

Rozdělení částic

Elementární částice můžeme dělit buď podle "rodové příslušnosti" na *leptony*, *kvarky*, *intermediální částice* a *Higgsovy částice* nebo podle statistického chování na *fermiony* a *bosony*.

Dělení částic podle "rodové" příslušnosti

- **Leptony:**

Elektron a jeho neutrino ve třech generačních provedeních a samozřejmě jejich antičástice. Bez vnitřní struktury. Všechny podléhají slabé interakci, elektrony i interakci elektromagnetické.

- **Kvarky:**

Částice, ze kterých jsou tvořeny těžké částice s vnitřní strukturou (například proton, neutron a mezony). Opět existují ve třech generacích, podléhají interakci silné, slabé i elektromagnetické.

- **Intermediální částice:**

Částice zprostředkující interakce. Pro elektromagnetickou interakci jde o foton, pro slabou interakci o částice W^+ , W^- , Z^0 , pro silnou interakci existuje 8 gluonů a pro gravitační interakci zatím nenalezený graviton.

- **Higgsovy částice:**

Zatím nenalezené částice, které v teoriích způsobují narušení symetrie a nenulovou hmotnost intermediálních bosonů W^+ , W^- a Z^0 slabé interakce.

Dělení částic podle statistického chování

- **Fermiony**

- *Mají poločíselný spin* (všechny leptony a kvarky, všechny baryony - například elektron, neutrino, proton, neutron, Δ baryony Λ hyperon ...).
- Splňují *Pauliho vylučovací princip*: "Dvě částice nemohou být nikdy ve stejném kvantovém stavu". Právě proto různé elektrony v atomovém obalu zaujímají různé kvantové stavy a tím vytvářejí různorodé chování chemických prvků.
- Vlnová funkce více částic je *antisymetrická*.
- Podléhají *Fermi-Diracově* statistice.
- Kreační operátory fermionů splňují *antikomutační* relace.

- **Bosony**
 - Mají celočíselný spin (všechny skalární i vektorové mezony, foton, W^+ , W^- , Z^0 , ...).
 - Nesplňují Pauliho vylučovací princip. Při nízkých teplotách má každý boson ze systému tendenci zaujmout nejnižší energetický stav. Vzniká tzv. *bosonový kondenzát*, který může mít supravodivé a supratekuté vlastnosti. Soustava elektronů by nikdy nemohla být supravodivá - jde o fermiony splňující Pauliho vylučovací princip. Při snižování teploty dojde nejprve k pospojování elektronů do dvojic - Cooperových párů, které jako bosony již mohou mít supravodivé vlastnosti.
 - Vlnová funkce více částic je *symetrická*.
 - Podléhají Bose-Einsteinově statistice.
 - Kreační operátory bosonů splňují komutační relace.

Leptony (elektrony a neutrina)

Seznamme se nyní s první rodinou elementárních částic, s *leptony*. Jde o elektron a jeho příbuzné. U leptonů nepozorujeme žádnou vnitřní strukturu. Spin všech těchto částic je $1/2$ a jde tedy o fermiony. Všechny leptony interagují slabou interakcí a neinteragují silně. Nabité leptony (**elektrony**) interagují navíc elektromagneticky, což způsobuje intenzivní interakci s hmotou. Nenabitě leptony (**neutrina**) interagují s hmotou velmi slabě. Přesto jich je v našem okolí značné množství. Tok *slunečních neutrin* se u naší Země odhaduje na 70×10^9 v $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. V každém cm^3 je navíc 300 *reliktních neutrin* z období oddělení neutrin od ostatní hmoty v době cca 1 s po Velkém třesku. Při interakci kosmického záření s atmosférou vznikají asi 20 km nad zemí tzv. *atmosférická neutrina*. Žijeme tak v hustém neutrinovém moři, které s námi minimálně interaguje. Pro neutrina je celá Země zcela průhledná a neutrina s jejími atomy zainteragují jen zcela výjimečně.

