

Mikrosvět (III)

V dalších dvou dílech seriálu o současném stavu fyziky vysokých energií se setkáme s jedním z mocných pomocníků fyziků při řešení problémů - symetriemi. A právě vztah symetrií, rodin částic a existence *t*-kvarku bude předmětem tohoto dílu.

Úvod

V minulém dílu jsme se zabývali tzv. slabou interakcí a objevem intermedialních bosonů, částic, které tuto interakci zprostředkují.

V tomto dílu půjde o interakci silnou a kvarky - částice tvořící, jak jsme si již řekli v prvním díle našeho seriálu¹, nejen značnou část hmoty, ze které jsme sami složeni a která nás obklopuje, tj. protony a neutrony, ale i velké množství částic dalších.

Jak je již naším dobrým zvykem, ve výkladu budeme postupovat krok po kroku a začneme snad překvapivě ... symetriemi.

Symetrie

O symetrii hovoříme pokud při určité změně (např. souřadnic, předmětů) zůstane popis reality (objektu, soustavy) nezměněn.

V běžném životě se se symetriemi setkáváme na každém kroku. Běžná lžice má symetrii pravolevou, talíř kruhovou, gumový dětský balónek je krásně kulatý.

Symetrické obrazce uvidíme i v případě obyčejné kuchyňské soli, jejíž krystaly mají tvar kostek, nebo sněhové vločky, která je tvořena krystalky ledu.

Symetrie existují i ve světě elementárních částic. Např. proton (*p*) a neutron (*n*) jsou částice vzájemně velmi podobné². Hmotnost protonu je asi jen o 1% menší nežli hmotnost neutronu, obě částice mají stejnou velikost spinu, obě reagují na silnou interakci a viditelně se liší jen velikostí elektrického náboje. Můžeme si tudíž představit, že neutron a proton nejsou, v případě že by nedocházelo k elektro-magnetické interakci, částice dvě, ale jen jedna, která se chová někdy jako proton a jindy jako neutron. Proto při popisu jakékoliv situace, ve které se obě částice mohou vyskytnout, musíme jejich podobnost vzít do úvahy a rovnice popisující chování obou částic pak budou symetrické vůči jejich vzájemné záměně.

Pokud by obě částice byly stejně těžké a el.-mg. interakce „vypnuta“, symetrie by byla úplná a my bychom mohli v principu uvažovat částici půl na půl - 50% neutron a 50% proton, či namíchat jakoukoliv jinou kombinaci, viz obrázek (I),

příčemž velikost protonové resp. neutronové ingredience vyplývá z poměru dílů rozdělené úsečky.

(I)

Symetrii mezi protonem a neutronem říkáme izospinová symetrie a kvantovému číslu s ní spojenému **izospin**; izospin = izotopický či přesněji izobarický spin. Tento název si fyzikové nezvolili náhodně a vyplývá jednak z matematické ekvivalentnosti popisu spinu a izospinu (např. elektron existuje ve dvou stavech s hodnotou spinu³ -1/2 a +1/2), jednak z již zmíněné představy, že proton a neutron jsou dva stavy jedné částice - nukleonu. V zavedené terminologii je proton nukleonem s hodnotou izospinu +1/2, neutron -1/2. Fyzikálně jsou ovšem spin a izospin naprosto odlišné veličiny.

Podobná situace, kdy existuje více částic, které mají prakticky shodné vlastnosti (až na hodnotu el. náboje) nastává také v dalších případech, např. tripletu pionů π^-, π^0, π^+ , ρ -mezonů ρ^-, ρ^0, ρ^+ , nebo kvadrupletu baryonů $\Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$.

Proč ale předchozí výklad o podobnosti částic je tak důležitý?

Džungle elementárních částic

V roce 1901 fyzikové věděli o existenci jen dvou objektů, kterým dnes říkáme elementární částice: elektronu a protonu. Postupem doby byl nalezen neutron (1932, Chadwick), pozitron (1932, Anderson) a mezon π (1947, Powell), částice zprostředkující podle původní Yukawovy teorie silnou interakci, bylo předpovězeno neutrino (Pauli), a tak se krátkou dobu v období roku 1947 zdálo, že hlavní problémy fyziky elementárních částic byly vyřešeny. Vysvětlilo se, že částice nalezená v roce 1937 a považovaná původně (s problémy) za zprostředkovatele silné interakce je ve skutečnosti tzv. mion (μ), který má stejné vlastnosti jako elektron s tím rozdílem, že je asi 200krát těžší. Byla to tehdy jediná částice, jež nezapadala do modelu mikrosvěta.

