

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Hořejší

Nobelova cena za fyziku 2008: Cesty k narušení symetrie

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 54 (2009), No. 1, 3--14

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141881>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2009

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Nobelova cena za fyziku 2008: Cesty k narušení symetrie

Jiří Hořejší, Praha

1. Úvod

Nobelova cena za fyziku pro rok 2008 byla udělena třem vědcům za fundamentální výsledky v teorii elementárních částic. Polovinu ceny získal Američan japonského původu Yoichiro Nambu za „objev mechanismu spontánního narušení symetrie v subatomové fyzice“ a její druhou polovinu obdrželi dva Japonci, Makoto Kobayashi a Toshihide Maskawa, za „objev původu narušené symetrie, která předpovídá existenci alespoň tří rodin kvarků v přírodě“. Jde tedy o ocenění dvou odlišných příspěvků k moderní částicové fyzice, ale oba se setkávají v rámci současného tzv. standardního modelu, k jehož pojmovým základům zcela zásadním způsobem patří. Oceněné objevy mají široké fyzikální a historické souvislosti a pro objasnění stručných výroků nobelovského výboru, jež charakterizují hlavní přínos laureátů, je třeba předběžně nastínit některé základní pojmy z daného oboru a také připomenout některé důležité momenty historického pozadí obou cen.

2. Symetrie ve fyzice

Symetrií se obecně rozumí invariance charakteristických vlastností daného fyzikálního systému vůči transformacím proměnných, které jej popisují. V rámci příslušného matematického formalismu se tak obvykle mluví o symetrii pohybových rovnic určujících dynamiku daného systému, popřípadě také o symetrii jejich řešení. Invariance dynamiky fyzikálního systému má celou řadu pozoruhodných důsledků, z nichž snad nejznámějším příkladem jsou zákony zachování, popsané slavným teorémem Emmy Noetherové (poněkud zjednodušeně: každá symetrie odpovídající transformaci charakterizované nějakým spojitým parametrem implikuje zákon zachování). Může přitom jít o symetrie prostoročasové (geometrické) nebo tak zvané vnitřní: v prvním případě jde o transformace prostorových souřadnic a času, ve druhém případě se mění například hodnota klasického pole nebo kvantové vlnové funkce, aniž by se transformovaly prostoročasové souřadnice. Dobře známým příkladem vnitřní symetrie v klasické fyzice je invariance Maxwellových rovnic vůči kalibračním transformacím složek potenciálu.

Prof. RNDr. JIŘÍ HOŘEJŠÍ, DrSc., Ústav částicové a jaderné fyziky MFF UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: horejsi@ipnp.troja.mff.cuni.cz



Yoichiro Nambu

V kvantové elektrodynamice zahrnují kalibrační transformace rovněž odpovídající změnu komplexní fáze „pole matérie“ (jako je např. Diracovo pole popisující elektrony a pozitrony).

V této souvislosti je třeba zmínit ještě jeden aspekt klasifikace symetrií. Pokud jsou parametry uvažovaných transformací nezávislé na prostoročasových souřadnicích, mluvíme o globální symetrii, v opačném případě jde o symetrii lokální. Kalibrační invariance elektrodynamiky je v tomto smyslu lokální vnitřní symetrie. Omezíme-li se na podmnožinu prostoročasově konstantních fázových transformací Diracova pole, složky elektromagnetického potenciálu se nemění a symetrie se realizuje jako globální. I takto redukováná varianta kalibrační invariance má však svůj netriviální důsledek, a sice zákon zachování proudu (resp. náboje). Pomocí Diracova pole $\psi(x)$ je takový proud vyjádřen ve tvaru $V^\mu = \bar{\psi} \gamma^\mu \psi$, kde symbol γ^μ reprezentuje čtveřici Diracových matic (prostoročasový index μ nabývá hodnot 0, 1, 2, 3). Složky V^μ tvoří čtyřvektor vůči Lorentzovým transformacím a jeho zachování (v diferenciálním tvaru) znamená splnění rovnosti $\partial_\mu V^\mu = 0$. Pro úplnost dodejme, že zmíněné fázové transformace znamenají záměnu $\psi(x) \rightarrow \exp(i\alpha) \psi(x)$, kde α je libovolné reálné číslo.