Leptony (lehké částice bez struktury)

- **Elektron e^-** : Jde o první objevenou elementární částici vůbec. Je stabilní. Hmotnost elektronu je $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kg a elektrický náboj elektronu je $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C. Rozdílné chování různých atomů je způsobeno rozdílnou konfigurací elektronových obalů. Makroskopický pohyb elektronů vnímáme jako elektrický proud. Elektron objevil lord Thomson v roce 1897. Antičástici elektronu - **pozitron** - teoreticky předpověděl P.A.M. Dirac v roce 1928 ještě před jeho objevením.
- **Elektronové neutрино ν_e** : Věrný souputník elektronu. Všude tam, kde při různých slabých rozpadech částic vznikne elektron, vzniká i jeho neutрино (přesněji antineutrino). Jde o částici velmi malé hmotnosti (snad nulové) která interagovala s hmotou jen slabou

interakcí, snadno proto hmotou proniká. Neutrino bylo objeveno při β rozpadu neutronu $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_n$ (elektron a proton jako produkty rozpadu neodnášely veškerou původní energii a hybnost). Jeho existenci předpověděl W. Pauli v roce 1930. Název neutrino mu dal Enrico Fermi po objevu neutronu v roce 1932 (v italštině znamená neutrino malý neutron). Jeho existence byla potvrzena v roce 1956 v jaderné elektrárně Savannah River v Jižní Karolině (F. Reines, L. Cowan).

- **Mion μ^-** : Jde o těžký elektron. Tato částice se chová velmi podobně jako elektron. Má hmotnost $207 m_e$. Doba života je přibližně 2×10^{-6} s. Potom se těžký elektron rozpadá na normální elektron a neutrino: $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. Mion je stejně jako jeho dvojník elektron schopen vytvořit vázaný stav s protonem, tzv. *mionium* (vodík s mionem v obalu místo elektronu). Mion se vyskytuje v kosmickém záření a do zemské atmosféry vstupuje s relativistickými rychlostmi. Vzhledem ke své době života by neměl nikdy dopadnout na zemský povrch. Díky dilataci času však mion z hlediska pozorovatele na Zemi žije "déle" a má dosti času, aby dopadl na povrch Země. Z hlediska mionu se Země "přibližuje" relativistickou rychlostí a díky kontrakci vzdálenosti nemusí mion k povrchu Země uletět takovou vzdálenost. Vidíme, že z hlediska obou souřadnicových soustav (spojených se Zemí nebo s mionem) je výsledek stejný, mion dopadne na povrch Země.

- **Mionové neutrino ν_μ** : Podobně jako elektronové neutrino doprovází při slabých rozpadech elektron, doprovází mionové neutrino mion. Má podobné vlastnosti jako neutrino elektronové. Mionové neutrino objevili T. D. Lee a C. N. Yang v roce 1962 na urychlovači v Brookhavenu (Long Island, USA). V roce 1998 byla nalezena jeho nenulová hmotnost na aparatuře Super Kamiokande v Japonsku: $m_\nu - m_e \cong 0,07$ eV.

- **Tauon τ^-** : Jde o supertěžký elektron. Má hmotnost $3\,484 m_e$. Byl objeven v roce 1977 Martinem Perlem.. Jde o nestabilní částici s dobou života 3×10^{-13} s. Rozpadá se na své lehčí dvojníky (elektron nebo mion) a neutrina.

- **Tauonové neutrino ν_τ** : Doprovází tauon při slabých procesech. Bylo objeveno v laboratoři Fermilab v roce 1999.

V následující tabulce jsou uvedena základní fakta o leptonech:

Částice	Hmotnost	Doba života	Rok objvu
e	0,51 MeV ($1 m_e$)	-	1897
μ	105,7 MeV ($207 m_e$)	2×10^{-6} s	1937

τ	1777 MeV (3484 m_e)	3×10^{-13} s	1977
ν_e	?		1956
ν_μ	$\sim 0,07$ eV		1962
ν_τ	?		1999

Často hovoříme o generacích neboli pokoleních leptonů. První generaci tvoří obyčejný elektron se svým neutrinem - částice běžné ve světě kolem nás. Druhá generace je mion se svým neutrinem. Na Zemi se vyskytují zřídka, zpravidla pocházejí z kosmického záření. Třetí generace leptonů - tauon se svým neutrinem - sehrála svoji roli za extrémních podmínek vzniku Vesmíru. Dnes tyto částice dokážeme uměle připravit na urychlovačích. K těmto třem generacím leptonů přísluší i antičástice. Celková tabulka leptonů tedy je:

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$

Naskytá se otázka, zda může existovat nějaký supersupertěžký elektron 4. nebo i 5. generace. Je to značně nepravděpodobné. Navíc leptony páté a vyšší generace nemohou existovat z kosmologických důvodů. Tyto leptony by ovlivnily chování Vesmíru při jeho vzniku a Vesmír by dnes vypadal jinak. Při větším počtu generací, by se Vesmír rozpínal rychleji a nebyl by dostatek času na vytvoření pozorovaného množství lehkých prvků.

