# 18 Jaderné záření

*Interakce jaderného záření s prostředím a metody detekce. Spektrometrie jaderného záření. Umělé zdroje jaderného záření.*

## 18.1 Průchod tě«kých nabitých částic látkou

Za tě«ké částice pova«ujeme částice, jejich« hmotnost je srovnatelná s hmotností protonu nebo větí.

Při průchodu tě«ké nabité částice látkou dochází k rozptylu na atomových jádrech; k popisu jednotlivých srá«ek je mo«né pou«ít Rutherfordovy formule. Převládá rozptyl na malé úhly, ale vzhledem k tomu, «e rozptyl je **mnohonásobný**, odchylky se postupně skládají tak, «e se v průměru prakticky anulují. Střední úhel odchylky od původního směru je přibli«ně nepřímo úměrný druhé mocnině kinetické energie částice.

Např. dolet pro $\alpha$-částice ve vzduchu je dán vztahem $R[\text{ cm}] = 0,318 E_k^{\frac{3}{2}}[\text{ MeV}]$.

Při malých energií ztrácí částice energie **excitací** a **ionizací** atomů nebo molekul. Po excitaci dojde k vyzáření fotonu a úbytku energie v intervalu $1-10$ eV, při ionizaci (vyra«ení elektronu) je úbytek energie asi $1-10^5$ eV.

Vzhledem k tomu, «e v dostatečně silné vrstvě látky se částice nakonec zastaví, má smysl definovat **dolet** $R$ jako dráhu, kterou projde do zastavení.

## 18.2 Průchod lehkých částic látkou

Podstatný vliv na průchod lehkých nabitých částic látkou mají **ionizační ztráty** a dále **radiační ztráty**, způsobené **brzdným zářením**. Pokud elektron interaguje s jiným elektronem nebo s jádrem, dojde k jeho zbrzdění, při kterém vyzáří foton. Brzdné záření je pro energetické ztráty lehkých částic rozhodující při vysokých energiích.

V látkovém prostředí se mohou nabité částice pohybovat rychleji ne« se v tomto prostředí pohybuje světlo ($c = \frac{c_0}{n} < v < c_0$). V tom případě nabitá částice vysílá elektromagnetické záření v oblasti viditelného spektra zvané **Čerenkovovo záření**. Energetické ztráty v důsledku Čerenkovova záření jsou nepatrné, ale efekt se vyu«ívá k detekci a stanovení rychlosti relativistických nabitých částic.

Při **vnějším fotoefektu** dochází k vyra«ení elektronů z látky, při **vnitřním** pouze k přesunutí na vyí energetickou hladinu.

Fotony jsou neutrální částice a nemohou elektromagneticky interagovat s částicemi látky. Při průchodu fotonů dochází ke ztrátám hlavně **fotoefektem** (nejni«í energie), **Comptonovým rozptylem** (střední energie) a **tvorbou elektron-pozitronových párů** (nejvyí energie).

Neutrina lze registrovat pouze prostřednictvím jejich slabé interakce s ostatními částicemi.

## 18.3 Jaderné záření a člověk

Jaderné záření mů«e interakcí s okolím naruit funkční mechanizmy buňky nebo pokodit DNA. Pravděpodobnost pokození se zvyuje se zvyující se dobou, po kterou byl člověk záření vystaven. Veličina pro kvantitativní popis „obdr«eného“ záření se nazývá **dávka** $\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}m}$ (jednotka gray) – kritická hodnota je asi $5-10$ Gy. To, «e různé druhy jaderného záření působí na organizmus různě, vyjadřuje **ekvivalentní dávka** $Q = \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}m}$ (jednotka sievert). Smrtelná dávka je několik Sv za krátké období, přírodní pozadí $0,4-4$ mSv/rok, bě«ný zákonný limit pro člověka 5 mSv/rok.

