

2.4 FYZIKA ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC

V této kapitole se dozvíte:

- co je předmětem studia fyziky elementárních částic;
- jak se částice na základě svých vlastností třídí do jednotlivých skupin;
- o vlastnostech některých částic – zástupců jednotlivých skupin;
- co je to antičástice a jaké jsou její vlastnosti ve srovnání s příslušnou částicí;
- jak kvarková teorie vysvětluje strukturu hadronů;
- o současném systému základních částic a základních fyzikálních interakcí.

Budete schopni:

- popsat stavbu hmoty na subjaderné úrovni s využitím poznatků fyziky elementárních částic;
- uvést některé elementární částice, jejich vlastnosti;
- zařadit částice na základě jejich vlastností do příslušných skupin;
- pohovořit o tom, jak kvantová teorie objasňuje strukturu hadronů;
- uvést základní částice látky a pole a zařadit je do systému elementárních částic;
- vyjmenovat čtyři základní fyzikální interakce, uvést jejich vlastnosti a příklady uplatnění v přírodě.

Klíčová slova této kapitoly:

elementární částice, leptony, hadrony, antičástice, kvarky, základní fyzikální interakce



Čas potřebný k prostudování učiva kapitoly:

4 + 2 hodiny (teorie + řešení úloh)

Po objevu struktury atomového obalu a atomového jádra bylo jasné, že atom jako celek ani jeho jádro nejsou základními stavebními kameny látek. Obal atomu se skládá z *elektronů*, jádro atomu z *nukleonů*. Uvedené částice byly zpočátku považovány za základní částice látky a byly proto označeny jako **elementární částice**.

K nim se později přidružila *kvanta polí* – *fotony* v případě *elektromagnetického pole* a *mezony* π v případě pole *jaderných sil*.

Při detekci částic kosmického záření a při sledování srážek částic v urychlovačích byly postupně objevovány další a další elementární částice. Jejich počet byl postupně vyšší než počet známých *nuklidů*. Fyzikové se snažili setřídít částice do systému (podobně jako to učinili v případě periodického systému chemických prvků). Vznikl nový obor *fyzika elementárních částic*.



Fyzika elementárních částic

je obor fyziky zabývající se studiem elementárních částic. Zkoumá jejich vzájemné působení (interakce) a studuje zákonitosti přeměn částic.

Fyzika elementárních částic se zejména dříve označovala též jako fyzika vysokých energií, subnukleární fyzika nebo subjaderná fyzika.

2.4.1 TŘÍDĚNÍ ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC A JEJICH CHARAKTERISTIKY

Částice je možné třídit podle jejich základních fyzikálních charakteristik a vzájemného silového působení do několika skupin. Připomeňme si, že z pohledu kvantové fyziky a statistické fyziky rozdělujeme částice na *fermiony* a *bosony*.



Bosony a fermiony

Bosony mají „celočíslné hodnoty spinu“

(spinové číslo je celočíslné).

Fermiony mají „poločíslné hodnoty spinu“

(spinové číslo je lichým násobkem 1/2).

Ve fyzice elementárních částic pak rozdělujeme částice do skupin, které se liší svým chováním při přeměnách, strukturou a dalšími vlastnostmi.

Jedná se především o *leptony*, *mezony* a *baryony*. Názvy těchto skupin vychází z pořadí hmotností jejich prvních známých zástupců: elektronu (leptony neboli lehké částice), mezonu π (mezony neboli středně těžké částice) a neutronu (baryony neboli těžké částice). Skupina mezonů a baryonů se zahrnuje pod společné označení *hadrony*. Tato skupina se svými vlastnostmi liší od skupiny leptonů.



Leptony

jsou elementární částice, pro něž je charakteristické, že neinteragují silně a že jsou to *fermiony* se spinovým kvantovým číslem 1/2. U leptonů zatím nebyla pozorována další vnitřní struktura.

Poznámky:

- Všechny částice bez vnitřní struktury se v literatuře označují jako „*bodové částice*“, resp. „skutečně elementární částice“ nebo též „*základní částice*“ (terminologie není sjednocena).
- Podle současných poznatků existuje celkem 6 *leptonů* (a tedy i 6 antileptonů, viz kap. 2.4.2). Jsou to *elektron* (e), *mion* (μ), *tauon* (τ) a jim odpovídající *neutrína* – elektronové (ν_e), mionové (ν_μ) a tauonové (ν_τ).
- Náboj elektronu, mionu i tauonu je $-e$; všechna neutrína jsou elektricky neutrální.
- Alternativní, ale nevhodné označení *mionu* je „*mezon* μ “.
- Alternativní označení *tauonu* jsou částice τ , lepton τ nebo *těžký lepton*.
- Původně označení *leptony* znamenalo lehké částice, ale zejména po objevu těžkého leptonu ztrácí svůj původní smysl.
- V moderním systému „základních elementárních částic“ tvoří *leptony* spolu s *kvarky* základní částice látky.

Hadrony

jsou skupina elementárních částic, pro něž je charakteristické, že interagují silně (srovnej *leptony*) a že je možno při rozptylových experimentech pozorovat jejich další vnitřní strukturu.

**Poznámky:**

- Dnes víme, že jsou složeny z *kvarků* (o kvarkové hypotéze budeme hovořit v kapitole 2.4.3).
- Jedná se tedy o složené částice a název *elementární částice* je v tomto případě sice nevhodný, ale již vžitý - srovnej například původ slova atom.
- Z tohoto důvodu se v některých publikacích od označení „elementární“ upouští a hovoří se pouze o částicích (terminologie není sjednocena).

Skupina *hadronů* se dělí na dvě skupiny částic: *mezony* a *baryony*.

Mezony

jsou všechny *hadrony*, jež jsou zároveň *bosony*.

**Poznámky:**

- Původně označení mezon znamenalo středně těžkou částici, z dnešního pohledu nemá už toto pojetí opodstatnění. Mnoho nově objevených částic svými hmotnostmi totiž tomuto původnímu významu pojmenování neodpovídá.
- Mezi mezony patří např. piony, kaony, mezony D a další.



Baryony

jsou všechny **hadrony**, jež jsou zároveň **fermiony**.

Poznámka:

- Původně označení baryon znamenalo těžkou částici, z dnešního pohledu nemá už toto pojetí opodstatnění.

Mezi **baryony** patří **nukleony** a **hyperony**.



Nukleony

Do skupiny nukleonů patří proton (p) a neutron (n). Nukleony jsou nejlehčí baryony. Jsou to fermiony se spinovým kvantovým číslem 1/2.

Poznámka:

- Původ označení je v tom, že se jedná o elementární částice, ze kterých je složeno atomové jádro (nucleus).



Hyperony

jsou všechny **baryony** mimo **nukleony**.

Do této skupiny patří např. hyperony Λ , Σ , Ξ , Ω a další. Jedná se o nestabilní částice patřící mezi tzv. **rezonance**.



Rezonance

Jako **rezonance** se označuje každá „elementární částice“, jejíž střední doba života je kratší než 10^{-20} s.

Rezonance vznikají při interakcích elementárních částic o vysokých energiích. Příčinou jejich krátké doby života je skutečnost, že se rozpadají pod vlivem **silné interakce**. (Částice rozpadající se vlivem **slabé interakce** mají dobu života podstatně delší, viz např. vlastnosti neutronu v kap. 2.1.3).

Poznámky:

- Původ názvu je ve skutečnosti, že **rezonance** vznikají pouze při srážce elementárních částic zcela určitých energií, resp. odpovídajících frekvencí, což připomíná klasické rezonanční jevy (např. mechanické a elektrické rezonanční jevy).
- Dosud je známo více než 100 mezonových a baryonových **rezonancí**.

Pro lepší orientaci shrňme výše uvedené informace ve formě tabulky, která je přehlednější.

LEPTONY	LEPTONY	Elektricky nabité leptony e, μ, τ Neutrína el. nabitých leptonů ν_e, ν_μ, ν_τ Vlastnosti: 1) částice bez další vnitřní struktury 2) neinteragují silně 3) fermiony se spinovým číslem 1/2
	MEZONY	Někteří zástupci: $\pi, K, D, B, \rho, \omega, \eta, J/\psi, Y \dots$ (Silně interagující bosony, složeny z páru kvark -antikvark)
HADRONY	BARYONY	Nukleony p, n Hyperony $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega \dots$ (Silně interagující fermiony, složeny ze tří kvarků)

Jak už bylo řečeno, částice je možné klasifikovat podle jejich fyzikálních charakteristik, některé už známe z *atomové* či *jaderné fyziky*, jiné charakteristiky bylo nutné doplnit později. Uveďme si jejich celkový přehled.