Tím ovšem problémy teprve začaly a postupně se objevovaly další částice - mezony K^0, K^+ nebo baryony $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Delta$. V této souvislosti vznikla i nutnost zavést další kvantové číslo, tzv. **podivnost**.

Zákonitě tak vyvstala otázka, jak se s tímto chaosem ve světě částic vypořádat a vnést do něj řád.

A právě díky podobnosti vlastností částic připomínala situace stav v chemii v dobách před sestavením Mendělejevovy periodické tabulky.

Kvarky

Jako řešení se jevílo zavedení elementárnějších částic hmoty - tzv. kvarků, z nichž by byly všechny výše zmíněné hadrony složeny.⁴

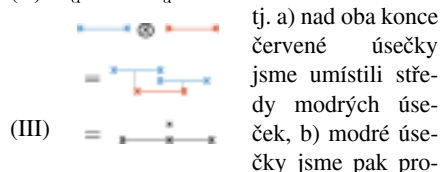
Představme si, že bychom měli kvarky dva, nazvěme je třeba *u* a *d* (budeme předpokládat, že *d* je trochu těžší nežli *u*), a měli bychom z nich složit proton a neutron. Protože absolutní hodnota izospinu obou částic je 1/2 a protože hodnoty izospinu mohou být jen celočíselné násobky 1/2, musí nukleony obsahovat lichý počet kvarků s izospinem 1/2 (viz dále). Jelikož hmotnosti protonu a neutronu se prakticky neliší a navíc víme, že existují hadrony (mezony), které jsou lehčí nežli nukleony, je zřejmé, že ty se musí skládat minimálně ze tří kvarků.⁵

Proton, jakožto nejlehčí z baryonů by na první pohled mohl vypadat jako *uuu*, z čehož by vyplývala hodnota el. náboje $u + 1/3$. Nicméně, jak uvidíme za chvíli, díky pravidlům pro skládání izospinu, hodnota izospinu protonu by v takovém případě byla rovna 3/2.⁶

Lepší variantou je kombinace *uud*. Pak neutron, který je el. neutrální a nepatrně těžší, vypadá jako kombinace *udd*. Odtud pak plyne hodnota el. náboje jednotlivých kvarků: +1/3 pro *u* a -1/3 pro *d*.

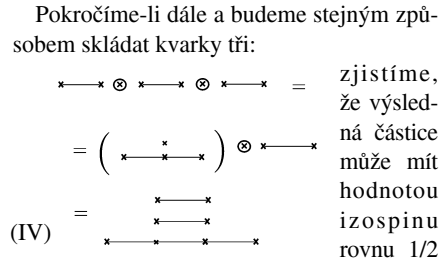
Skládání izospinů kvarků se dá velmi hezky znázornit graficky. Dvojici izospinových stavů si zobrazíme stejně jako na obrázku (I).

Vlastní skládání (\otimes) pak probíhá následovně:



Výsledek interpretujeme tak, že částice složená ze dvou kvarků, může mít hodnotu izospinu 0 (křížek) nebo 1 (úsečka délky 2).

Pokročíme-li dále a budeme stejným způsobem skládat kvarky tři:

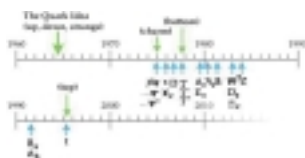


(úsečka délky 1) - např. proton nebo neutron, ale také 3/2 (délka 3), což, jak jsme již uvedli dříve, odpovídá částicím z kvadrupletu Δ .

Kombinace dvou kvarků (přesněji páru kvark-antikvark) tvoří např. piony nebo ρ -mezony, tj. částice se spinem 1 nebo s nulovým spinem - η, η', \dots (viz obrázek III).