V červnu 1998 byla na aparatuře Super-Kamiokande objevena anizotropie mionových neutrin vzniklých z kosmického záření v atmosféře, která znamená nenulovou hmotnost mionového neutrina $0,07 \pm 0,04$ eV. Tato anizotropie je způsobena tzv. oscilacemi neutrin. Při svém letu se neutrina přeměňují z jedné formy na druhou. Neutrino je chvíli mionové, chvíli tauonové, možná i elektronové. (Tato proměna by například na slunečních neutrinech měla proběhnout každých 1000 km.) Oscilace jsou možné jen při nenulové hmotnosti mionového neutrina. Aparatura Super-Kamiokande je největším neutrinovým dalekohledem na světě. Je postavena v Japonsku v blízkosti vesničky Kamioka, 1700 m pod povrchem hory Ikeno Jama ve starém zinkovém dole. Jde o válcovou nádrž o průměru 34 m a výšce 36 m obsahující 32 000 tun vody. Atmosférická neutrina vznikají v horních vrstvách atmosféry při rozpadu pionů a mionů. Některá neutrina v nádrži reagují s protony a neutrony, mění se na elektrony a miony (ty se dále rozpadají na elektrony). Pohyb vzniklých elektronů a mionů je nadsvětelný a je doprovázen charakteristickým Čerenkovovým zářením, které je detekováno 13 000 fotonásobiči na vnitřním povrchu nádoby. Aparatura zachytí v průměru jedno neutrino za hodinu a půl.

Právě na oscilaci neutrin byl celý experiment založen. Neutrina přicházející skrze celou zeměkouli prodělala oscilace, na rozdíl od neutrin přicházejících ze zenitu, které prošly "jen" 2 km zeminy. To způsobuje anizotropii v rozložení detekovaných mionových neutrin, která byla spolehlivě měřena.

Kvarky

Na konci 50. a v průběhu 60. let se fyzikové pokoušeli vysvětlit podstatu silné interakce i chování tzv. těžkých částic (*hadronů*) pomocí různých modelů. Jejich název pochází z řeckého „hadros“, což znamená „těžký, silný“. Tyto částice podléhají působení silné (jaderné) interakce. Mezi nejznámější hadrony patří částice tvořící atomové jádro - *proton* a *neutron*, které nazýváme souhrnně *nukleony*.

Tyto snahy vyústily v kvarkový model navržený nezávisle M. Gell-Mannem a G. Zweigem v roce 1964. Dnes podle tohoto modelu předpokládáme, že *hadrony* jsou tvořeny z šestice kvarků a šestice antikvarků, které korespondují s šesticí leptonů a šesticí antileptonů. V roce 1969 bylo na lineárním urychlovači SLAC ve Stanfordu v rozptylových experimentech potvrzeno, že se protony skutečně skládají z elementárnějších komponent - kvarků *d* a *u*. Kvark *s* byl nalezen zanedlouho. Kvark *c* byl objeven ve vázaných stavech charmonia J/ψ dvěma nezávislými skupinami v roce 1974. Částici J našla skupina vedená Tingem na protonovém urychlovači v Brookhavenu v experimentech s fixovaným terčem a stejnou částicí pod názvem ψ našla skupina vedená Richterem na kolideru SPEAR ve Stanfordu (objev vešel do dějin jako listopadová J/ψ revoluce). V roce 1976 byly objeveny vázané stavy kvarku *b*. Dlouho očekávaná existence posledního kvarku *t* byla potvrzena až v roce 1994 v laboratoři Fermilab.