Fyzikální charakteristiky elementárních částic

jsou fyzikální veličiny nebo jim odpovídající *kvantová čísla* určující typ a stav *elementární částice*. Ve *fyzice elementárních částic* se dává přednost popisu stavu pomocí *kvantových čísel*. Mnohé nové fyzikální veličiny ve *fyzice elementárních částic* jsou zavedeny pouze ve formě *kvantového čísla*, tj. veličina je totožná s bezrozměrovým kvantovým číslem, např. *leptonové číslo*, *baryonové číslo*, *podivnost* aj.

Tyto nové veličiny, neznámé v klasické fyzice, byly zavedeny spolu s odpovídajícími *zákony zachování*, a to tak, aby vysvětlovaly, proč některé přeměny můžeme pozorovat a jiné nepozorujeme (teorie popisuje experimentální skutečnosti).

Klidová hmotnost částice m_0

je hmotnost částice měřená v souřadném systému, vůči němuž je částice v klidu. Představuje jednu ze základních vlastností částice.



Poznámky:

- Místo klidové hmotnosti se ve *fyzice elementárních částic* udává spíše hodnota *klidové energie* v MeV.
- Označení klidová se pro stručnost často vynechává.

**Klidová energie částice E_0**

je energie volné částice v klidu.

Je vázána s klidovou hmotností částice m_0 Einsteinovým vztahem $E_0 = m_0 c^2$, kde c je rychlost světla ve vakuu.

**Comptonova vlnová délka Λ**

je veličina charakterizující částici s **klidovou hmotností** m_0 . Je definována vztahem $\Lambda = \frac{h}{m_0 c}$, kde h je Planckova konstanta a c rychlost světla ve vakuu.

Poprvé byla tato veličina zavedena Comptonem pro elektron jako konstanta vystupující ve vztahu pro změnu vlnové délky fotonu při rozptylu na volném elektronu, viz Comptonův jev (1.díl učebního textu, kap. 1.2.4).

**Elektrický náboj Q**

se ve fyzice elementárních částic většinou vyjadřuje v násobcích elementárního elektrického náboje e .

Poznámky:

- S výjimkou **kvarků** se jedná o celočíselné násobky, tj. Ze .
- Je-li e chápán jako mimosoustavová jednotka, je velikost náboje totožná s příslušným kvantovým číslem Z , které se označuje jako **zobecněné protonové číslo**. Toto číslo získává význam protonového čísla pouze pro atomová jádra.

**Spin \vec{J}**

je vlastní moment hybnosti částice.

Poznámky:

- Velikost spinu je základní vlastností částice (jako např. klidová hmotnost nebo elektrický náboj). Není jej možno objasnit jako rotaci částice.
- Ve fyzice elementárních částic se značí nejčastěji \vec{J} (srovnej atomovou fyziku a spin elektronu).

Místo velikosti spinu $|\vec{J}|$ se při popisu částic používá **kvantové číslo** J zavedené vztahem

$$|\vec{J}| = \sqrt{J(J+1)}\hbar,$$

který je analogií vztahu pro orbitální moment hybnosti. J může nabývat hodnot 0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, ..., atd.

Hodnota J_z je kvantována podle vztahu

$$J_z = M_J \hbar,$$

kde M_J může nabývat hodnot $-J, -J+1, -J+2, -J+3, \dots, J-3, J-2, J-1, J$.

Poznámky:

- Částice s celočíselným J se označují jako **bosony**, ostatní částice s poločíselnými hodnotami J jako **fermiony**.
- Kromě velikosti spinu lze v kvantové mechanice určit pouze jednu komponentu spinu, např. z-ovou, tj. J_z .
- V odborné literatuře se označení „spin“ často používá v přeneseném významu pro obě kvantová čísla, tj. J a M_J .

Izotopický spin (izospin) \vec{T}

je abstraktní vektor, který je v kvantové fyzice definován analogicky jako **spin**. Jeho z-ová složka se používá k označení částic s blízkou **klidovou hmotností**, které patří do stejné skupiny, tzv. **izomultipletu**.



Ve vztazích pro z-ovou složku a velikost spinu se pouze nahradí značka spinu značkou izospinu a \hbar jedničkou. Pro velikost izospinu platí vztah

$$|\vec{T}| = \sqrt{T(T+1)},$$

kde T je **izospinové číslo**, z-ová komponenta izospinu T_z pak přímo představuje odpovídající kvantové číslo (analogie **magnetického spinového čísla**), proto se pro něj nezavádí speciální označení. T_z může nabývat hodnot $-T, -T+1, -T+2, \dots, T-2, T-1, T$. T_z se používá k označení jednotlivých částic v **izomultipletu**.

Poznámky:

- Pro stručnost se v literatuře používá označení „izospin“ pro obě kvantová čísla T i T_z (stejně jako u spinu).
- Nejčastější značka izospinu: \vec{T} ve fyzice elementárních částic, \vec{T} v jaderné fyzice.
- Odlišná značka izospinu v jaderné fyzice je vynucena tím, že \vec{T} se používá pro celkový moment hybnosti jádra, který je nutno odlišit od celkového momentu hybnosti atomového obalu \vec{J} . Zde jsme se pro konzistenci s jadernou fyzikou přidrželi značky \vec{T} .

Izomultiplet

je skupina částic (hadronů) s přibližně stejnou hmotností, ale s různými hodnotami elektrického náboje (a také různou hodnotu z-tové komponenty izospinu T_z).



Přiřazení hodnot T_z se provádí tak, že nejdříve určíme hodnotu T z počtu členů **izomultipletu**, který se musí rovnat jeho **multiplicitě**.



Multiplicita

(*izomultiplu*) $M = (2T+1)$ představuje počet možných hodnot T_z a tedy i počet členů izomultiplu.

Částice v *izomultiplu* seřadíme dle rostoucího elektrického náboje a přiřadíme jim postupně možné hodnoty T_z od nejmenší (pro nejmenší hodnotu elektrického náboje) až po největší (pro největší hodnotu elektrického náboje).

Předpokládá se, že malý rozdíl v hmotnostech částic je způsoben *elmg. interakcí*. Při myšleném „vypnutí“ elmg. interakce by měly všechny částice *izomultiplu* stejnou *klidovou hmotnost*, resp. klidovou energii (tzv. nábojová nezávislost silných interakcí, izotopická symetrie). Říkáme, že hladiny energie jsou degenerovány v *izospinu*. Proto můžeme všechny částice *izomultiplu* považovat za různé (*izospinové*) stavy jedné částice. K sejmutí degenerace v izospinu (jedná se o degeneraci hladin klidové energie) dochází až po myšleném „zapnutí“ elmg. interakce (analogie sejmutí degenerace ve spinu pro elektron v magnetickém poli při Zeemanově jevu).



Příklady izomultiplů

Známe např. nukleonový dublet (p,n), triplet pionů (π^+ , π^0 , π^-) aj.



Úkol k textu

Určete multiplicitu a velikost izospinu nukleonového dubletu a tripletu pionů. Jednotlivým částicím přiřaďte hodnotu T_z .

Další charakteristikou elementárních částic je *parita*, se kterou jsme se rovněž seznámili již v jaderné fyzice.



Parita

charakterizuje chování vícesložkové vlnové funkce, tzv. spinoru, fyzikálních systémů (tedy i elementárních částic) při *inverzi souřadnic*. Základní charakteristikou daného typu částice (např. nukleonu) je tzv. *vnitřní parita*.

Spinor Ψ si lze představit jako vícesložkový vektor. Pouze částice s nulovým spinem stačí popisovat jednou skalární funkcí. Např. i elektron je tedy nutno popisovat příslušným spinorem.



Spinor elektronu

Elektron musíme popisovat dvěma skalárními funkcemi – dvěma složkami *spinoru* $\begin{pmatrix} \Psi_{+1/2}(\vec{r}) \\ \Psi_{-1/2}(\vec{r}) \end{pmatrix}$, z nichž každá odpovídá stavu jedné ze dvou dovolených hodnot *magnetického spinového čísla* ($m_s = \pm 1/2$).