Jiným příkladem globální vnitřní symetrie, která hraje důležitou roli v jaderné a částicové fyzice, je izospinová symetrie. Matematicky je reprezentována grupou $SU(2)$, jež má analogické algebraické vlastnosti jako obyčejné rotace trojrozměrného prostoru. Pokud by izospinová symetrie byla přesná, existovaly by multiplety subjaderných částic s odlišnými náboji, ale stejnými hmotami (v takovém případě mluvíme o degeneraci izomultipletů). Stejnou hmotu by pak měly proton a neutron v dubletu nukleonů nebo pí-mezony (piony) v tripletu π^+ , π^0 , π^- . Ve skutečnosti se pozorují zmíněné multiplety

částic s mírně odlišnými hmotami, což svědčí o tom, že izospinová symetrie je v reálném světě jen přibližná, tj. mírně narušená. Existence (přibližně) degenerovaných izomultipletů je příkladem tzv. Wignerovy-Weylovy realizace symetrie. V atomové fyzice je jednoduchou analogií takového efektu degenerace energetických hladin elektronů ve sféricky symetrickém silovém poli (např. coulombickém) vůči magnetickému kvantovému číslu, jež dává hodnotu jedné složky momentu hybnosti.

Často nastává případ, kdy symetrii dynamiky odpovídá také symetrický základní stav systému. Tak je tomu například se zmíněnou přibližnou izospinovou symetrií: všechny fenomenologicky úspěšné modely fyziky subjaderných částic pracují s předpokladem, že bezčásticový základní stav (vakuum) je invariantní vůči izospinovým rotacím. Obecně však taková souvislost platit nemusí a dokonce lze říci, že situace, kdy se realizuje asymetrický základní stav jinak symetrického systému, patří mezi nejzajímavější problémy několika různých oblastí moderní fyziky. Právě tohoto tématu se týkají práce Yoichira Nambu, za něž získal svoji část Nobelovy ceny za rok 2008.

3. Inspirace v teorii supravodivosti

Inspiračním zdrojem pro originální práce, za něž byl Y. Nambu oceněn, byla teorie supravodivosti, tedy oblast na první pohled hodně vzdálená od fyziky elementárních částic. K této pozoruhodné okolnosti je třeba uvést pár poznámek. Mikroskopickou teorii supravodivosti odhalili ve druhé polovině 50. let John Bardeen, Leon Cooper a Robert Schrieffer (mimořadně, za své výsledky získali Nobelovu cenu v roce 1972), ale jejich formulace, dnes běžně označovaná jako BCS teorie, měla tehdy určitý matematický defekt — některé spočtené výsledky naznačovaly, že je zde narušena kalibrační invariance. BCS teorii krátce po jejím vzniku významně doplnil Nikolaj Bogoljubov a rovněž Philip Anderson, ale problém kalibrační symetrie přetrvával (i když byl zřejmě vnímán spíše jako technický problém než jako zásadní nedostatek teorie). Od začátku bylo jasné, že základní stav supravodiče je nesymetrický: v BCS modelu je totiž tvořen kondenzátem tzv. Cooperových párů, což jsou korelované dvojice elektronů s opačnými impulsy a spiny a takový stav není invariantní při změně fáze elektronového pole. Bogoljubov popsal BCS základní stav ekvivalentně jako „vakuum pro kvazičástice“; kvazičástice přitom nese spin $\frac{1}{2}$ stejně jako elektron, je kombinací elektronu a „díry“ v zaplněném Fermiho moři a má pozoruhodnou vlastnost — její energie nevymizí ani při nulovém impulsu. Důležitým výsledkem prací Andersona a Bogoljubova bylo mimo jiné také zjištění, že systém elektronů (nebo kvazičástic) v supravodiči má bezspinové kolektivní excitace, jejichž energie naopak vymizí v limitě nulového impulsu a chovají se tedy, zhruba řečeno, jako částice s nulovou klidovou hmotou.