Nejvíce jaderného záření člověk obdr«í z těchto zdrojů:

| | |
|---|---|
| 33 % | radon |
| 30 % | kosmické záření |
| 21 % | zdravotnictví |
| 16 % | sníme |

Příspěvky mení dohromady ne« 1% jsou pak od energetiky, spadu, apod.

| | | |
|---|---|---|
| Faktory pro ekvivalentní dávku: | $Q = 1$ | elektrony, $\gamma$-fotony |
| | $Q = 10$ | protony, neutrony ($10-100$ keV, $2-20$ MeV) |
| | $Q = 20$ | $\alpha$-částice, fragmenty, neutrony($10$ keV $-2$ MeV) |
| Obdr«ené dávky při některých činnostech: | pobyt u jaderné elektrárny | $0,02$ mSv/rok |
| | pobyt u uhelné elektrárny | $0,06$ mSv/rok |
| | pobyt v letadle | $0,004$ mSv/hod |
| | snímek plic | $0,07$ mSv |
| | kontrastní snímek střev | 13 mSv |

## 18.4 Detekce jaderného záření

Základní typy detektorů jaderného záření jsou

- *plynem plněné ionizační detektory* – kondenzátor naplněný plynem, voltampérová charakteristika má 5 částí: lineární, která postupně přechází v konstantní, potom ionizační proud zase roste, nejdříve úměrně původní ionizaci, pak je úměrnost pouze částečná a v okolí Geigerova bodu i malá primární ionizace způsobí velký vzrůst proudu a dochází k samostatnému výboji
  - *ionizační komory* – pracují v oblasti nasyceného proudu, vhodné pro detekci (dlouhodobého) toku procházejícího komorou, vhodné pro tě«ké ionty a $\alpha$-částice, fotony $\gamma$ (za vy«ití Comptonova jevu), neutrony (detekce nabitých částic vzniklých interakcí s vhodnou náplní komory)
  - *proporcionální detektory* – pracují v oblasti úměrnosti proudu původní ionizaci, za oblastí nasyceného proudu
  - *Geigerovy-Müllerovy detektory* – pracují v oblasti Geigerova bodu, detekují jednotlivé částice, ale pro dalí detekci musí dojít k přeruení výboje
- *detektory vyu«ívající ionizace v pevné látce*
  - *scintilační detektory* – měříme záblesky vzniklé dopadajícími částicemi a prolé fotonásobičem, podobný detektor pou«il Rutherford
  - *polovodičové* – vytvoříme p-n přechod bez volného náboje, v této oblasti vytváří nabitá částice ionty, které jsou odvedeny na elektrody
- *Čerenkovovy detektory* – měří Čerenkovovo záření, vhodné v subnukleární fyzice pro měření rychlosti relativistických částic
- *kalorimetry* – měříme celkovou energii částic vyslaných v určitém prostorovém úhlu
- *dráhové komory* – mohou měřit i souřadnice místa, kterým částice prola
  - *ml«né komory* – jsou vyplněné plynem s přesycenými parami, po průchodu nabité částice dojde ke kondenzaci na vytvořených zrníčcích prachu a iontech
  - *bublinové komory* – jsou vyplněné kapalinou zahřátou těsně pod bod varu, po průchodu nabité částice vznikají centra, v jejich« okolí začne kapalina vřít
  - *jiskrové komory* – registrují jiskrové výboje způsobené ionizací plynu nabitou částicí procházející komorou
  - *jaderné fotoemulze*

Důle«itými vlastnostmi detektorů jaderného záření jsou **prostorové rozlení**, **časové rozlení**, **detekční účinnost** a **mrtvá doba**.

## 18.5 Spektrometrie jaderného záření

Při měření je často nutné určit energii částic; vědeckou disciplínu zabývající se měřením energie částic nazýváme **spektrometrií**.

Energii **tě«kých nabitých částic** lze určit z jejich doletu, tedy pomocí jaderných emulzí nebo ml«ných a bublinových komor. Lze pou«ít i ionizační komory a scintilační nebo polovodičové detektory, proto«e vstupní signál je úměrný energii, kterou částice v detektoru ztratila.

Pro měření energie **nabitých částic** je mo«né pou«ít **magnetické spektrometry** ze známých účinků magnetického pole na částici.