Počet hadronů je ale větší a se dvěma kvarky, jakožto základními stavebními kameny, si nevystačíme.⁷ Do dnešní doby byly nalezeny částice, které je možno poskládat z pěti druhů kvarků - *u* (up), *d* (down), *s* (strange),

c (charm) *a b* (beauty/bottom). Průběh potvrzování jejich objevů pak vypadá následovně:



(V)

Na časovou osu jsme zanesli i objev topu (*t*-kvarku), jenž netvoří základ žádné nám dosud známé částice. K čemu je tedy potřebný?

Předehra k *t*-kvarku

Když byl v roce 1975 nalezen τ -lepton a o dva roky později *b*-kvark, vypadala situace ve světě elementárních částic následovně⁸:

leptony	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ
kvarky	u	c	??
	d	s	b

Tabulka 1

Je proto celkem přirozené, že pokud předpokládáme existenci symetrie mezi rodinami leptonů, měl by existovat i další kvark.

Daleko důležitější je ovšem existence *t*-kvarku pro standardní model (SM)⁹, který by se stal narušením rovnosti počtu leptonových a kvarkových rodin nekonzistentní teorií.

Ovšem poté, co byly objeveny intermedieální bosony (1982), částice předpověděné právě na základě SM, nikdo o existenci *t*-kvarku nepochyboval.

Objev *t*-kvarku

Trvalo však ještě dlouho, nežli byl *t*-kvark skutečně nalezen. Fyzikové z experimentů CDF a DØ na urychlovači Tevatron v americkém Fermilabu jej oficiálně oznámili 2. března 1995. Stalo se tak prakticky 18 let poté, co na stejném pracovišti byl týmem nositele Nobelovy ceny Leona Ledermana (tu získal v roce 1988 za experimentální ověření existence dvou typů neutrin) oznámen objev *b*-kvarku (30. 6. 1977, experiment E288).

Uvědomme si, že hmotnost *t*-kvarku je skoro rovna hmotnosti atomu wolframu. Další srovnání nabízí Tabulka 2, přičemž ovšem nesmíme zapomenout na to, že kvarky považujeme za bodové(!) částice a Tabulka 2 tedy demonstruje poměr jejich hmotností a nikoliv velikostí.

Tabulka 2

Jak *t*-kvark vlastně může vzniknout?

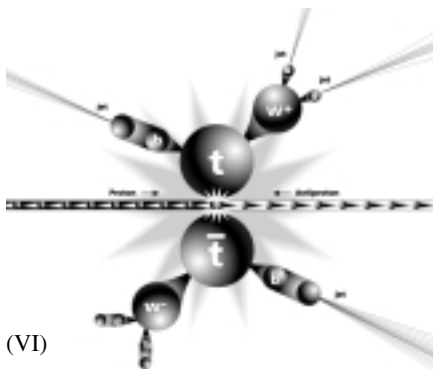
Produkce tak hmotné částice, jakou je *t*-kvark, se dá dosáhnout jen v případě, že energie srážejících se částic (tj. protonu a antiprotonu) bude dostatečně velká. Přesněji, musí být, podle slavného Einsteinova vzorce, minimálně rovna energii (měřené v těžišťové soustavě nalétávajících částic)

$$(1) E = m_t c^2,$$

kde m_t je klidová hmotnost *t*-kvarku a *c* je rychlost světla.

V přirozených jednotkách ($c = 1$) a použitím údaje z Tabulky 2 dostaneme, že tato energie bude rovna hmotnosti *t*-kvarku, a proto protony a antiprotony ve svazcích musí mít energii alespoň 90 GeV. To vše za předpokladu, že takto vznikne jen jediný *t*-kvark.

Tato možnost je ovšem fyzikálně neprůchodná (samotný kvark vzniknout nemůže) a nejpravděpodobnější variantou, při níž ke vzniku *t*-kvarku skutečně dochází, je proces znázorněný na obrázku



(VI)

tj. při srážce protonu s antiprotonem vzniká pár kvarků top-antitop, přičemž v prvním kroku se *t*-kvark se dále rozpadá na *b*-kvark a intermedieální boson W^+ , anti-top se rozpadá na anti-*b* a W^- . Ve druhém kroku se v námi sledovaném procesu W^- rozpadá na mion a jeho antineutrino, při rozpadech ostatních částic (W^+ , *b*, anti-*b*) vzniká velké množství částic, tzv. jety.