Nambu v roce 1959 formuloval BCS teorii novým způsobem, s důsledným využitím technik kvantové teorie pole známých z tehdy již velmi populární kvantové elektrodynamiky. Ukázal, že kalibrační symetrie relevantních pohybových rovnic na kvantové úrovni je zachována, jestliže se vezmou důsledně v úvahu také zmíněné kolektivní excitace. Zároveň také zdůraznil, že existence těchto módů těsně souvisí s neinvariancí základního stavu. To vše dohromady dává právě typický příklad jevu, který se dnes

obvykle nazývá „spontánní narušení symetrie“, nebo někdy také „skrytá symetrie“. Jak už bylo naznačeno, jde o situaci, kdy dynamika systému má určitou symetrii, ale příslušný základní stav ji nerespektuje. Je přitom ovšem třeba dodat, že zmíněný typ narušené symetrie se na chování systému podstatně projeví pouze v případě, že máme co do činění s počtem částic, který je z praktického hlediska nekonečný a má tedy smysl užívat pro jeho popis jazyk teorie pole. Nambu byl podle všeho první, kdo tento jev vystihl právě na příkladu supravodivosti, ale ve fyzice pevných látek nebo kondenzovaného stavu to ve skutečnosti není nijak ojedinělá situace: spolu se supravodivostí by bylo možno zmínit také supratekutost hélia a asi nejběžnějším příkladem spontánního narušení symetrie je každý ferromagnet — zde je podstatná spontánní magnetizace odpovídající uspořádání elektronových spinů v makroskopických doménách (v tomto případě tedy jde o narušení obyčejné rotační symetrie).

Správná identifikace skryté symetrie v teorii supravodivosti byla jen prvním krokem, který Nambu učinil na cestě vedoucí k Nobelově ceně. Pronikavost jeho úvah spočívá především v následném přenesení ideje asymetrického základního stavu do teorie elementárních částic, kde je třeba užívat aparát relativistické kvantové teorie pole a základním stavem je vakuum (tj. v naivním pohledu „prázdný prostor“). Geniální vize, kterou Nambu měl, předpokládala realizaci scénáře BCS supravodiče v teorii silných interakcí, kterých se účastní nukleony a piony. Tyto subjaderné částice vykazují navíc i slabou interakci (což je síla zodpovědná např. za radioaktivní beta rozpad) a celkem přirozeně se nabízí otázka, zda existují nějaké netriviální vztahy mezi parametry charakteristickými pro obě fundamentální interakce. V době, kdy Nambu publikoval svou analýzu teorie supravodivosti, byla známa jedna taková pozoruhodná relace, kterou v roce 1958 odvodili Marvin Goldberger a Sam Treiman na základě poněkud nejasných teoretických předpokladů. Prvním velkým úspěchem Nambuova programu bylo nové a celkem přirozené odvození Goldbergerovy-Treimanovy relace a to zřejmě do značné míry rozhodlo o dalším směřování teoretického výzkumu v dané oblasti. Abychom čtenáři přiblížili alespoň základní obrysy teoretického schématu, které Nambu formuloval, je třeba přidat další vysvětlující komentář.

4. Axiální proud, pion a chirální symetrie

V částicové fyzice konce 50. let byla velmi populární tehdy zbrusu nová teorie slabých interakcí, v níž figurovaly proudy podobné těm, které v rámci kvantové elektrodynamiky vytváří Diracovo elektron-pozitronové pole. Zatímco elektromagnetický proud je čistý (čtyř)vektor, slabé proudy jsou dvojího typu — kromě vektorů zde hrají stejně důležitou roli i tzv. axiální vektory neboli pseudovektory; důvodem pro to je narušení parity ve slabých interakcích. Pro úplnost dodejme, že zmíněný model slabých interakcí se obvykle nazývá teorie $V - A$, neboť relevantní proud je rozdílem vektoru (V^μ) a axiálního vektoru (A^μ). V době, o níž je řeč, bylo jasné především to, že interakce axiálního proudu je podstatná pro pozorovaný rozpad tehdy již dobře známého nabitého pionu. Bylo také zřejmé, že na rozdíl od vektorového proudu se axiální proud nezachovává, a celkem snadno se přitom dalo zjistit, že vztah $\partial_\mu A^\mu = 0$

by mohl platit, pokud by pion byl nehmotný. Spolehlivost takové aproximace ovšem není a priori zaručena; nepopíratelný je pouze fakt, že pion je zdaleka nejlehčí známý hadron (zhruba sedmkrát lehčí než proton). Nambu byl zřejmě první, kdo přiblížení zachovávajícího se axiálního proudu a nehmotného pionu vyzkoušel; použil je při popisu beta rozpadu a úspěšně odvodil již zmíněnou Goldbergerovu-Treimanovu relaci

$$g_A = \frac{g_{\pi NN} f_\pi}{m_N},$$

kde g_A je axiální konstanta pro beta rozpad neutronu, $g_{\pi NN}$ je vazbová konstanta silné interakce pionu a nukleonů, f_π označuje rozpadovou konstantu pionu a m_N je střední hmota (resp. klidová energie) nukleonu.

