- **Schrödingerova rovnice** je pohybovou rovnicí kvantové mechaniky a popisuje, co se děje s mikroobjektem, působí-li na něj okolí

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t)$$



Erwin Schrödinger (zdroj: en.wikipedia.org)

- Vlnová funkce sama o sobě nemá žádný fyzikální význam, ale její kvadrát udává hustotu pravděpodobnosti
- Kvantová mechanika vychází z experimentálně ověřených postulátů
- V kvantové teorii platí tzv. **Heisenbergův princip neurčitosti**, který říká, že nemůžeme současně přesně určit polohu a hybnost mikroobjektu (neumožňuje stav zadat klasicky)

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Kvantová mechanika – rozdíly mezi klasickou a kvantovou mechanikou

klasická mechanika

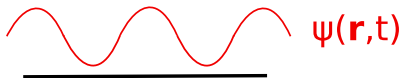
- stav je jednoznačně určen \mathbf{r} a \mathbf{p}
- \mathbf{r} a \mathbf{p} můžeme určit s libovolnou přesností současně
- „víme, kde je objekt“
- pohybovou rovnicí je 2. NPZ
- při měření nedochází ke změně stavu objektu

$\mathbf{r}(t), \mathbf{p}(t)$



kvantová mechanika

- stav zadán vlnovou funkcí $\psi(\mathbf{r}, t)$
- stav může být zadán lineární kombinací vlnových funkcí (jeden stav je složen z více stavů)
- $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2 = \rho(\mathbf{r}, t)$... hustota pravděpodobnosti výskytu
- pohybovou rovnicí je Schrödingerova rovnice
- fyzikální veličiny jsou zastoupeny operátory



Kvantová mechanika – příklad volné částice v 1D

- Nejjednodušším případem Schrödingerovy rovnice je tzv. stacionární Schrödingerova rovnice pro volný mikroobjekt (1D)

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d}{dx} \psi(x) = E\psi(x)$$

- Řešením je de Broglieho vlna v obou směrech

$$\psi(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$$

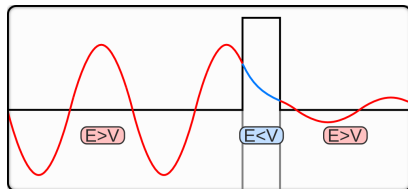
- Uvážíme-li pohyb v jednom směru ($B = 0$) a označíme $A = \psi_0$, tak hustota pravděpodobnosti je dána

$$|\psi(x)|^2 = |\psi_0 e^{ikx}|^2 = \psi_0^2 |e^{-ikx}|^2 = \psi_0^2$$

- Hustota pravděpodobnosti nezávisí na x , tedy pravděpodobnost nalezení částice je v každém bodě stejná (důsledek Heisenbergova principu – volná částice \rightarrow konstantní hybnost)

Kvantová mechanika – tunelování

- Tunelování je jedním z hlavních důsledků kvantové mechaniky
- Tunelování je jev, kdy mikroobjekt projde s určitou pravděpodobností potenciálovou překážkou
- Hlavní myšlenka je v tom, že nevíme, kde mikroobjekt je, a je tedy možné, že se dostane i za překážku
- Tunelování je z pohledu klasické fyziky nepochopitelné (př. házení míče o zed')



příklad tunelování částice mikrosvěta (zdroj: en.wikipedia.org)



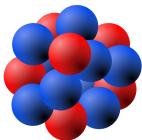
u procesorů se neustále zmenšuje vzdálenost mezi tranzistory a je zde třeba počítat s tunelovými jevy (zdroj: www.zdnet.com)

Jaderná fyzika – historický úvod

- V roce 1896 bylo objeveno radioaktivní záření (H. A. Becquerel, M. Curie-Sklodovská)
- E. Rutherford zjistil, že existují dva typy radioaktivního záření – alfa a beta
- Na začátku 20. století Rutherford zjistil, že radioaktivní záření alfa obsahuje jádra hélia
- V roce 1913 F. Soddy zjistil, že jádro obsahuje neutrální částice
- V roce 1919 E. Rutherford objevil proton
- V roce 1932 J. Chadwick objevil neutron