V **spektrometrii záření** $\gamma$ vyu«íváme interakci tohoto záření s prostředím. V scintilačních nebo polovodičových detektorech reagují fotony s prostředím za vzniku elektronů, které jsou pak zachyceny. Pro záření s energií mení ne« asi $0,1$ MeV mů«eme vyu«ít i difrakce na krystalové mří«ce.

Důle«itými charakteristikami spektrometrů jsou jejich **energetické rozlienı** a **detekční účinnost**.

## 18.6 Umělé zdroje jaderného záření

**Urychlovače** mají dnes iroké vyu«itı, kromě defektoskopie materiálů a opracování výrobků i v lékařství (terapeutické a diagnostické účely) (pou«ívá se synchrotronní záření), se vyu«ívají ke zkoumání povrchů nebo k výrobě radionuklidů.

Mů«eme urychlovat **nabité částice**, a to buď působením elektrického pole, které dodává částici energii

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = Ze\vec{\mathcal{E}} \cdot \vec{v}, \tag{1}$$

nebo magnetickým polem, které způsobí, «e se částice pohybuje kolmo k vektoru $\vec{\mathcal{B}}$ po kru«nici o poloměru

$$r = \frac{p}{Ze\mathcal{B}} = \frac{mv}{Ze\mathcal{B}} = \frac{v}{\omega_c}. \tag{2}$$

Po dopadu takto urychlených částic mohou vzniknout sekundární částice (i neutrální), popř. dalí částice vzniklé rozpadem sekundárních částic.

Základními typy urychlovačů jsou

- *kruhové urychlovače*
  - *betatron* – indukční urychlovač elektronů, elektrony se pohybují v evakuovaném prstenci a jsou urychlovány elektrickým napětím, vytvořeným elektromagnetickou indukcí, k zajitění pohybu po kruhové, uzavřené dráze se pou«ívají variace magnetického pole
  - *cyklotron* – rezonanční urychlovač protonů a tě«ích iontů, je to vakuová komora, vlo«ená mezi pólové nástavce elektromagnetu, který vytváří téměř homogenní magnetické pole, uvnitř komory jsou dvě elektrody, částice se pohybuje po spirále s rostoucím poloměrem mezi elektrody se musí dostat v okam«iku, kdy ji pole urychlí
  - *synchrotron* – urychluje elektrony na dráze s konstantním poloměrem, konstantní frekvencí urychlovacího napětí a s rostoucí magnetickou indukcí během urychlování
  - *vstřícné svazky* – pro dosa«ení větích vzájemných rychlostí pohybu je vhodné sestavit urychlovače, kde jsou v konečné fázi dva svazky namířeny proti sobě a vyu«ít srá«ek v tě«i¸ové soustavě
- *lineární urychlovače*
  - *elektrostatické urychlovače* – tvořené vysokonapě¸ovým zdrojem (často Van der Graafův generátor) a urychlovací trubicí
  - *vysokofrekvenční urychlovače* – tvořený trubicí obsahující řadu válcových elektrod, jejich« délka během urychlování roste; elektrody jsou připojeny k vysokofrekvenčnímu zdroji napětí tak, aby urychlované částice proly těrbinou mezi elektrodami při vhodném urychlovacím napětí

Pokud jsou částice urychlovány nebo se pohybují po zakřivené dráze, vysílají **synchrotronní záření**.

Nejdůle«itějími charakteristikami urychlovačů **maximální dosa«itelná energie**a **hustota toku částic ve svazku**.

# 19 Atomové jádro

*Základní vlastnosti a charakteristiky, vazbové síly, vazbová energie jader. Radioaktivita. Jaderné reakce.*

## 19.1 Základní vlastnosti a charakteristiky jader

Slo«ení atomového jádra mů«eme vyjádřit pomocí dvou čísel, a to **protonového čísla** $Z$, určujícího počet protonů v jádře a tím pádem i elektronů v obalu (a pořadí v periodické tabulce), a **nukleonového čísla** $A$, určujícím celkový počet protonů a neutronů v jádře. Tuto charakteristiku zapisujeme ve tvaru ${}^{A}_{Z}X$ a nazýváme **nuklid**. Atomy se stejným protonovým, ale různým nukleonovým číslem se nazývají **izotopy** (např. existují 3 izotopy vodíku - vodík, deuterium a tririum). Protonová a nukleonová čísla mají význam pro stabilitu jader (najstabilnější jsou obecně jádra, jejich« $A$ i $Z$ je sudé).