Motivován tímto úspěchem, Nambu navrhl hlubší vysvětlení pro fungování zmíněné aproximace, přičemž použil analogii s teorií supravodivosti: zachování axiálního proudu je důsledkem chirální symetrie fundamentálních silných interakcí (analogie globální fázové invariance), ale vakuum je asymetrické (analogie neinvariantního BCS základního stavu) a bezspinový pion je proto nehmotný (analog nehmotné kolektivní excitace v supravodiči). Hmotné nukleony jsou pak analogií Bogoljubovových kvazičástic. Na vysvětlenou dodejme, že chirální symetrie (etymologii tohoto názvu zde nebudeme vysvětlovat) je vlastní každému modelu s nehmotným Diracovým polem a odpovídá maticovým transformacím $\psi \rightarrow \exp(i\alpha\gamma_5)\psi$, kde $\gamma_5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$ a α je libovolný reálný parametr. Zachovávající se axiální proud lze pak vyjádřit ve tvaru $A^\mu = \bar{\psi}\gamma^\mu\gamma_5\psi$. Svoji představu teorie silných interakcí formulované v analogii s teorií supravodivosti Nambu podrobně rozvedl ve dvou obsáhlých článcích publikovaných v roce 1961, jejichž spoluautorem byl italský teoretik Giovanni Jona-Lasinio. V tomto modelu (v literatuře dnes obvykle označovaném akronymem NJL) se předpokládá přímá interakce mezi blíže nespécifikovanými elementárními nehmotnými fermiony se spinem $\frac{1}{2}$ (dnes bychom pro ně asi použili generického označení kvarky), přičemž nukleony a pion vznikají „dynamicky“ — např. nehmotný pion se objeví jako vázaný stav nukleonu a antinukleonu. Podrobnější diskuse pozoruhodné NJL teorie by však daleko přesáhla rozměry tohoto článku.

Model, který vytvořili Nambu a Jona-Lasinio, se i dnes občas užívá jako efektivní teorie pro některé fenomenologické aplikace, ovšem moderní teorie fundamentální silné interakce je jiná. Je to kvantová chromodynamika (QCD), formulovaná v první polovině sedmdesátých let 20. století jako neabelovská kalibrační teorie interakcí barevných kvarků a gluonů. I zde se však realizuje spontánní narušení globální chirální symetrie a tak lze s jistotou říci, že ideje, které Nambu prosazoval na přelomu 50. a 60. let, zásadním způsobem ovlivnily další vývoj částicové fyziky a navíc měly i značný fenomenologický úspěch. Dnes můžeme konstatovat, že představa spontánního narušení chirální symetrie a příslušné dynamiky mírně korigované skutečnou hmotou pionu je klíčovou součástí moderní efektivní teorie interakcí hadronů (mezonů a baryonů) při relativně nízkých energiích a stále přináší nové experimentálně testované výsledky. Jinými slovy, skutečně se tak potvrzuje původní Nambuova vize, že reálný svět subjaderných částic není příliš vzdálený od svého zjednodušeného obrazu, v němž je pion nehmotný a relevantní narušení symetrie jde pouze na vrub vakua. Pokud jde

o vzdálenost mezi světem reálných částic a zmíněným idealizovaným obrazem, ta je mírou dodatečného „přímého“ (tj. nikoli spontánního) narušení symetrie. To by však byla zase jiná historie.