Předpokládejme, že se spinor transformuje při *inverzi* souřadnic tak, že platí

$$\Psi(-\vec{r}) = P \Psi(\vec{r}).$$

Aplikace *inverze* na *spinor* je ekvivalentní jeho násobení číslem P . Pokud tedy na *spinory* na obou stranách výše uvedené rovnice aplikujeme *inverzi* máme

$$\Psi(-(-\vec{r})) = P \Psi(-\vec{r})$$

a po úpravě

$$\Psi(\vec{r}) = P^2 \Psi(\vec{r}).$$

Musí tedy platit, že $P^2 = 1$, a tak $P = \pm 1$.

Veličina P se nazývá *parita* a „má dovoleno“ nabývat pouze dvou hodnot.

Dovolené hodnoty parity:

- Příklad $P = +1$ se označuje jako *sudá parita*.
- Příklad $P = -1$ se označuje jako *lichá parita*.

Orbitální parita a vnitřní parita

Pokud lze příslušný *spinor* závislý na souřadnicích napsat jakou součin konstantního spinoru nezávislého na souřadnicích a skalární funkce, která je funkcí souřadnic, můžeme v obou případech určit *paritu*. V prvním případě se označuje jako *vnitřní parita* (srovnej např. axiální a polární vektor), ve druhém případě jako *orbitální parita* (srovnej např. sudé a liché funkce).

Poznámka:

- Jako charakteristika elementárních částic se používá výhradně *vnitřní parita*, označení vnitřní se pro stručnost vynechává.

Už víte, že v *kvantové fyzice* je každé fyzikální veličině přiřazen *operátor*, který značíme stříškou. Výsledkem jeho působení na nějakou vlnovou funkci je obecně jiná vlnová funkce: $\hat{f}\Psi = \Phi$. Pokud se nám podaří najít vždy takovou funkci Ψ (tzv. *vlastní funkci*) a k ní číslo f (tzv. *vlastní hodnotu*) takové, že platí $\hat{f}\Psi = f\Psi$, můžeme při měření příslušné fyzikální veličiny naměřit přesnou hodnotu f (tzn. teoreticky dosáhnout nulové chyby neboli neurčitosti). Těchto vlastních hodnot může být více. Souboru všech možných vlastních hodnot říkáme *spektrum dovolených hodnot* fyzikální veličiny. Jiné přesné hodnoty, než jsou hodnoty z uvedeného spektra, nelze naměřit. Podíváme-li se na bezčasovou *Schrödingerovu rovnici*, zjistíme, že představuje výše uvedený typ úlohy. Hamiltonián \hat{H} je operátor energie, a proto z ní získáme spektrum dovolených energií – *energetické spektrum*. V případě *parity* je příslušným operátorem \hat{P} operátor *inverze* ($\hat{P}\Psi(\vec{r}) = \Psi(-\vec{r})$). Protože dvakrát aplikovaná *inverze* dává identitu, jejíž operátor má vlastní hodnotu 1, může vlastní hodnota operátoru inverze nabývat hodnot ± 1 (jak jsme si ukázali výše).



Střední doba života τ 

(stručně jen „doba života“) je doba, za kterou se rozpadne $1/e$ (e – Eulerovo číslo) původního množství daného druhu částic. Určuje se v soustavě, v níž je částice v klidu.

Má svou analogii i jinde, např. v jaderné fyzice (srovnej zákon radioaktivní přeměny a poločas přeměny).

**Úkol k textu**

Napište funkční závislost, která popisuje, jak s časem ubývá počet částic, pokud znáte jejich *střední dobu života* a počáteční množství. Závislost vyneste do grafu.

**Úkol k zamyšlení**

Proč se *střední doba života* částic určuje v klidové soustavě? Bude její hodnota stejná, pokud se částice bude vzhledem k pozorovateli pohybovat, nebo bude delší či kratší ?

**Leptonové číslo (leptonový náboj) L**

je kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. Je definováno tak, že nabývá hodnoty $+1$ pro leptony, -1 pro antileptony (viz *antičástice*) a 0 pro ostatní částice.

Podle standardních teorií musí platit *zákon zachování leptonového čísla*, tj. zachovává se rozdíl mezi počtem leptonů a antileptonů.

Zákon zachování leptonového čísla je pouze důsledkem nezávislých zákonů zachování příslušných leptonových čísel L_e , L_μ a L_τ (tj. elektronového, mionového a tauonového), která se zavádějí pro jednotlivé tzv. **generace leptonů** (sestavají z nabitého leptonu a jemu příslušné neutrino) a jim odpovídajících antileptonů podle analogického pravidla jako leptonové číslo, tj. pro daný typ leptonu a jemu příslušející neutrino nabývá hodnoty $+1$, pro příslušný antilepton a antineutrino -1 a 0 pro ostatní částice, tj. včetně jiných typů leptonů a jejich antineutrín. Pro leptonové číslo L pak podle této definice platí $L = L_e + L_\mu + L_\tau$.

**Baryonové číslo (baryonový náboj) B**

je další kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. Je definováno tak, že nabývá hodnoty $+1$ pro *baryony*, -1 pro *antibaryony* (viz *antičástice*) a 0 pro ostatní částice.

Podle standardních teorií musí platit *zákon zachování baryonového čísla*, tj. zachovává se rozdíl mezi počtem baryonů a antibaryonů.

**Hypernáboj Y**

je pro danou částici definován jako dvojnásobek střední hodnoty elektrického náboje izospinového multipletu, do něhož částice náleží.

Většina dalších charakteristik elementárních částic – *kvantových čísel* se zavádí spolu s příslušným *zákonem zachování* na základě poznatků získaných z experimentů s přeměnami elementárních částic. Pokud se zjistí, že některé přeměny se neuskutečňují, ač jim v tom dosud známé zákony zachování nebrání, znamená to, že existuje nová fyzikální veličina charakterizující příslušné částice, která se musí během jejich přeměn zachovat. Proces, který nespĺňuje takový zákon zachování, nemůže proběhnout. Takovým způsobem byly zavedeny *leptonová čísla* a *baryonové číslo*. Při experimentech s *kaony* byla objevena další nová charakteristika – *podivnost*.

Podivnost S

je kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. *Podivnost* se zachovává ve všech základních interakcích mimo slabé, kde dochází ke změně S o ± 1 .



Zákon zachování podivnosti patří ale k těm zákonům zachování, které jsou narušeny při přeměnách, které probíhají pod vlivem *slabé interakce*. Poprvé to předpověděli pro *zákon zachování parity* Lee a Jang v roce 1955. Stejně je to se zákonem zachování *izospinu*. Termín *narušení zákona* znamená, že zákon neplatí, jeho neplatnost je však určitým způsobem omezena. Například během jednotlivé přeměny se celková hodnota *podivnosti* může změnit nejvíc o jedničku.

Poznámky:

- Částice s nenulovou hodnotou podivnosti se označují jako **podivné částice**.
- Patří sem např. *kaony*.
- Název vznikl pro „podivné“ chování těchto částic při rozpadech pod vlivem slabé interakce, kde se nezachovává *izospin*.
- Tyto částice obsahují tzv. *podivný kvark* (kvark s).

Předesíláme, že *kvarky* jsou částice, ze kterých se skládají *hadrony*, a dozvíte se o nich v jedné z následujících kapitol.

Průvodce studiem

Pokud se vám už z těch nových kvantových čísel točí hlava, zkrátka začínáte-li v tom mít zmatek, můžete závěr této kapitoly klidně přeskočit. Chcete-li ovšem získat co nejúplnější přehled charakteristik elementárních částic, doporučujeme pročíst až do konce.





Půvab \mathcal{C}

je kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. **Půvab** se zachovává ve všech základních interakcích mimo slabé, kde dochází ke změně \mathcal{C} o ± 1 .

Poznámky:

- Částice s nenulovou hodnotou **půvabu** se označují jako **půvabné částice**.
- Patří sem např. **mezony D**.
- Tyto částice obsahují tzv. **půvabný kvark** (kvark c).

S pomocí **půvabného kvarku** se podařilo vysvětlit existenci částice J/ψ , resp. mezonu J/ψ , která byla objevena roku 1974 nezávisle dvěma laboratořemi, odtud původ kombinovaného značení J/ψ , které vzniklo spojením původně alternativních názvů J a ψ .