Dalí důle«itou vlastností jádra je jeho **hmotnost**, resp. **energie**. Hmotnost atomového jádra obyčejně uvádíme pomocí **hmotnostní jednotky** $u = 1,661 \cdot 10^{-27}$ kg resp. $uc^2 = 931,5$ MeV, která určuje $\frac{1}{12}$ hmotnosti ${}^{12}_{6}C$. Hmotnost atomového jádra je dána vztahem

$$M(A,Z) = Zm_p + (A-Z)m_n - B(A,Z). \tag{3}$$

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

**Rozměr jádra** lze odhadnout z rozptylových experimentů, jejich« výsledkem je vztah

$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}}, \qquad \text{kde} \quad r_0 = (1,52 \pm 0,08) \cdot 10^{-15}\ \text{m}. \tag{4}$$

**Elektrický dipólový moment jádra** je nulový, **magnetický dipólový moment** je obecně nenulový.

## 19.2 Struktura jader

Nukleony jsou v jádře vázány **silnou jadernou interakcí**, která je krátkodosahová, ale na typické rozměry atomového jádra mnohem silnějí ne« elektromagnetické odpuzování. Tato interakce „necítí“ náboj a vá«e tedy k sobě i stejně nabité protony a protony s netrony.

Vlastnosti atomových jader vysvětluje **slupkový model jádra**, podobný modelu atomového obalu, kdy dochází k postupnému obsazování diskrétních energetických hladin, přičem« energetický rozdíl mezi nukleony v jedné slupce je řádově mení ne« energetický rozdíl mezi dvěma nukleony v sousedních slupkách. Ke stabilitě atomového jádra tedy přispívá i (pro fermiony obecně platný) **Pauliho vylučovací princip**.

## 19.3 Radioaktivita

Dnes známe 264 stabilních nuklidů, ostatní se samovolně těpí. Vzniklá jádra ovem nemusí být stabilní a tím pádem vznikají **radioaktivní řady**, popř. se mohou těpit na více prvků (s různou pravděpodobností), co« vyjadřují **větvící poměry**. Kdybychom vynesli do grafu $(A-Z)$ v závislosti na $Z$, dostaneme **linii stability**.

Dnes známé řady jsou thoriová začínající ${}^{232}_{90}Th$, neptuniová (${}^{237}_{93}Np$), uranová (${}^{238}_{92}U$) a aktiniová (${}^{235}_{92}U$).

Empiricky nalezený tvar **rozpadového zákona** je

$$N(t) = N_0\, \mathrm{e}^{-\lambda t}. \tag{5}$$

Stabilitu jádra pak mů«eme charakterizovat **střední dobou «ivota**

$$\tau \equiv \int_0^\infty \lambda t\, \mathrm{e}^{-\lambda t}\, \mathrm{d}t = \frac{1}{\lambda} \tag{6}$$

nebo **poločasem rozpadu** (dobou, za ní« se rozpadne právě polovina částic)

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}. \tag{7}$$

**$\alpha$-rozpad**

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow^{(A-4)}_{(Z-2)} Y +^{4}_{2} He \tag{8} $$

je doprovázen vyzářením $\alpha$-částice. Jádra s nukleonovým číslem větím ne« 150 jsou nestabilní vůči $\alpha$-rozpadu; zvlátě dochází k tomuto typu těpení u aktinidů, vzácných zemin a jader v okolí olova. Podstatou „vzniku“ $\alpha$-částice v jádře je **tunelový jev**.