5. Skromný zárodek standardního modelu

Zmíněný úspěch ve fenomenologii hadronů je jen jedním z aspektů spontánně narušené symetrie ve světě subjaderných částic. Průkopnická práce, v níž Nambu odhalil podstatu pionu, za sebou ve skutečnosti zanechala v částicové fyzice mnohem širší stopu. Mimořádnou zásluhu na tom má především britský teoretik Jeffrey Goldstone, který se na přelomu 50. a 60. let začal systematicky zabývat fenoménem neinvariantního vakua v modelech relativistické kvantové teorie pole. Hlavním výsledkem jeho prací je poměrně obecné tvrzení o existenci nehmotné bezspinové částice v případě spontánně narušené spojité symetrie — taková částice je tedy vlastně jakýsi zobecněný pion à la Nambu. Dnes se obvykle nazývá prostě „Goldstoneův boson“, ačkoli korektnější termín (užívaný však méně často) je jistě „Nambuův-Goldstoneův boson“. Ještě pokud jde o názvosloví: asi málokdo dnes ví, že samotný termín „spontánní narušení symetrie“ nezavedl Goldstone ani Nambu. Poprvé jej zřejmě použili Marshall Baker a Sheldon Glashow v jedné své práci z roku 1962, a ačkoli jejich tehdejší článek prakticky upadl v zapomnění, atraktivní název se ujal a užívá se dnes téměř všeobecně. V jistém smyslu by asi bylo správnější mluvit spíše o Nambuově-Goldstoneově realizaci symetrie jakožto protějšku dříve zmíněné realizace Wignerovy-Weylovoy (jelikož symetrie dynamiky zůstává zachována), ale tento poněkud suchopárny termín se užívá zřídka, zřejmě zní poněkud akribicky.

Koncept asymetrického vakua v jinak symetrické teorii se stal v první polovině 60. let velmi populárním, ale zároveň bylo zřejmé, že je třeba hledat i možné výjimky z platnosti Goldstoneova teoremu. V některých modelech částicové fyziky s potenciálně zajímavými symetriemi by totiž přítomnost nehmotné bezspinové částice byla vysloveně na překážku — kromě lehkého pionu a jeho blízkých příbuzných se v reálném světě žádné takové objekty nepozorují. Odpověď našťásti přišla poměrně brzy. V roce 1964 skotský fyzik Peter Higgs publikoval krátký článek, v němž ukázal, že pokud je spontánně narušená symetrie lokální, Goldstoneův boson je pouhým „duchem“, který se ve skutečnosti neobjeví ve fyzikálním spektru. Vtip je v tom, že v uvedeném případě model nutně obsahuje také vektorové pole, jemuž odpovídá nefyzikální nehmotná částice s jednotkovým spinem, tzv. kalibrační boson. Čistým výsledkem kombinace zmíněných dvou „duchů“ je nakonec reálný vektorový boson s nenulovou hmotou! Jakkoli se takový výsledek může zdát na první pohled překvapivý, nejde samozřejmě o žádné zázračné stvoření hmoty „z ničeho“. V Higgsově modelu totiž figuruje skalární pole, jehož nenulová hodnota ve vakuu garantuje předpokládané spontánní narušení kalibrační symetrie a právě tato základní konstanta je zdrojem hmoty. Zmíněnému poli také odpovídá konkrétní částice — Higgsův boson s nulovým spinem a nenulovou hmotou. Právě popsáný trik se dnes obvykle nazývá Higgsův mechanismus, ale v zájmu historické objektivitě je třeba dodat, že jej nezávisle a prakticky současně

s Higgsem odhalili i další teoretici. Ve své době se Higgsův mechanismus zřejmě i svým objevitelům jevil spíše jako formální hříčka v abstraktní teorii pole a svého druhu kuriozita. O pár let později se však zásadním způsobem uplatnil při formulaci jednotné teorie elektromagnetických a slabých interakcí v pracích Stevena Weinberga a Abduse Salama. Tato velmi úspěšná teorie se dnes prozaicky nazývá standardní model elektroslabých interakcí a Higgsův mechanismus zde generuje hmoty intermediálních vektorových bosonů W a Z . Teoretické předpovědi jsou v pozoruhodném souhlasu s experimentálními daty, ale existence samotného Higgsova bosonu zatím nebyla potvrzena ani vyvrácena. Všeobecně se očekává, že definitivní řešení tohoto problému přinesou experimenty na urychlovači LHC v CERN (Ženeva), které mají začít v roce 2009.

Na dramatickém pokroku částicové fyziky v posledních dekadách 20. století se kromě experimentátorů podílela celá řada výrazných teoretiků a Yoichiro Nambu je nepochybně jedním z nich. Je zřejmé, že jeho práce o spontánním narušení symetrie v sobě obsahovaly, mimo jiné, skromný zárodek dnešního standardního modelu. Dá se proto také bez nadsázky konstatovat, že za svůj přínos mohl vlastně dostat Nobelovu cenu už mnohem dřív.