Krása \mathcal{B}

je kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. **Krása** se zachovává ve všech základních interakcích mimo slabé, kde dochází ke změně \mathcal{B} o ± 1 .

Poznámky:

- Částice s nenulovou hodnotou krásy se označují jako **krásné částice**.
- Patří sem např. **mezony B**.
- Tyto částice obsahují tzv. **krásný kvark** (kvark b).

S pomocí **krásného kvarku** se podařilo vysvětlit existenci částice Y (objevena roku 1977).

Pravda \mathcal{T}

je kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. **Pravda** se zachovává ve všech základních interakcích mimo slabé, kde má docházet ke změně \mathcal{T} o ± 1 .

Poznámky:

- Částice s nenulovou hodnotou pravdy se označují jako **pravdivé částice**.
- Zatím ale představují hypotetickou skupinu elementárních částic. Měly by to být částice ze skupiny hadronů. K produkci těchto částic zřejmě dosud nestačí energie současných urychlovačů.
- Tyto částice by měly obsahovat tzv. **pravdivý kvark** (kvark t).

Existence **pravdivého kvarku** byla nepřímo potvrzena v roce 1995 ve dvou nezávislých experimentech ve Fermiho národní laboratoři v USA. Zatím není vyjasněno, zda skutečně může vytvářet vázané stavy (mezony, baryony).

Vůně

je označení pro jednotlivé typy *kvarků*, tj. u, d, s, c, b, t (tj. celkem existuje 6 vůní).

Poznámka:

- Jelikož poslední čtyři typy (*vůně*) lze rozlišit od ostatních nenulovou hodnotou postupně podivnosti, půvabu, krásy a pravdy, hovoří se někdy alternativně o těchto kvantových číslech rovněž jako o *vůních* (kvarky u a d mají všechna tato kvantová čísla rovna nule a liší se opačnou hodnotou *z-tové komponenty izospinu*).

Barva (barevný náboj)

je kvantové „číslo“ (hodnotu barvy nebývá zvykem určovat číslem), které charakterizuje elementární částice. *Barva* může nabývat tyto hodnoty: červená, žlutá (resp. zelená), modrá pro *kvarky*, dále tři odpovídající *antibarvy* pro *antikvarky* a bílá (resp. bez barvy) pro ostatní částice.

Barvu kvarků bylo původně nutno zavést z toho důvodu, že některé *hadrony* se v rámci *kvarkové teorie* skládají ze stejných typů *kvarků*, tj. *vůní kvarků*. Jelikož *kvarky* jsou *fermiony*, znamená to vzhledem k platnosti *Pauliho vylučovacího principu*, že kromě vůně musí existovat ještě další kvantová charakteristika, která odliší stavy jinak identických kvarků.

Baryony se skládají ze tří kvarků, to znamená, že až tři mohou být stejné *vůně* (např. hyperon Ω^-), odtud vyplývá nutnost existence nejméně tří různých hodnot barvy. To bylo též potvrzeno měřením účinného průřezu procesů anihilace částic přes kanály s produkcí *kvarků*, který by v opačném případě byl třikrát menší. Protože pro jiné částice než *kvarky* taková charakteristika není pozorována (nulová hodnota), byly v analogii s teorií barev zvoleny tři základní *barvy*, jejichž složením vzniká bílá (bezbarvá) částice. V daném případě to odpovídá *baryonu*, který je složen ze tří kvarků různých barev. Rovněž složením *barvy* a *antibarvy* dostaneme bílou (bezbarvou) částici. Tento případ odpovídá *mezonu* (složen z *kvarku* a *antikvarku*).

Teorií vzájemné interakce kvarků (tj. silné interakce) se zabývá **kvantová chromodynamika** (z řečtiny chromos = barevný), která je analogií *kvantové elektrodynamiky*. Podle této teorie je nositelem silné interakce 8 *gluonů*, které „přenášejí“ barvu. *Kvark*, který emituje nebo pohltí *gluon*, změní svou barvu (nikoliv *vůni*).

Úkol k zamyšlení

Vidíte, že pojem *barva kvarků* má úplně jiný význam, než v jakém ho běžně používáme. Rozmyslete si, zda má smysl mluvit o barvě kvarků nebo elementárních částic v tomto běžném smyslu.



2.4.2 ANTIČÁSTICE

K libovolné elementární částici existuje *antičástice*, která je rovněž elementární částicí a která má určité fyzikální charakteristiky shodné s danou elementární částicí a jiné fyzikální charakteristiky opačného znaménka, resp. směru.



Antičástice

- má stejnou klidovou hmotnost či klidovou energii jako jí příslušející částice, ale také např. hodnotu *spinového kvantového čísla*.
- má opačnou hodnotu elektrického náboje, ale také opačný směr vlastního magnetického momentu vzhledem k *vlastnímu momentu hybnosti*, dále také opačné hodnoty *leptonových čísel* a *baryonového čísla*.

Pokud jsou všechny fyzikální charakteristiky spadající do druhé z uvedených skupin charakteristik nulové, nelze částici a antičástici odlišit žádnou fyzikální vlastností. Částice je v tomto případě totožná se svou antičásticí, hovoříme též o **skutečně neutrální částici**. Stručně se označuje jako **neutrální částice**, v tomto případě je třeba rozlišovat neutrální částici a např. **elektricky neutrální částici**, u které je nulový pouze *elektrický náboj*.



Příklad neutrální částice

Skutečně neutrální částicí je *foton*. *Neutron* je pouze elektricky neutrální. *Neutron* a *antineutron* můžeme rozlišit např. právě směrem magnetického momentu.

Pár částice a jí odpovídající antičástice může zanikat a vznikat, pokud jsou splněny příslušné zákony zachování. Ve fyzice elementárních částic hovoříme o *anihilaci* a *kreaci páru částice-antičástice*. Pouze v případě *anihilace* či *kreace* částic v *párech částice – antičástice* jsou automaticky splněny *zákony zachování* charakteristik z druhé skupiny.



Anihilace částic

je proces přeměny páru částice-antičástice na jiné částice. Tento původní pár zaniká (*anihiluje*) a dává vzniknout jiným typům částic.

Původní typ částic zaniká, současně vzniká jiný typ částic. Při každém procesu, *anihilaci* nevyjímaje, musí být splněny *zákony zachování*. Nejčastěji se uvádí případ přeměny páru částice-antičástice látky (např. *elektronu* a *pozitronu*) na *fotony*, tj. na částice elmg. pole. Dochází tedy k přeměně formy hmoty. Látka se mění na pole. Často se tento proces zvláště v populárně vědecké literatuře nepřesně interpretuje jako zánik hmoty a vznik „čisté“ energie. Ve skutečnosti musí platit *zákon zachování energie* a tedy i *hmotnosti*. Splněny musí být též další zákony zachování. Proces inverzní k *anihilaci* se označuje jako *kreace*.



Kreace částic

Jde o přeměnu částic se vznikem (*kreací*) nového páru částice-antičástice.

K produkci páru dochází při interakci částice s jinou částicí (např. produkce páru $e^+ + e^-$ může nastat v poli jádra nebo elektronu).

Ze zákona **zachování energie** plyne nutná podmínka pro tvorbu páru částice-antičástice s klidovou hmotností m_0 . Pro celkovou energii částic před kreací E musí platit

$$E \geq 2m_0c^2,$$

kde c je rychlost světla ve vakuu. Samozřejmě, že to není podmínka postačující, jelikož musí být splněny také další zákony zachování, např. **zákon zachování hybnosti**.

Úkol k textu

Předpokládejte, že **elektron** a **pozitron**, které se nachází v těsné blízkosti a jsou v klidu, popřípadě se proti sobě pohybují stejnou, avšak vzhledem k rychlosti světla zanedbatelnou rychlostí, anihilují. Může při tomto procesu vzniknout jediný foton? Ověřte na základě platnosti zákonů zachování: elektrického náboje, leptonového čísla, energie a hybnosti.