**$\beta^-$-rozpad**, resp. **$\beta^+$-rozpad**

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow^{A}_{Z+1} Y + e^- + \tilde{\nu}_e \quad \text{resp.} \quad {}^{A}_{Z}X \rightarrow^{A}_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e \tag{9} $$

je doprovázen vyzářením elektronu (pozitronu) a antineutrina (neutrina). Prvky nad linií stability se samovolně rozpadají $\beta^-$-rozpadem, prvky pod linií stability $\beta^+$-rozpadem. $\beta$-rozpadu podléhají nejlehčí i nejtě«í prvky, u tě«ích jader vak začíná převládat konkurenční $\alpha$-rozpad.

Příčinou $\beta^-$-rozpadu je rozpad neutronu

$$ n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \tilde{\nu}_e, \tag{10} $$

u $\beta^+$-rozpadu naopak vznik neutronu

$$ p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e. \tag{11} $$

Obě tyto reakce jsou projevem **slabé interakce** mezi částicemi.

Třetím typem $\beta$-rozpadu je **K-záchyt** – u tě«ích jader je nenulová pravděpodobnost, «e elektron ze slupky $K$ bude nalezen v jádře, kde mů«e dojít k jeho zachycení

$$ p^+ + e^- \rightarrow n_0 + \nu \quad \Rightarrow \quad {}^{A}_{Z}X + e^- \rightarrow^{A}_{Z-1} Y + \nu. \tag{12} $$

Třetím a posledním typem radioaktivity je $\gamma$-rozpad

$$ {}^{A}_{Z}X^* \rightarrow^{A}_{Z} X + \gamma. \tag{13} $$

Tento proces je analogický přechodu atomového obalu do základního stavu, a proto bě«ně doprovází první dva typy rozpadu. Vzniklá jádra se do základního stavu dostávají větinou rychle, proto«e střední doba «ivota jader pro $\gamma$-rozpad se převá«ně nachází v intervalu ($10^{-7}$–$10^{-11}$ s).

## 19.4 Jaderné reakce

Jaderné reakce umo«ňují hlubí studium částic. Významnou charakteristikou jaderných reakcí jsou jejich **účinné průřezy**, které udávají pravděpodobnosti toho, «e k reakci dojde

$$ \sigma = \frac{\text{pocet udalosti}}{\text{naletavajici tok castic}}. \tag{14} $$

Závislost na úhlu rozptylu vyjadřuje **diferenciální účinný průřez** $\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega}$.

Na jaderných reakcích se obecně podílejí tři typy interakcí – **silná**, **slabá** a **elektromagnetická**. Reakce probíhající slabou interakcí mají malý účinný průřez a jsou proto málo pravděpodobné; charakteristická doba reakce slabou interakcí je tedy značně větí ne« u interakcí ostatních. Tento typ interakce doprovázejí neutrina.

Jaderné reakce mohou být buď **přímé**, nebo **přes slo«ené jádro**. Speciálním případem reakce přes slo«ené jádro je **reakce rezonanční**, kdy je vzniklé jádro nestabilní (pouze rezonance v diferenciálním účinném průřezu) a rychle se rozpadá.

Důle«itým typem jaderné reakce je **jaderné těpení**. Nestabilní jádra tě«ích prvků se (např. nárazem neutronu) rozpadají na jádra lehčí; tyto těpné reakce se pou«ívají v jaderných elektrárnách.

Druhou důle«itou skupinou jaderných reakcí jsou **termojaderné reakce** – jaderná fúze. Jádra lehčích prvků se (za vhodných podmínek) spojí do tě«ího jádra. Tyto reakce jsou zdrojem energie hvězd.

Vzhledem k tomu, «e energeticky nejstabilnějí je jádro «eleza $^{56}_{28}Fe$, jsou obě výe uvedené reakce energeticky ziskové.

# 20 Subjaderná fyzika

*Základní skupiny částic a interakcí mezi nimi. Antičástice. Zákony zachování v mikrosvětě.*

## 20.1 Elementární částice

K důle«itým vlastnostem elementárních částic patří **klidová hmotnost** resp. **klidová energie**, **náboj** a **spin**. Spin je vnitřní moment hybnosti částice a vychází z Diracovy relativistické rovnice. Částice s poločíselným (tj. jejich spin je poločíselným násobkem $\hbar$ – $\frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \ldots$) spinem se chovají podle **Pauliho vylučovacího principu** (nemohou být dvě částice v tomté« kvantovém stavu) a nazýváme je **fermiony**, částice s celočíselným spinem (nechovají se podle Pauliho vylučovacího principu) nazýváme **bosony**.