Jaderná fyzika – jádro atomu

- Jaderná fyzika zkoumá jádro atomu a nezajímá se o elektrony
- Atomová fyzika zkoumá elektrony a jádro představuje kladně nabitý bod
- Jádro atomu je složeno z nukleonů (neutrony a protony)
- Jádro má kulový tvar a připomíná kapku velice husté, nestlačitelné kapaliny (kapkový model)
- Nuklid = konkrétní typ jádra
- Prvek = určen počtem protonů (Z – pořadí v Mendělejevově tabulce)
- Izotopy = atomy stejného prvku s různým nukleonovým číslem



A ... nukleonové číslo

Z ... protonové číslo

N ... neutronové číslo

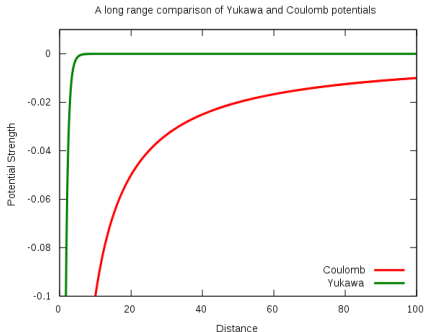
$$A = Z + N$$

Jaderná fyzika – silná jaderná interakce

- V jádru atomu působí mezi nukleony silná jaderná interakce (přitažlivá interakce), která drží jádro pohromadě
- Vložením neutronů dochází k potlačení odpuzivé elektrostatické interakce (klesá s 2. mocninou vzdálenosti) a k posílení vazebné jaderné interakce
- Silná jaderná interakce má „limitu“ – v případě, že jsou nukleony moc blízko, tak se mění v silně odpuzivou interakci

- Působení silné jaderné interakce nezávisí na druhu nukleonu
- Silná jaderná interakce je krátkodosahová
- Jukawův potenciál:

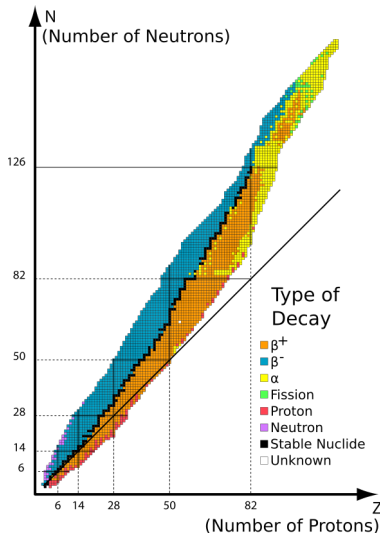
$$U(r) = -U_0 \frac{e^{-\alpha r}}{r}$$



porovnání silné jaderné a coulombovské interakce (zdroj: en.wikipedia.org)

Jaderná fyzika – stabilita jádra

- Zvyšující se počet nukleonů zesiluje silnou jadernou interakci (větší stabilita jádra)
- Velký počet protonů musí vyvažovat ještě více neutronů (viz graf)
- Nuklidy jsou stabilní do $Z = 83$ (větší množství protonů způsobí nestabilitu jádra)
- Nuklidy se $Z > 83$ jsou nestabilní (radionuklidy)
- Radionuklidy se pomocí radioaktivního rozpadu mění na nuklidy stabilní
- Druhy radioaktivního záření:
 - alfa záření
 - beta (+,-) záření
 - gama záření
 - neutronové záření



stabilita jader (zdroj: en.wikipedia.org)

Jaderná fyzika – vazebná energie

- A. Einstein zavedl hmotnostní energií ekvivalent

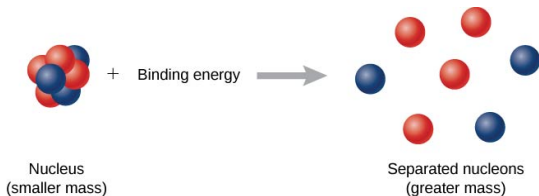
$$E = mc^2$$

- Vazebná energie = energie potřebná k rozložení soustavy
- Z energií bilance vychází, že jádro je energeticky výhodnější a k jeho rozložení na nukleony je třeba dodat vazebnou energii ΔE

$$\begin{aligned}m_j c^2 &< Z m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2 \\m_j c^2 + \Delta E &= Z m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2\end{aligned}$$