Zajímavou otázkou je, zda se **antičástice** chovají stejně jako **částice**. Původně se předpokládalo, že fyzikální děje probíhají stejně pro částice i pro antičástice, tj. jsou symetrické k operaci **nábojové konjugace C** (též **nábojové sdružení**). Totéž se předpokládalo o **paritě P** (resp. reflexi). Ukázalo se ale, že ani jeden ze zákonů není univerzálně platný. Dochází k jejich narušení v případě slabých interakcí. Dalším krokem bylo navržení platnosti **kombinované symetrie CP** pro reálné děje. Přestože tato kombinovaná symetrie je ve většině případů dobře splněna, pozoruje se stále určité narušení této symetrie. Proto byla tato kombinovaná symetrie CP doplněna o **inverzi času T**.

CPT teorem

„Probíhá-li v přírodě nějaký (reálný) děj, pak současným zrcadlením tohoto děje v prostoru, obrácením jeho chodu v čase a záměnou částic za antičástice dostaneme opět reálný (tj. dovolený) děj.“



Dle současných poznatků je symetrie CPT splněna bez výjimky.

2.4.3 KVARKOVÝ MODEL HADRONŮ

Fyzikové se snažili prozkoumat vlastnosti a stavbu **hadronů**. Prováděli různé experimenty s rozptylem **leptonů**, nejčastěji **elektronů**, na hadronech. **Leptony** se uvnitř **hadronů** rozptylovaly na bodových objektech s nábojem a bez náboje, které se chovaly jako volné. Tyto bodové objekty byly označeny jako **partony**. Prokázala se tak existence vnitřní struktury **hadronů**.

Poznámka:

- *Parton* je historický pojem a dnes se již nepoužívá.

Na druhé straně existovala snaha zjednodušit složitý systém *hadronů*. Jednou možností byla tzv. *kvarková hypotéza*.

**Kvarková hypotéza**

Hadrony se skládají z částic – *kvarků*, jejichž náboj je zlomkem ($1/3$ nebo $2/3$) *elementárního elektrického náboje* e .

Kvarková hypotéza elegantně vysvětlovala původně pouze s pomocí tří kvarků (v současnosti to je 6 kvarků) systém tehdy známých *hadronů*. Zpočátku nebyla ale přijímána, a to zejména ze dvou důvodů.

Důvody počátečního odmítání kvarkové hypotézy:

- *Kvarky* nebyly pozorovány jako volné částice.
- *Kvarky* se nedařilo ztotožnit s *partony* uvnitř hadronů.

Existence volných kvarků

Jak víme, *kvarková hypotéza* předpokládala, že elektrický náboj kvarků je zlomkem elementárního elektrického náboje. V žádném známém experimentu ale nebyly pozorovány změny náboje menší než e . Při srážkách částic a jejich přeměnách nebyly pozorovány částice, které by měly příslušné zlomkové náboje. Dalo se to vysvětlit jedině tak, že *kvarky* jsou velmi silně vázány uvnitř *hadronů*. Tento předpoklad ale na první pohled nekorespondoval s pozorovanými vlastnostmi *partonů*.

Kvarky a partony

Vazebná energie *kvarků* musí být mnohem větší než kinetické energie částic dosažitelné na současných urychlovačích. *Partony* se při rozptylových experimentech naopak chovají jako volné. Silně vázané kvarky a volné partony – to se zdálo být neslučitelné. Tento rozpor byl ale objasněn představou *asymptotické volnosti kvarků*.

Asymptotická volnost kvarků

Přitažlivá interakce *kvarků* má neobvyklou závislost na vzdálenosti. Síla interakce v přírodě obvykle se vzdáleností klesá (a nemusí jít vždy o fyzikální interakci). V případě interakce *kvarků* se naopak předpokládá, že pro blízké kvarky (uvnitř *hadronů*) je malá a ty se chovají jako volné, pro rostoucí vzdálenost *kvarků* (snaha o uvolnění kvarku) prudce roste.

Na základě této hypotézy bylo možné ztotožnit kvarky s *nabitými partony*. *Partony* bez elektrického náboje bylo možné ztotožnit s *gluony*, které zprostředkovávají silnou interakci mezi *kvarky*.

Experimentální ověření kvarkové hypotézy

I když *kvarky* dosud nebyly pozorovány jako volné, byly všechny prokázány nepřímou, a to experimentálním ověřením předpovědí *kvarkové teorie*, které se týkají přeměn *hadronů*.

Typy (vůně) kvarků

Dnes známe celkem 6 kvarků:

- u (*up*, „nahoru“, protonový),
- d (*down*, „dolů“, neutronový),
- s (*strange*, „podivný“),
- c (*charm*, „působivý“),
- b (*bottom*, beautiful, „krásný“),
- t (*top*, truthful, „pravdivý“).

Poznámka:

- Původní teorie zavedla pouze první tři typy (vůně) kvarků: protonový u, neutronový d a podivný s.

Shrnutí vlastností kvarků



- Podle současných znalostí se jedná o *bezstrukturní* (bodové) *částice*, z nichž jsou složeny *hadrony*.
- Jejich *elektrický náboj* je roven zlomkovým hodnotám elementárního elektrického náboje e : $-1/3 e$ u kvarků d, s, b; $2/3 e$ u kvarků u, c, t..
- Jsou to *fermiony* se spinovým kvantovým číslem $1/2$.
- *Kvarky* jsou v *hadronech* vázány velmi pevně prostřednictvím *silné interakce*. Odhad *vazebné energie* je 10^{12} GeV (*kvarky* nelze uvolnit). Síla interakce mezi *kvarky* je však velmi malá při jejich bezprostřední blízkosti (*asymptotická volnost*) a teprve s jejich rostoucí vzdáleností prudce stoupá.
- V rámci moderního systému částic představují *kvarky* spolu s *leptony* *základní částice*, z nichž je složena *látka*.

Vazebná energie kvarků je z hlediska dnešních možností urychlovačů prakticky „nekonečně velká“, a proto nejsou pozorovány jako volné částice. V současné době je *kvarková teorie* běžně fyziky přijímána i bez tohoto přímého

experimentálního důkazu, protože výrazně zjednodušuje systém elementárních částic. Navíc není v rozporu s existujícími experimentálními poznatky, naopak existují nepřímé důkazy její správnosti.

Struktura hadronů

Mezony jsou tvořeny dvojicí kvark-antikvark. **Baryony** jsou tvořeny třemi kvarky, které mohou být tří různých barev. **Hadrony** vzniklé složením kvarků „nemají barvu“ (resp. mají „bílou barvu“).



Struktura nukleonů

Proton je složen ze dvou **kvarků** *u* a jednoho *d*, neutron naopak ze dvou **kvarků** *d* a jednoho *u*.

Interakce kvarků

Interakce mezi kvarky se označuje jako silná interakce a patří mezi čtyři základní fyzikální interakce. Silná interakce mezi kvarky je zprostředkována **gluony**. Popisem silné interakce mezi kvarky se zabývá **kvantová chromodynamika** (popisuje interakce kvarku s barevným nábojem, viz **barva**), která je analogií kvantové elektrodynamiky pro částice interagující elektromagneticky (částice s elektrickým nábojem nebo magnetickým momentem). **Silná interakce** mezi **hadrony** (např. jaderné síly mezi nukleony) je pouze zbytkovým projevem silné interakce mezi kvarky (podobně jako disperzní síly mezi molekulami jsou zbytkovým projevem elektromagnetické interakce mezi atomy v molekule, která je podstatou chemické vazby).



Průvodce studiem

Pokud vás zajímají skutečnosti, na jejichž základě fyzikové vytvořili kvarkovou hypotézu, dočtěte tuto kapitolu do konce.



Kvarková teorie vycházela ze snah vysvětlit uspořádání **hadronů** do tzv. **unitárních supermultiplétů**, které jsou určitou obdobou, či spíše rozšířením pojmu **izospinových multiplétů**.

Unitární supermultiplét

- Je to vlastně multiplét **izomultiplétů**. Částice různých **izomultiplétů** v **supermultiplétu** se jen málo liší ve svých klidových hmotnostech, i když podstatně více než v rámci jednotlivých **izomultiplétů**.
- Částice v daném supermultiplétu mají stejný **spin** a **paritu**.
- Jednotlivé **izomultipléty** v **supermultiplétu** lze odlišit hodnotou **hypernáboje**, který je pro částice v daném **izomultiplétu** stejný.

Například pro *baryony* činí rozdíl hmotností v sousedních *izomultipletech supermultipletu* asi 10% jejich hmotnosti. Analogicky jako u *izomultipletů* se předpokládá, že tento rozdíl v hmotnostech je způsoben částí *silné interakce*, která se označuje jako *středně silná interakce* a je asi 10 krát slabší než zbývající *silná interakce*.