Již dávno před objevem topu se ukázalo, že hadrony se neskládají jen z kvarků. Podobně jako každá částice, atom nebo molekula, jsou i kvarky obklopeny silovým polem, tvořeným v případě silné interakce **gluony**. Nicméně, použijeme-li předpokladu, že pár top-antitop vznikne reakcí jen jednoho páru kvark-antikvark, tj.



(VII)

a odhadu, že na jeden kvark v baryonu připadá zhruba 1/6 jeho celkové energie (energie baryonu je přibližně rozdělena napůl mezi kvarky a gluony; kvarky jsou tři) musí být pro znázorněný proces zapotřebí asi 12krát více energie, nežli byl náš původní naivní odhad. Částice v protonovém a antiprotonovém svazku tedy musí mít minimální energii zhruba 1 TeV.

Ve skutečnosti to bylo o trochu méně, existence *t*-kvarku byla potvrzena již pro energii vstředních svazků asi 900 GeV.

***t*-kvark a čeští fyzikové**

K objevu *t*-kvarku došlo, jak jsme již řekli, v roce 1995. Skupina našich fyziků se stala řádným členem experimentu DØ až v roce 1996. Do té doby převažovaly podobné aktivity v rámci experimentů v CERNu.

V současné době se sice ještě zpracovávají údaje z předchozího běhu experimentu, ale chystá se také jeho další kolo. Tohoto dění se přitom účastní tři pražské instituce: Univerzita Karlova v Praze (Ústav částicové a jaderné fyziky), České vysoké učení technické v Praze (Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská) a Akademie věd ČR (Fyzikální ústav). Pro případné studenty fyziky vysokých energií může být právě připravované pokračování experimentů velkou motivací, neboť již několik mladých fyziků ve Fermilabu pracuje.

A co dále?

Princip symetrie umožnil najít řád nejen v již existujících částicích, ale také předpovědět existenci částic dalších, např. *b*- nebo *t*-kvarku.

Poslední chybějící částicí, potřebnou pro ověření standardního modelu, zůstává Higgsův boson. Proč je tato částice klíčová, jak daleko jsme od jejího objevu a co se může stát, pokud nebude nalezena, si řekneme v předposledním dílu našeho seriálu.

Takže nashledanou přístě.

Zdroje

- <http://www.fnal.gov/>
- D. Griffiths, Introduction to elementary particles, John Wiley & Sons, inc., 1987

Děkuji J. Dolejšimu, J. Hořejšimu, R. Leitnerovi, M. Malinskému, K. Soustružníkovi (MFF UK), J. Chýlvi, J. Ramešovi a V. Šimákovi (FZÚ AV ČR) za cenné připomínky při přípravě tohoto příspěvku.

¹ Mikrosvět, VTM 5/2001.
² Protože se z obou druhů částic skládají jádra atomů, říká se jim také nukleony.
³ Přesněji řečeno se nejedná o hodnotu spinu, ale o hodnotu jeho projekce. Tuto nepřesnost si dovolíme i v následujícím textu.
⁴ I když kvarky jako samostatné částice nepozorujeme, model silné interakce založený na jejich existenci (QCD) je v tak dobrém souhlasu s experimentem, že skutečně můžeme o kvarcích mluvit jako o reálných částicích.
⁵ Tato „stavebnicová“ logika není zcela správná, protože hmotnosti kvarků se v případě vázaných stavů (např. proton) tak jednoduše neskládají, ale v prvním přiblížení ji můžeme použít.
⁶ Kombinace kvarků *uuu* existuje také, ale popisuje částici Δ^{++} jejíž spin je roven 3/2.
⁷ Nejsou známy částice, které by obsahovaly větší počet kvarků, nežli tři.
⁸ Jednotlivé sloupce nazýváme rodinami nebo generacemi.
⁹ Mikrosvět II, VTM 6/2001.

TOMÁŠ SÝKORA, ÚČJF MFF UK ■
 tomas.sykora@mff.cuni.cz