6. Problém narušení symetrie CP

Objev, za který dostali svoji část ceny Makoto Kobayashi a Toshihide Maskawa, se týká původu narušení symetrie označované v teorii pole a částicové fyzice stručně jako CP . Přesněji řečeno, jde o popis tohoto jevu v rámci standardního modelu elektroslabých interakcí a jeho pozoruhodnou souvislost s počtem kvarků. „Nobelovská“ práce, kterou Kobayashi a Maskawa publikovali v roce 1973, je koncepčně i matematicky celkem jednoduchá, ale pro pochopení jejího významu je třeba nejprve stručně rekapitulovat relevantní historické pozadí případu.

Zhruba do roku 1956 panovalo téměř všeobecné přesvědčení, že fundamentální fyzikální zákony respektují, mimo jiné, symetrie P (prostorová inverze nebo stručně parita), T (obrácení času) a C (záměna částice za antičástici neboli nábojové sdružení). Z hlediska klasifikace nastíněné v úvodní části tohoto článku představují P a T prostočasové symetrie, kdežto C je symetrií vnitřní (všechny lze přitom charakterizovat jako „diskrétní“, neboť příslušné transformace neobsahují žádný spojitý parametr). Nezávisle na domněnkách o dílčích symetriích C , P a T platí slavný CPT teorém, dokázaný v první polovině 50. let, podle něhož má prakticky každý model relativistické kvantové teorie pole složenou symetrii CPT . V roce 1956 dva američtí teoretici čínského původu Tsung-Dao Lee a Chen Ning Yang zpochybnili invarianci slabých interakcí vůči P (tj. „zachování parity“) a navrhli několik zásadních experimentálních testů. Převratný objev narušení parity v několika nezávislých experimentech pak následoval už začátkem roku 1957 a ještě v témže roce T. D. Lee a C. N. Yang dostali Nobelovu cenu. Dalších sedm let se pak ještě věřilo, že se obecně zachovává alespoň „kombinovaná parita“ CP , jelikož tehdy nejúspěšnější model slabých interakcí takovou vlastnost měl (mám samozřejmě na mysli dříve zmíněnou $V-A$ teorii



Makoto Kobayashi

s vektorovými a axiálními proudy). V roce 1964 však padla i tato symetrie, když bylo zcela nečekaně odhaleno nezachování CP v některých rozpadech elektricky neutrálních K -mezonů (kaonů). Nobelovu cenu za tento mimořádný objev získali James Cronin a Val Fitch v roce 1980. Ještě stručný komentář pro nespécialisty v částicové nebo jaderné fyzice: Kaon je velmi blízký těžší příbuzný pionu a nese nenulovou podivnost (S , z angl. „strangeness“), což je určitý druh náboje patřící do obecnější kategorie „vůně“ (angl. „flavour“).

Jak už bylo řečeno, teorie slabých interakcí, která předcházela dnešnímu standardnímu modelu, nedávala žádné přirozené vysvětlení narušení CP symetrie. Ale ani první verze standardního modelu, platná na začátku 70. let, na tom nebyla v tomto ohledu lépe. Pro popis narušení CP je totiž podstatné, aby některé parametry teorie (vazbové konstanty) měly nenulovou imaginární část. V modelech, které pracovaly s částicemi známými zhruba do poloviny 70. let, však bylo vždy možné učinit relevantní parametry reálnými pomocí vhodných redefiníci fyzikálních polí vcházejících do teorie. Jak uvidíme později, zásadní roli nakonec hraje, poněkud překvapivě, počet elementárních částic se spinem $\frac{1}{2}$.

7. Kolik je kvarků?

Kaony nebyly ani zdaleka jediné částice s nenulovou podivností, známé v první polovině 60. let. Hadronů takového typu byla tehdy v tabulkách již celá řada a existovala také dosti podrobná data o jejich rozpadech na lehčí částice. Mimo jiné bylo známo, že ve slabých rozpadech se podivnost může měnit, a to nejvýše o jednotku. Pro