Při myšleném „vypnutí“ *elektromagnetické* i *středně silné interakce* mají všechny částice *supermultipletu* stejnou klidovou hmotnost, resp. klidovou energii (degenerace v izospinu i hypernáboji). Proto můžeme všechny částice supermultipletu považovat za různé *izospinové a hypernábojové stavy* jedné částice. Při zapnutí *středně silné interakce* dochází k sejmutí degenerace v *hypernáboji* (srovnej *izomultiplet*). Zbývající část silné interakce je nábojově nezávislá (na elektrickém náboji i hypernáboji, *hypernábojová symetrie*).

Supermultiplet je jedním ze základních pojmů *unitární teorie*. Staví na něm *kvarková teorie* (*supermultiplet* částic bylo možno složit z *tripletů*, které odpovídaly původně třem *kvarkům* u, d a s).

2.4.4 SOUČASNÝ SYSTÉM ZÁKLADNÍCH ČÁSTIC A ZÁKLADNÍCH FYZIKÁLNÍCH INTERAKCÍ

V současné době známe celkem 12 *základních částic látky* (a 12 jejich antičástic), k nim se ale přiřazují *základní částice pole*, které zprostředkovávají *základní fyzikální interakce*. Jako základní částice se označují elementární částice, u kterých nebyla pozorována další vnitřní struktura.

Základní částice látky

Leptony – nepůsobí na ně *silná interakce* (mohou působit zbývající *základní fyzikální interakce*).

Elektricky nabité leptony: elektron, mion, tauon

Elektricky neutrální leptony: elektronové, mionové a taunové neutrino.

Kvarky – působí na ně *silná interakce* (a mohou působit i zbývající *základní fyzikální interakce*).

Znamé kvarky: up u, down d, strange s, charm c, top t, bottom b.



Poznámky:

- *Základními částicemi* látky je tedy 6 *leptonů* a 6 *kvarků* (a jejich antičástice).
- *Základní částice* látky jsou *fermiony* se *spinovým číslem* $\frac{1}{2}$.



Základní fyzikální interakce

Označujeme tak ve fyzice nejjednodušší typ vzájemného silového působení mezi částicemi. V současné době jsou známy **čtyři základní fyzikální interakce**:

- *gravitační interakce*,
- *elektromagnetická interakce*,
- *silná interakce*,
- *slabá interakce*.

Všechny síly působící mezi hmotnými objekty jsou důsledkem *základních fyzikálních interakcí*.

V rámci nových fyzikálních teorií dochází postupně k sjednocení teoretického popisu *základních fyzikálních interakcí*.



Gravitační interakce

Projevuje se univerzálně mezi všemi typy hmotných objektů, tedy i mezi elementárními částicemi všech typů. Síly působící mezi těmito objekty závisí na jejich *hmotnosti* a jejím rozložení v prostoru. *Dosah gravitační interakce* je nekonečně velký. Síla gravitačního působení klesá se vzdáleností interagujících objektů až na nulovou hodnotu pro nekonečně vzdálené objekty. Je to nejslabší známá interakce.

V *klasické (nerelativistické a nekvantové) fyzice* je silové pole *gravitační interakce* popsáno *Newtonovým gravitačním zákonem*. V *relativistické fyzice (nekvantové)* pak *Einsteinovými rovnicemi*, které vycházejí z představy zakřiveného prostoročasu (tzv. obecná teorie relativity).

Z pohledu *kvantové fyziky* je gravitační interakce zprostředkována elementárními částicemi - *gravitony* (tzv. kvanta gravitačního pole). Tyto částice nebyly zatím prokázány experimentálně.

V *mikrokosmu* (v mikroskopickém měřítku) gravitační interakce jen málo ovlivňuje pohyb částic, a proto se při popisu chování elementárních částic většinou zanedbává. V *megakosmu* (ve velkém měřítku srovnatelném s rozměry kosmických objektů) gravitační interakce naopak dominuje. Důvodem je velká hmotnost kosmických objektů ve vesmíru (planety, hvězdy, galaxie, skupiny galaxií), která není kompenzována, protože neexistuje záporná (gravitační) *hmotnost*, resp. tzv. antigravitace. Srovnej s *elektromagnetickou interakcí*.

Slabá interakce

Projevuje se univerzálně u všech typů elementárních částic. Na rozdíl od ostatních tří *typů základních fyzikálních interakcí* nevytváří slabá interakce žádné vázané stabilní systémy částic, ale projevuje se pouze rozpadem elementárních částic. *Slabá interakce* je po gravitační interakci druhá nejslabší známá interakce. Má jen **velmi malý dosah**, který je řádově 10^{-18} m.



Poznámka:

- Slabá interakce způsobuje například *přeměnu beta*.

Při rozpadech částic pod vlivem *slabé interakce* dochází často k tzv. *narušení symetrie*, resp. porušení některých *zákonů zachování* (např. *zákon zachování parity, inverze času, nábojového sdružení, izospinu, podivnosti, hypernáboje a půvabu*).

Kvantem slabé interakce jsou tzv. *intermediální bosony*, které byly předpovězeny *teorií elektroslabé interakce* a experimentálně potvrzeny v roce 1983.

Elektromagnetická interakce

Prostřednictvím této interakce na sebe mohou objekty silově působit pouze tehdy, pokud mají nenulový elektrický náboj nebo *magnetický moment*. Po *silné interakci* je to druhá nejsilnější interakce. Obdobně jako u *gravitační interakce* je její **dosah nekonečně velký** a velikost jejího silového působení klesá se vzdáleností až na nulovou hodnotu pro nekonečně vzdálené interagující objekty.



Na rozdíl od gravitační interakce se neuplatňuje v megakosmu, protože dochází ke kompenzaci jejího silového působení z důvodu existence dvou znamének elektrického náboje (náboje opačného znaménka se přitahují, což spolu se skutečností, že velikost působících sil je přímo úměrná velikosti elektrického náboje objektu, vede k vytváření elektroneutrálních systémů).

Elektromagnetická interakce má největší škálu projevů (např. zajišťuje soudržnost *atomů*, projevuje se významně ve formě různých typů *chemické vazby* aj.).

Analogií *Newtonova gravitačního zákona* je Coulombův zákon elektrostatiky. V rámci *klasické relativistické* (i *nerelativistické*) *fyziky* (tj. *nekvantové*) se elektromagnetické pole popisuje *Maxwellovými rovnicemi*.

Kvantový popis *elektromagnetického pole* je možný teprve v rámci *kvantové teorie pole*. Zprostředkující částice - kvantum elektromagnetického pole je **foton**.

V rámci *teorie elektroslabé interakce* se podařilo sjednotit popis elektromagnetické a slabé interakce.



Silná interakce

Tato interakce váže *kvarky v hadronech*, jejím *zbytkovým projevem* je silové působení mezi *hadrony* (včetně *jaderných sil*). *Leptony* silně interagovat nemohou. Je to nejsilnější známá interakce. *Silná interakce* mezi *hadrony* je krátkého dosahu (zhruba 10^{-15} m). *Silná interakce* mezi *kvarky* má nekonečný dosah. Na vzdálenostech přesahujících lineární rozměry *hadronů* roste přitažlivá síla na z dnešního pohledu prakticky neomezenou hodnotu, zatímco v těsné blízkosti je relativně malá (*asymptotická volnost*).

Poznámky:

- Ještě jednou zdůrazněme, že tato interakce existuje pouze u *hadronů*, resp. *kvarků*.
- Někdy se *silná interakce* nepřesně ztotožňuje s pojmem *jaderné interakce* (viz *jaderné síly*), což má historické důvody. Poprvé se fyzikové s projevy této interakce setkali v atomovém jádře. Z dnešního pohledu je *základní fyzikální interakcí silná interakce* mezi *kvarky*. *Silná interakce* mezi *hadrony* a tedy i *jaderné síly* jsou pouze tzv. *zbytkovým projevem* této *silné interakce* mezi *kvarky* uvnitř *hadronů* (*nukleonů* v případě *jaderných sil*).

V *kvantové teorii pole* můžeme pole *silné interakce* popsat pomocí *kvant*. V případě *silné interakce* mezi *kvarky* jsou kvantem pole nové částice - *gluony*.