Kvarky Gell-Mann nazval podle románu Jamese Joyce „Smuteční hostina na počest Finnegana“ (Finnegans Wake). Hrdina románu vidí ve snu racky, kteří při letu za lodí křičí: „Tři kvarky pro pana Marka“. Toto podivné slovo se v románu již nikde jinde nevyskytuje... Sám Gell-Mann zavedl první čtveřici kvarků, vymyslel pro ně nejen jména, ale přiřadil jim i jejich „obrázky“:

<i>d</i>	down kvark „ <i>dolů</i> “
<i>u</i>	up kvark „ <i>nahoru</i> “
<i>s</i>	strange „ <i>podivný</i> “ kvark
<i>c</i>	charm „ <i>přívabný</i> “ kvark
<i>b</i>	beauty „ <i>krásný</i> “ kvark
<i>t</i>	truth „ <i>pravdivý</i> “ kvark

Podobně jako leptony řadíme kvarky do generací, tj. první generaci tvoří kvarky (d, u) běžně se vyskytující v přírodě a jejich antikvarky. Druhou generaci (s, c) nacházíme v částicích kosmického záření (*kaonech*, Λ *hyperonech*, ...) a třetí generaci (b, t) dokážeme připravit uměle na urychlovačích. Tyto částice byly hojné při vysoce energetických procesech krátce po vzniku Vesmíru. Kvarky třetí generace se také někdy nazývají *bottom* a *top* (dolní a horní). Základní vlastnosti kvarků jsou v následující tabulce:

kvark	spin	baryonové číslo	náboj	hmotnost	rok objevu
d	1/2	1/3	- 1/3	7 MeV	1969
u	1/2	1/3	+ 2/3	5 MeV	1969
s	1/2	1/3	- 1/3	150 MeV	1969
c	1/2	1/3	+ 2/3	1,4 GeV	1974
b	1/2	1/3	- 1/3	4,3 GeV	1976
t	1/2	1/3	+ 2/3	176 GeV	1994

Kvarky mají bodovou strukturu až do rozměrů 10^{-18} m (tisícina velikosti protonu). V roce 1996 byly ve Fermilabu provedeny rozptylové experimenty, které naznačují, že by kvarky mohly být složeny z dalších částic, tzv. preonů. První preonový model byl vytvořen Salamem a Patim již v roce 1974. Každý kvark či lepton by měl být tvořen ze tří částic: *somonu* (3 druhy, určuje generaci, nulový náboj), *flavonu* (2 druhy, určuje vůni "dolní" či "horní", náboj $\pm 1/2$) a *chromonu* (4 druhy, určuje barvu, náboj $\pm 1/6$). Dohromady získáme $3 \times 2 \times 4 = 24$ částic, 12 leptonů a 12 kvarků.

Problémy modelu: Preony musely zaujímat prostor menší než 10^{-18} m a z Heisenbergových relací by musely mít značnou hybnost. Leptony a kvarky by měly větší hmotnost než mají. Nadvětelné preony by ale přinesly zápornou hmotnost a za cenu ztráty kauzality bychom dostali správné hmotnosti.

Z kvarků lze vytvořit dvě skupiny částic:

- **mezony:** jsou složeny z jednoho kvarku a jednoho antikvarku
- **baryony:** jsou složeny ze tří kvarků

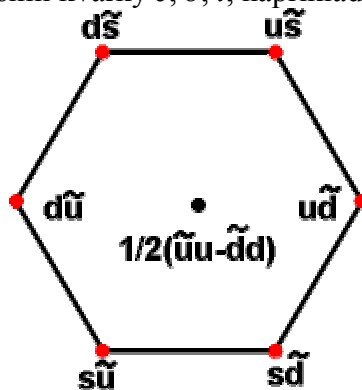
Mezony (složené z kvarku a antikvarku):

- *Skalární mezony:* Spin kvarků je orientován naopak a výsledný spin mezonu je nulový ($s = 0$)
- *Vektorové mezony:* Spin kvarků je orientován souhlasně a výsledný spin mezonu je roven jedné ($s = 1$)

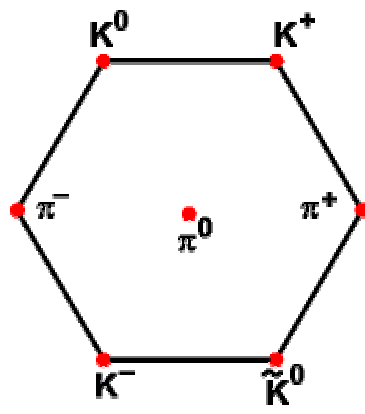
Možné kombinace kvarků se často zakreslují do přehledných diagramů.