Elementární částice mů«eme rozdělit do těchto skupin:

| fermiony: $s = \frac{1}{2}\hbar, \frac{3}{2}\hbar, \ldots$ | | bosony: $s = \hbar, 2\hbar, \ldots$ |
|---|---|---|
| leptony | | |
| $e^-, \mu^-, \tau^-, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ | | $\gamma$ |
| hadrony | | |
| baryony | | mezony |
| hyperony | nukleony | |
| $\Lambda, \Sigma, \ldots$ | $p^+, n^0$ | $\pi, K, \ldots$ |

Samostatnou skupinu částice tvoří **foton**: je to boson a má jako jediná částice nulovou klidovou energii.

**Leptony** jsou fermiony; patří mezi ně tři záporně nabité částice (řazené podle klidové energie) a jejich netrina, a to $e^-, \nu_e, \mu^-, \nu_\mu, \tau^-, \nu_\tau$.

Poslední skupinou jsou **hadrony**. Vyznačují se tím, «e interagují silně. Hadrony, které jsou zároveň bosony, se nazývají **mezony** (např. $\pi, K, \ldots$); hadrony, které jsou fermiony, se nazývají **baryony**. Mezi baryony patří hyperony $\Lambda, \Sigma, \ldots$ a skupina **nukleonů**, tj. proton a neutron.

Ke ka«dé částici existuje **antičástice** (znovu vyjde v Diracově relativistické rovnici), která má stejnou hmotnost, stejný spin, ale opačný náboj, opačný směr magnetického momentu vůči spinu a jiné charakteristiky. (Ale například v případě fotonu nebo neutrálního pionu je částice toto«ná se svou antičásticí.) Máme tedy antileptony, antibaryony, ....

Setká-li se částice se svou antičásticí, mů«e dojít k **anihilaci** – obě částice zaniknou a jejich celková energie se přemění na energii jiných částic.

Je vhodné zavést pro charakteristiku částic dalí kvantová čísla, a to **baryonové číslo** a **leptonové číslo**. Ka«dá částice, která je baryonem (leptonem), má baryonové číslo rovno 1, antibaryon (antilepton) -1 a ostatní částice 0.

## 20.2 Interakce mezi částicemi

Vzájemné působení vech částic mů«eme rozdělit do čtyř typů interakcí.

„Univerzální“ interakcí je **gravitace**. Působí i na velké vzdálenosti mezi vemi částicemi (jejím „nábojem“ je hmotnost), je pouze přita«livá.

Druhým typem interakce je **interakce elektromagnetická**, působící mezi nabitými částicemi i na větí vzdálenosti. Elektrostatické působení je dáno Coulombovým zákonem a vá«e

obal atomu k jeho jádru. Slaběji se elektromagnetická interakce projevuje mezi neutrálními hadrony s vlastním magnetickým momentem.

Pouze na krátké vzdálenosti (rozměrů atomového jádra) a pouze mezi hadrony (jejím „nábojem“ je hadronové číslo) působí **silná interakce**. Je asi 100-1000-krát silnější ne« elektrostatická interakce, vá«e k sobě nukleony v jádře.

Posledním typem interakce je univerzální krátkodosahová **slabá interakce**. Je příčinou pomalých rozpadů částic, proto«e má malý účinný průřez (např. nepravděpodobnost interakce neutrina je dána právě tím, «e neutrino mů«e interagovat pouze slabě). Jejím typickým projevem je $\beta$-rozpad a samovolné rozpady částic.