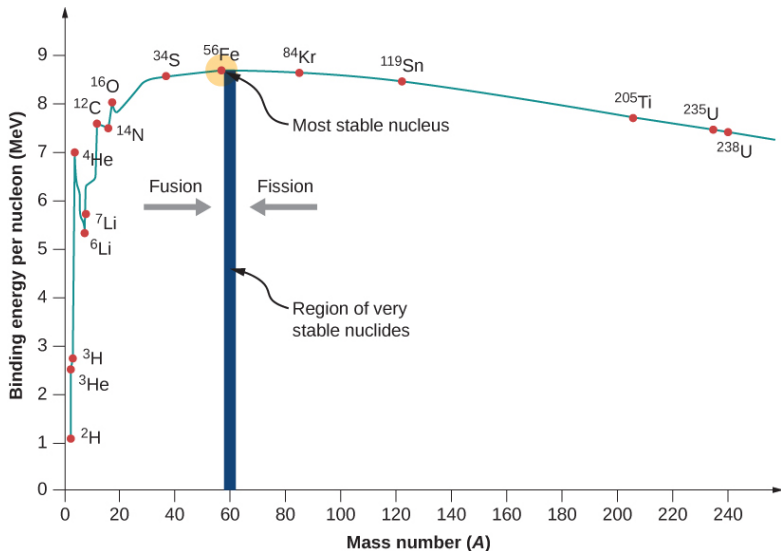
- Vazebná energie vztažená na jeden nukleon ϵ :

$$\epsilon = \frac{\Delta E}{A}$$



vazebná energie (zdroj: phys.libretexts.org)

Jaderná fyzika – vazebná energie



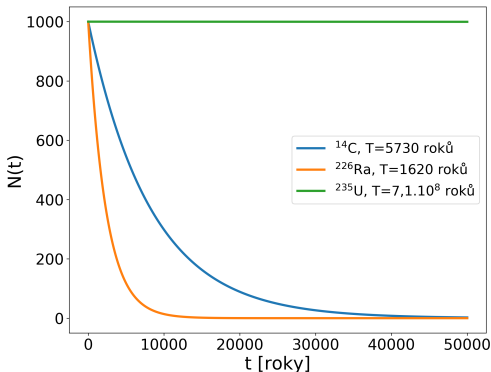
vazebná energie na jeden nukleon v závislosti na počtu nukleonů (zdroj: phys.libretexts.org)

Jaderná fyzika – zákon radioaktivní přeměny

- Pravděpodobnost rozpadu všech jader je stejná a nejsme schopni říct, které jádro se kdy rozpadne
- Pokles radioaktivity popisuje veličina poločas rozpadu T , která určuje dobu, za kterou klesne radioaktivita na polovinu
- Zákon radioaktivní přeměny

$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$$
$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

- Zákonu radioaktivní přeměny se využívá u datování historických nálezů
- Nejčastěji se k datování využívá množství izotopu uhlíku ^{14}C

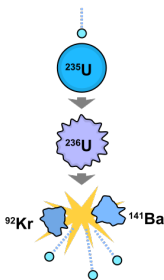


Jaderná fyzika – jaderné reakce

- Jaderné reakce slouží k přeměně nestabilních (energeticky nevýhodných) uskupení nukleonů na stabilnější za vzniku velkého množství energie
- Jaderná reakce je jaderná přeměna vyvolaná jinou částicí

jaderné štěpení

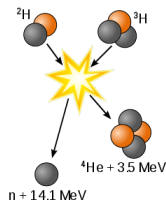
- rozpad těžkých jader
- rozpad je samovolný a vzniká velké množství energie



jaderné štěpení (zdroj: en.wikipedia.org)

jaderná fúze

- slučování lehkých jader
- je nutné překonat odpudivou interakci
- vysoké teploty a veliké tlaky
- probíhá např. v jádru Slunce



jaderná fúze (zdroj: en.wikipedia.org)