Mezony jsou složeny z kvarku a antikvarku. Baryony jsou složeny z tří kvarků.

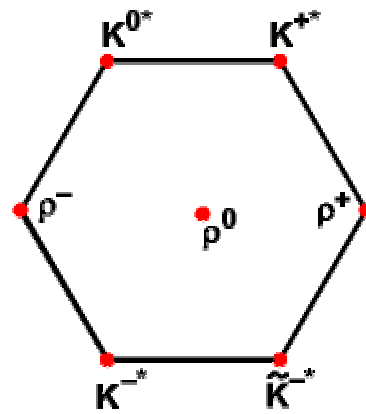
elektromagnetický náboj částice, ve směru nahoru klesá počet podivných kvarků, neboli roste podivnost. Podivnost s kvarku je -1 , podivnost \bar{s} antikvarku je $+1$. Kombinaci kvarků ve středu diagramu je třeba chápat jako kombinaci kvantových stavů. Běžný svět první generace složený z kvarků (d, u) a jejich antikvarků je v prostřední linii diagramů. Jde o nejznámější mezony π se spinem 0 a ρ se spinem 1. Mezony ρ jsou ve skutečnosti rezonance s dobou života cca 10^{-23} s. Mezony obsahující s kvark se nazývají K mezony (*kaony*) a byly poprvé nalezeny ve 40. letech v kosmickém záření, v 50. letech byly připraveny uměle na urychlovačích. Vznikají při procesech ovlivňovaných silnou interakcí, rozpadají se slabou interakcí. Nejdelší dobu života má mezon K_0 : 5×10^{-8} s. Existují a lze vytvořit i mezony s dalšími kvarky c, b, t , například charmonium $c\bar{c}$.



kvarková konfigurace



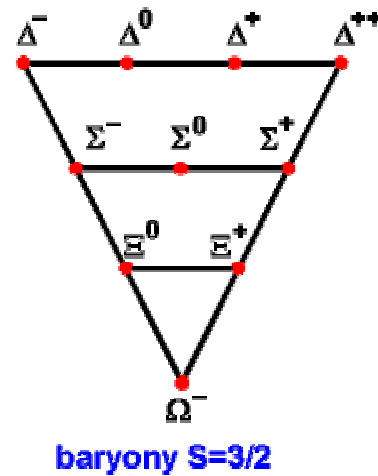
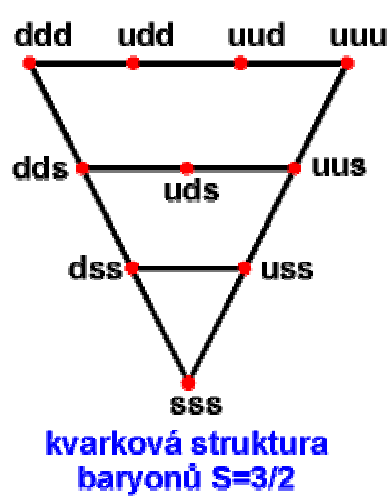
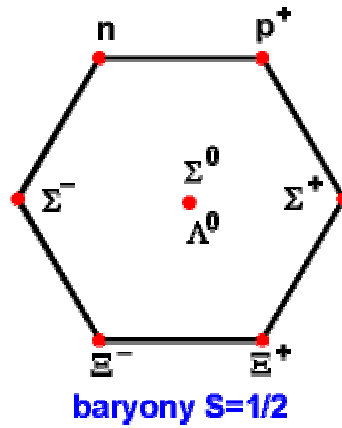
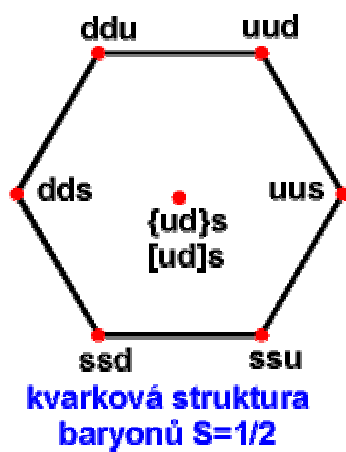
odpovídající skalární mezony (S=0)



odpovídající vektorové mezony (S=1)