Podobně jako v případě částic (kap. 2.4.1) uveďme přehled základních fyzikálních interakcí ve formě přehledné tabulky.

ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ INTERAKCE

Typ interakce	Relativní síla	Dosah [m]
elektromagnetická	10^{-2}	∞
gravitační	10^{-38}	∞
slabá	10^{-13}	10^{-18}
silná	1	10^{-15} ∞ (hadrony) (kvarky)

Základní částice pole

Interakce částic lze popsat *fyzikálním polem*, které je v *kvantové teorii pole* popsáno pomocí částic – *kvant pole*. Silové působení interakce je pak možno vysvětlit jako výměnu tzv. *virtuálních kvant pole* – *zprostředkujících částic*. V případě *základních fyzikálních interakcí* to jsou tzv. *základní částice pole*:

- *gravitony* pro *gravitační interakci*,
- *foton* pro *elektromagnetickou interakci*,
- *intermediální bosony* pro *slabou interakci*,
- *gluony* pro *silnou interakci*.



Graviton

je hypotetickou částicí, která dosud nebyla potvrzena.



Foton

Jeho podstatu a vlastnosti již známe naopak velmi dobře (viz *fotonová hypotéza*, 1.díl učebních textů, kap. 1.2.3).



Intermediální bosony

Jde o elementární částice zprostředkovávající slabou interakci. Existují celkem tři *intermediální bosony* W^+ , W^- (elektricky nabitě) a Z^0 (neutrální). Patří do skupiny tzv. *vektorových bosonů* (tj. *bosonů* se spinovým kvantovým číslem 1), kam patří např. i *foton*. Spolu s fotonem představují kvanta *elektroslabé interakce*. Na rozdíl od fotonu mají *intermediální bosony* nenulovou *klidovou hmotnost*, což souvisí s konečným dosahem *slabé interakce*.



Jedná se o velmi „těžké“ částice (jsou těžší než běžné *baryony*). W má hmotnost srovnatelnou s hmotností jádra rubidia, hmotnost Z^0 odpovídá asi hmotnosti molybdenu. Intermediální bosony byly předpovězeny v rámci sjednocující *teorie elektroslabé interakce*. Již dříve rozpracovanou teorii prosadili S. Weinberg a A. Salam v letech 1967 - 68, matematické základy nové teorie vybudoval v roce 1971 holandský fyzik G. Hooft. *Teorie elektroslabé interakce* byla jednou z prvních úspěšných *sjednocujících teorií*.

Intermediální bosony byly experimentálně potvrzeny v CERNu (Evropské středisko pro jaderný výzkum) na jaře roku 1983 dvěma nezávislými vědeckými kolektivy, které vedli C. Rubbia a P. Darriulat. C. Rubbia a S. van der Meer získali za objev Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1984. Částice W byly identifikovány podle rozpadu na elektron a neutrino, částice Z rozpadu buď na pár elektron-pozitron nebo mion-antimion.



Gluony

Jsou to částice, které zprostředkovávají *silnou interakci* mezi *kvarky*. Patří podobně jako *foton* a *intermediální bosony* mezi *vektorové bosony* (tj. *bosony* se *spinovým kvantovým číslem* 1). Mají nulovou klidovou hmotnost a nesou tzv. *barvu*, resp. *barevný náboj*. Nemají však *elektrický náboj*.

Stejně jako *kvarky* nejsou *gluony* pozorovány volné, prokázány jsou však nepřímo (shodou předpovědí *kvarkové* teorie s experimentem). *Gluony* lze zřejmě ztotožnit s *partony* bez elektrického náboje.

Současný systém *základních částic* vypadá tedy takto:

ZÁKLADNÍ ČÁSTICE

LÁTKY

POLE

LEPTONY

e <u>elektron</u> náboj $-e$	μ <u>mion</u> náboj $-e$	τ <u>tauon</u> náboj $-e$
ν_e <u>elektronové</u> <u>neutrino</u> bez náboje	ν_μ <u>mionové</u> <u>neutrino</u> bez náboje	ν_τ <u>taunové</u> <u>neutrino</u> bez náboje

KVARKY

u <u>up</u> náboj $2/3 e$	c <u>charm</u> náboj $2/3 e$	t <u>truth</u> náboj $2/3 e$
d <u>down</u> náboj $-1/3 e$	s <u>strange</u> náboj $-1/3 e$	b <u>beauty</u> náboj $-1/3 e$

γ foton
G ? graviton
W^\pm, Z^0 intermediální bosony
g gluony (8)

I.

II.

III.

Generace

KVANTA POLÍ

(zprostředkující
částice interakcí)

Tento systém představuje jeden z úspěchů ve snahách o jednotný pohled na svět.

Sjednocující teorie (unitární teorie)

Jsou to fyzikální teorie, které se snaží o jednotný popis fyzikálních interakcí a jednotný pohled na stavbu elementárních částic.

Základ snah o sjednocení popisu interakcí můžeme nalézt už v Maxwellově teorii elmg. pole, která spojila popis elektrických a magnetických jevů. Einsteinovy snahy o sjednocení popisu elmg. a gravitační interakce na bázi představ zakřivení prostoročasu skončily neúspěchem, navíc z dnešního pohledu měla tato Einsteinova teorie závažný nedostatek spočívající v nezahrnutí kvantového popisu zmíněných interakcí.

V současné době je úspěšně završeno *sjednocení elektromagnetické a slabé interakce* v *teorii elektroslabé interakce*. Dále se předpokládá sjednocení popisu *elektromagnetické, slabé i silné interakce* v *teorii velkého sjednocení* (GUT - *grand unitary theory*). Zatím neúspěšné jsou pokusy o jednotný popis všech interakcí (tj. včetně gravitace) v rámci *teorie supergravitace*. Zjednodušení popisu stavby látky bylo dosaženo pomocí *kvarkové teorie*. Současné teorie *elementárních částic* a jejich interakcí vychází z existence *základních částic* a jejich vlastností. Ty jsou v rámci těchto standardních teorií postulovaným faktem, jež vychází z experimentu. Nejnovější teorií, která by mohla být elegantním řešením těchto otázek, je *teorie strun*. Podle jedné z variant této teorie není náš časoprostor pouze čtyřrozměrný (tři prostorové souřadnice a čas), ale má rozměrů celkem deset. Ovšem kromě zmíněných čtyř rozměrů se všechny zbývající smrskly do uzavřených smyček neuvěřitelně malého rozměru. Základními objekty takového prostoru nejsou bodové částice, ale tzv. *struny*, které mohou kmitat pouze určitými způsoby (*módy*), z nichž každý odpovídá existenci určitého typu částic. *Teorie strun* se ovšem teprve rozvíjí, a tak se zřejmě ještě dlouho nedočkáme její definitivní podoby. Navíc příslušné rovnice je v řadě případů obtížné řešit, a proto zatím tato teorie dokáže vysvětlit méně experimentálních skutečností než (*klasická*) *kvantová teorie* a na ní založený *standardní model* částic a jejich interakcí.

Průvodce studiem

Fyzika elementárních částic je jedním z nejbouřlivěji se rozvíjejících fyzikálních oborů. Stav, který jsme vám velmi hrubě a navíc i poněkud nepřesně nastínili v posledním odstavci, už tedy nebude aktuální v době, kdy budete číst tyto řádky. Neznamená to však, že je třeba zatratit všechny informace této kapitoly. Opět připomínáme, že nová teorie není popřením těch experimentálních skutečností, které objasňovala teorie stará.



**Test**

Vyberte správná tvrzení (podrobný návod je uveden v testu na konci první kapitoly), označte je v tabulce za úkolem a srovnajte se správným řešením z klíče.

Úkol 10.