Celkově mů«eme shrnout:

| interakce | konstanta interakce | $\sigma[\mathrm{m}^2]$ | doba procesu [s] |
|---|---|---|---|
| silné | $\frac{g^2}{4\pi} \approx 1$ | $10^{-30}$ | $10^{-24}$ |
| elektromagnetické | $\alpha = \frac{1}{137}$ | $10^{-34}$ | $10^{-20} - 10^{-15}$ |
| slabé | $\frac{G_F}{(Mc^2)^2} \approx 10^{-5}$ | $10^{-47}$ | $> 10^{-13}$ |
| gravitační | $\kappa = 6,672 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m^3kg^{-1}s^{-2}}$ | | |

## 20.3 Subnukleární částice

Experimenty rozptylu leptonů na hadronech ukázaly, «e hadrony mají svou strukturu; jsou slo«eny z **kvarků**. Zatím je známo est kvarků. Předpokládá se, «e baryony jsou slo«eny ze tří kvarků různých **barev** (červenou, «lutou a modrou), které dají dohromady „nebarevnou“ částici. Mezony jsou naopak slo«eny z páru kvark-antikvark, čím« se barva vzájemně vyruí. Kvarky také charakterizují kvantová čísla, např. **krása** a **podivnost**; hadrony obsahující tyto kvarky mají tato čísla potom také nenulová. Kvarky se také řídí Pauliho vylučovacím principem.

Podle dosavadních experimentů jsou leptony ji« „bodové“ částice z «ádnou vnitřní strukturu nemají.

Mezi bosony jsou pak důle«ité částice, které zprostředkovávají interakce: elektromagnetickou fotony, slabou bosony $W^{\pm}$, $Z^0$, silnou gluony a gravitaci (zatím hypotetické) gravitony.

Nastaly i změny týkající se pojetí fundamentálních interakcí. Silná interakce se chápe jako interakce mezi kvarky (proto leptony silně neinteragují) a jaderné síly jsou vlastně zbytkové projevující se vně hadronů. Elektromagnetická a slabá interakce byly sjednoceny do tzv. **elektroslabé** (elektromagnetická a slabá interakce jsou srovnatelné při energiích $\approx 100$ GeV). Z této teorie vyplývá existence Higgsovy částice.

Podle současných představ existují tyto „bodové“ částice:

| fermiony | | | |
|---|---|---|---|
| kvarky | u<br>d | c<br>s | t<br>b |
| leptony | $\nu_e$<br>$e^-$ | $\nu_\mu$<br>$\mu^-$ | $\nu_\tau$<br>$\tau^-$ |

| bosony | |
|---|---|
| kvanta polí | $\gamma, W^{\pm}, Z^0, g$ |
| Higgsovy částice | h |

## 20.4 Zákony zachování

V jaderné fyzice samozřejmě platí bě«né zákony zachování. Podle **teorému Noetherové** je zákon zachování v«dy spojen s nějakou symetrií přírody.

- *energie* – plyne z homogenity času
- *hybnosti* – plyne z homogenity prostoru

- *momentu hybnosti* – plyne z izotropie prostoru

Kromě toho existují různé „zákony zachování náboje“, jejich původ je zatím neznámý. Jsou to zákony zachování

- *náboje*
- *baryonového čísla*
- *leptonového čísla* – a to i pro jednotlivé skupiny leptonů, tj. elektronu, mionu a tauonu

V oblasti meních energií, kde u« nemohou probíhat jaderné reakce a částice se nemohou měnit jedna na druhou, v podstatě zákon zachování leptonového a baryonového čísla přechází v zákon zachování energie.

Existují i dalí kvantová čísla jako podivnost nebo půvab (pokud hadrony „obsahují“ podivné – s – nebo půvabné – c – kvarky), který se zachovávají při silných a elektromagnetických interakcích, ale nezachovávají při slabých interakcích. Proto«e tyto interakce naruují zákon zachování, jsou méně pravděpodobné a tím pádem je mnohem větí jejich doba trvání.

Studujeme-li invarianci procesů vůči reflexi prostoru P, reflexi času T a sdru«ení náboje C, zjistíme, «e elektromagneticky a silně probíhající procesy jsou invariantní vůči jednotlivým transformacím. Slabé interakce ovem vůči nim invariantní nejsou; předpokládá se vak, fyzikální procesy jsou invariantní vůči CPT-transformaci, tj. vůči provedení vech tří transformací najednou.