Baryony (složené ze tří kvarků):

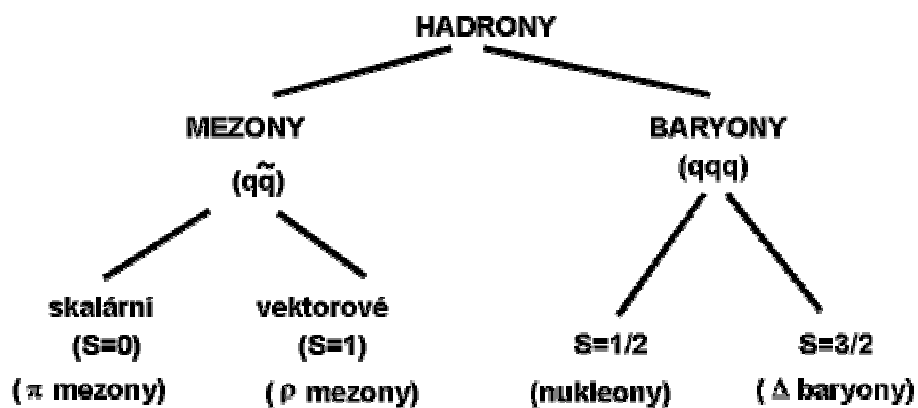
Tři kvarky lze kombinovat tak, že výsledný spin je roven $1/2$ nebo $3/2$. Podle toho je možné z kvarků d, u, s zkombinovat tyto baryony:



Tentokrát jsou běžně se vyskytující částice složené z první generace kvarků v 1. řádku diagramu (neobsahují s kvark). Jde o *nukleony* se spinem $1/2$ - (*neutron* a *proton*) a Δ částice se spinem $3/2$. Δ baryony jsou rezonance s dobou života 10^{-23} s. Rozpadají se na nukleony a π mezony. Jde o nejlehčí baryonové rezonance. Baryony obsahující s kvark se nazývají *hyperony*, patří k nim Λ hyperon, Σ hyperony, Ξ hyperony a Ω hyperon.

Přehled částic složených z kvarků

Z kvarků v základním stavu (s nulovým orbitálním momentem hybnosti) lze tedy sestavit tyto částice:



podivné mezony (obsahují s kvark) - K mezony, kaony

podivné baryony (obsahují s kvark) - hyperony

exotické mezony (obsahují c, b, t kvark)

exotické baryony (obsahují c, b, t kvark)

Existuje mnoho hadronů, obsahujících kvarky c , b , t , a hadronů složených z kvarků, které nejsou v základním stavu. První byly objeveny v sedmdesátých letech na urychlovačích. Těmito částicemi se v základním přehledu nebudeme zabývat, uvedeme jen některé na ukázkou:

$c\bar{c}$ charmonium (1974)

$c\bar{u}$ D^0

$c\bar{d}$ D^+

$c\bar{s}$ F^+

$b\bar{b}$ ypsilononium (1977)

$b\bar{u}$ B^-

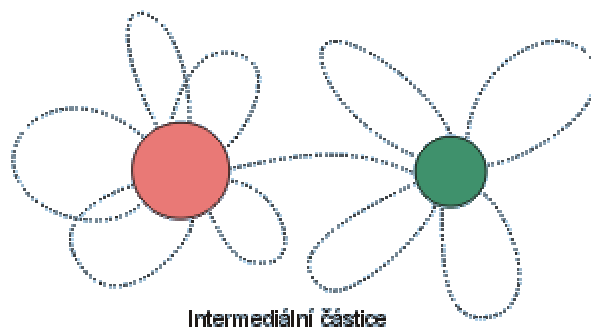
$b\bar{d}$ B^0

Intermediální částice

V přírodě známe čtyři druhy interakcí:

- **Elektromagnetická interakce:** Působí jen na částice s elektromagnetickým nábojem (elektrony, protony, nabitě piony, ...). Interakce má nekonečný dosah, působí i na velké vzdálenosti.
- **Slabá interakce:** Působí na leptony i hadrony. Zodpovídá za relativně pomalé rozpady částic (například β rozpad neutronu, rozpad mionu). Jde o interakci krátkého dosahu do vzdáleností srovnatelných s rozměry atomového jádra.
- **Silná interakce:** Působí jen na hadrony. Jde o sílu, která spojuje kvarky v mezony a baryony; sílu, která udržuje pohromadě neutrony a protony v atomovém jádře a sílu, způsobující některé rychlé rozpady elementárních částic. Jde opět o interakci krátkého dosahu do vzdáleností srovnatelných s rozměry atomového jádra.
- **Gravitační interakce:** Působí na všechny částice bez rozdílu, má nekonečný dosah. Odpovídá za strukturu Vesmíru (pohyby planet, soudržnost galaxií, celkový vývoj Vesmíru).

Podle představ kvantové teorie pole (P. A. M. Dirac, R. Feynman a další) probíhá interakce dvou částic tak, že si vymění tzv. intermediální (mezipůsobící, polní, výměnnou) částici.



Každá částice podléhající interakci je obklopena oblakem těchto intermediálních částic. Pojem pole (elektromagnetické, slabé, silné, gravitační) tak neznámá nic jiného než tento oblak intermediálních částic. Jde o tyto částice:

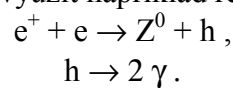
elektromagnetická interakce	foton
slabá interakce	W^+ , W^- , Z^0
silná interakce	8 gluonů
gravitační interakce	graviton (dosud neobjeven)

Každá elektricky nabitá částice je tedy obklopena fotony (elektromagnetickým polem), každý kvark je obklopen gluony (gluonovým - silným polem). Gluony vytvářejí kolem kvarku jakýsi

těžký gluonový kožich, jeho hmotnost dokonce několikanásobně přesahuje hmotnost samotného kvarku.

Higgsovy částice

Jde o zatím nenalezené částice, které by v přírodě měly způsobovat spontánní narušení symetrie elektroslabé interakce $SU(2) \times U(1)_{loc}$. Podstatnou úlohu hrají v teorii elektroslabé interakce, kde způsobují nenulovou hmotnost intermediálních částic slabé interakce a její konečný dosah. Tyto částice také měly rozhodnou měrou ovlivnit počáteční fáze našeho Vesmíru. Vytvářejí vakuový kondenzát v celém Vesmíru, který může odstartovat inflační vývojovou fázi Vesmíru. Spin částic je nulový, předpokládaná hmotnost leží v intervalu $m_h < 2m_Z$. Po částicích se intenzivně pátrá a měly by být detekovatelné v současné době stavěnými urychlovači. K detekci lze využít například reakce



Částicové multiplety

Částice se často vyskytují jako skupiny velmi podobných částic, které nazýváme multiplety (dublet nukleonů, triplet pionů, kvadruplet Δ baryonů, atd.) Tyto částice lze chápat jako kvantové stavy jediné částice, které se liší projekcí veličiny nazývané *izospin*. Multipletu přiřadíme *hypernáboj* Y (dvojnásobek průměrného elektrického náboje multipletu) a *izospin* $T = (N - 1)/2$ (N je počet částic v multipletu). Projekce izospinu do jednotlivých částic potom je

$$T_3 = Q - Y/2.$$

Podobně jako u spinu může hodnota projekce izospinu nabývat $2T + 1$ hodnot

$$T_3 = -T, -T + 1, \dots, T-1, T.$$

Příklad: Δ kvadruplet, $Y = 1$, $T = 3/2$

$$\Delta^- \quad Q = -1 \quad T_3 = -3/2$$

$$\Delta^0 \quad Q = 0 \quad T_3 = -1/2$$

$$\Delta^+ \quad Q = +1 \quad T_3 = +1/2$$

$$\Delta^{++} \quad Q = +2 \quad T_3 = +3/2$$

Seznam literatury:

Úlehla, I., Suk, M., Trka, Z.: Atomy jádra částice. Praha 1990.

Beiser, A.: Úvod do moderní fyzika. Praha 1975.

Internet:

www.aldebaran.cz