- A. Pouze celočíselné spinové číslo mají
- B. Pouze poločíselné spinové číslo (liché násobky 1/2) mají
- C. Celočíselné i poločíselné spinové číslo mají
- D. Mohou interagovat gravitačně
- E. Mohou interagovat elektromagneticky
- F. Mohou interagovat slabě
- G. Mohou interagovat silně
- H. Dle dnešních poznatků jsou bez další vnitřní struktury
- I. Další vnitřní strukturu mají (nebo mohou mít)
- J. Elektron patří mezi
- K. Mion patří mezi
- L. Tauon patří mezi
- M. Neutrino patří mezi
- N. Piony patří mezi
- O. Kaony patří mezi
- P. Proton patří mezi
- Q. Neutron patří mezi
- R. Pozitron patří mezi

- a) leptony
- b) hadrony
- c) mezony
- d) baryony
- e) nukleony
- f) bosony
- g) fermiony
- h) fotony

Tabulka pro označení správných odpovědí k úkolu 10:

10.									10.								
A	a	b	c	d	e	f	g	h	I	a	b	c	d	e	f	g	h
B	a	b	c	d	e	f	g	h	J	a	b	c	d	e	f	g	h
C	a	b	c	d	e	f	g	h	K	a	b	c	d	e	f	g	h
D	a	b	c	d	e	f	g	h	L	a	b	c	d	e	f	g	h
E	a	b	c	d	e	f	g	h	M	a	b	c	d	e	f	g	h
F	a	b	c	d	e	f	g	h	O	a	b	c	d	e	f	g	h
G	a	b	c	d	e	f	g	h	P	a	b	c	d	e	f	g	h
H	a	b	c	d	e	f	g	h	Q	a	b	c	d	e	f	g	h
I	a	b	c	d	e	f	g	h	R	a	b	c	d	e	f	g	h

Úkol 11.

- A. Konečný dosah mají
 B. Nekonečný dosah mají
 C. Nejsilnější je
 D. Nejslabší je
 E. Atomy v molekule drží vlivem
 F. Elektron v atomu drží vlivem
 G. Nutí vodu téci z kopce
 H. Nukleony v jádře drží vlivem
 I. Rozpad beta probíhá vlivem
 J. Planetu drží pohromadě
 K. Jaderná interakce je zbytkovým projevem
 L. Foton je kvantem pole
 M. Mezon π je kvantem pole
 N. Gluon je kvantem pole
 O. Graviton je kvantem pole
 P. Intermediální boson je kvantem pole
 Q. Mezi základní fyzikální interakce patří

- a) slabá interakce
 b) silná interakce mezi hadrony
 c) jaderná interakce (jaderné síly)
 d) silná interakce mezi kvarky
 e) elektromagnetická interakce
 f) gravitační interakce

Tabulka pro označení správných odpovědí k úkolu 11:

11.A	a	b	c	d	e	f
11.B	a	b	c	d	e	f
11.C	a	b	c	d	e	f
11.D	a	b	c	d	e	f
11.E	a	b	c	d	e	f
11.F	a	b	c	d	e	f
11.G	a	b	c	d	e	f
11.H	a	b	c	d	e	f
11.I	a	b	c	d	e	f
11.J	a	b	c	d	e	f
11.K	a	b	c	d	e	f
11.L	a	b	c	d	e	f
11.M	a	b	c	d	e	f
11.N	a	b	c	d	e	f
11.O	a	b	c	d	e	f
11.P	a	b	c	d	e	f
11.Q	a	b	c	d	e	f



Otázky

1. **Elementární částice.** Objasněte pojem elementární částice. Uveďte základní rozdělení elementárních částic. Uveďte typické vlastnosti jednotlivých skupin částic. Uveďte zástupce jednotlivých skupin a jejich základní charakteristiky. Jakým způsobem je možné částice detekovat?
2. **Charakteristiky elementárních částic.** Uveďte základní fyzikální charakteristiky elementárních částic a jejich definice i jednotky. Objasněte význam jednotlivých charakteristik, zejména v případě , že nemají klasickou analogii.
3. **Zákony zachování.** Uveďte zákony zachování, které musí být splněny při přeměnách elementárních částic. Uveďte znění zákona a zapište jej pomocí rovnice. U každého zákona zachování uveďte definici zachovávaných se veličiny a její jednotku. Dále uveďte podmínky platnosti jednotlivých zákonů. Srovnajte se zákony zachování v jaderných reakcích.
4. **Antičástice.** Objasněte pojem antičástice. Uveďte, které charakteristiky antičástice jsou stejné jako u částice a které mají opačné znaménko. Objasněte pojmy (skutečně) neutrální částice a elektricky neutrální částice a uveďte příklady. Objasněte pojmy kreace a anihilace částic. Uveďte podmínky, za kterých k těmto procesům může dojít – které zákony zachování musí být splněny. Rozeberte tvrzení používané zejména v populárněvědecké literatuře: “Hmota se mění na čistou energii“ z hlediska Einsteinova vztahu ekvivalence hmotnosti a energie.
5. **Kvarková hypotéza.** Vysvětlete experimentální východiska a základní předpoklady kvarkové hypotézy. Vysvětlete vztah pojmů parton a kvark. Objasněte pojem asymptotické volnosti kvarků. Uveďte známé kvarky a jejich charakteristiky. Objasněte pojem barva kvarku. Stručně popište kvarkovou strukturu nukleonů a mezonů π .
6. **Systém základních částic a základní fyzikální interakce.** Popište současný systém základních částic. Uveďte základní částice látky. Uveďte typické vlastnosti jednotlivých skupin. Vyjmenujte zástupce jednotlivých skupin a uveďte jejich vlastnosti. Uveďte základní fyzikální interakce. Seřadte tyto interakce podle relativní síly. Uveďte dosah jednotlivých interakcí. Uveďte zprostředkující částice jednotlivých interakcí. Odvoďte přibližný vztah mezi hmotností zprostředkující částice a dosahem interakce. Uveďte příklady fyzikálních systémů a procesů, při kterých se významně uplatňují jednotlivé typy interakcí. Objasněte pojem sjednocování interakcí.



Korespondenční úkol

Zpracujte písemně otázky zadané tutorem, řiďte se přitom jeho pokyny.



Shrnutí kapitoly

Fyzika elementárních částic je fyzikální obor zabývající se studiem vlastností elementárních částic, jejich přeměn a vzájemných interakcí.

Částice dělíme z pohledu statistické a kvantové fyziky na fermiony a bosony podle hodnot jejich spinových čísel.

Z pohledu fyziky elementárních částic rozlišujeme leptony bez vnitřní struktury, na které nepůsobí silná interakce, a hadrony, které se skládají z kvarků a interagují silně. Fermiony ze skupiny hadronů označujeme jako baryony, z nichž nejjednodušší jsou nukleony. Bosony ze skupiny hadronů označujeme jako mezony.

Částicím je možné přiřadit řadu fyzikálních charakteristik, z nichž některé jsou známy z klasické nekvantové fyziky, mnoho dalších nemá klasickou analogii nebo se dokonce zavádí pouze ve formě kvantového čísla. Nové charakteristiky jsou zaváděny spolu s nově objevenými zákony zachování těchto veličin. Zejména pod vlivem slabých interakcí jsou ale některé tyto zákony slabě narušeny.

Ke každé částici existuje její antičástice, jejíž určité charakteristiky, jako např. klidová hmotnost, jsou stejné, jiné, jako např. elektrický náboj, mají opačnou hodnotu. V některých případech je však částice a antičástice totožná. Například se to týká fotonu. Částice může vznikat nebo zanikat v páru se svou antičásticí. Hovoříme o kreaci a anihilaci částic. Energie je ovšem při těchto procesech zachována.

Kvarková teorie objasňuje strukturu hadronů. Zprvu byla přijímána s rozpaky, protože dávala některé nezvyklé předpovědi, jako je např. elektrický náboj kvarků rovný zlomkům elementárního elektrického náboje, a navíc se kvarky dosud nepodařilo pozorovat volně. Dnes je ovšem již všeobecně přijata, protože její předpovědi v případě přeměn elementárních částic jsou ve shodě s experimentem. Současný systém základních částic je tvořen částicemi látky a částicemi pole. Za základní částice látky se považuje šest leptonů, šest kvarků a jim odpovídající antičástice.

Částice na sebe mohou působit čtyřmi typy základních fyzikálních interakcí: gravitační, elektromagnetickou, silnou a slabou. Příslušná kvanta polí těchto interakcí představují základní částice pole. Jedná se o dosud neobjevené gravitony v případě gravitačního pole, fotony v případě elektromagnetického pole, intermediální bosony pro pole slabých interakcí a gluony zprostředkovávající silnou interakci mezi kvarky.

Ve fyzice elementárních částic pokračují snahy o sjednocení popisu jednotlivých interakcí. Úspěšně zatím byla sjednocena slabá a elektromagnetická interakce.

Fyzika elementárních částic je bouřlivě se rozvíjející obor, a tak mnohé informace rychle zastarají.