Toshihide Maskawa

slabé proudy to pak znamenalo, že mají dvě složky — jedna odpovídá přechodům beze změny podivnosti a druhá podivnost mění. Možnou parametrizaci relativního zastoupení obou složek zřejmě poprvé navrhli Murray Gell-Mann a Maurice Lévy v jedné své práci z roku 1960, ale svou představu už dále nerozvinuli do zralé podoby. V roce 1963 si italský teoretik Nicola Cabibbo všiml, že všechna tehdy známá data je možno popsat za předpokladu, že zmíněné dvě komponenty vcházejí do celkového slabého proudu s koeficienty rovnými kosinu a sinu určitého úhlu, jehož velikost bylo možno určit empiricky. Zmíněný úhel se pochopitelně začal označovat Cabibbovým jménem, ale jeho původ byl naprosto záhadný. Pro úplnost a v zájmu historické objektivity ještě poznamenejme, že Gell-Mann a Lévy nenapsali svou parametrizaci slabého proudu explicitě pomocí úhlu, ale na místě pozdějšího $\cos \theta_C$ měli výraz $1/(1 + \varepsilon^2)^{1/2}$ a na místě $\sin \theta_C$ psali $\varepsilon/(1 + \varepsilon^2)^{1/2}$, kde ε je nějaký empirický reálný parametr — tedy vlastně jen jinými písmeny totéž. Nicola Cabibbo však své vylepšení $V - A$ teorie slabých interakcí dovedl mnohem dál, zejména pokud jde o fenomenologii hadronových rozpadů (práci Gell-Manna a Lévyho přitom znal a poctivě citoval).

V roce 1964 se na scéně objevil kvarkový model, který nezávisle na sobě navrhli Murray Gell-Mann a George Zweig pro klasifikaci hadronů a objasnění jejich systematiky. V rámci tohoto schématu nejsou už hadrony elementární částice, ale každý z nich se dá interpretovat jako objekt složený buď ze tří kvarků (baryony) nebo kvarku a antikvarku (mezony). V době, o níž je řeč, přitom stačily tři druhy kvarků: u („up“), d („down“) a s („strange“). V jazyce tohoto modelu pak bylo možno říci, že slabých interakcí se účastní kvark u ve spojení s d a s smíchanými v poměru Cabibbových koeficientů. Kvarky bylo posléze možno zahrnout i do konstrukce teorie elektroslabých interakcí, ale prakticky okamžitě bylo zřejmé, že model tří kvarků je v tomto kontextu

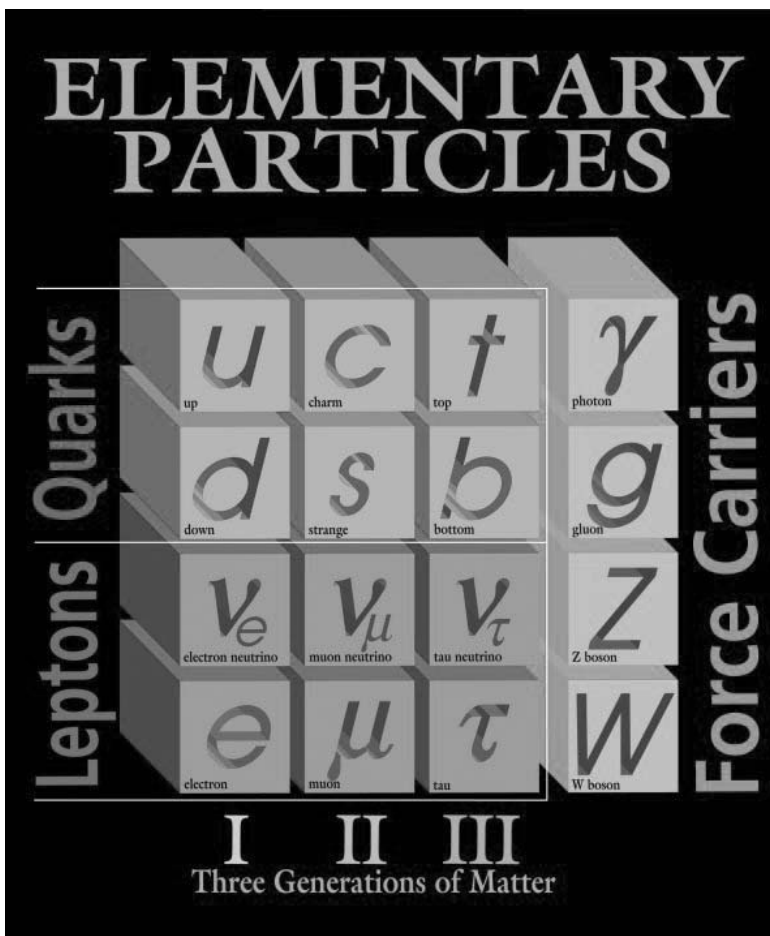
problematický — vedl totiž k novým interakcím s neutrálním intermediálním bosonem Z , které byly naprosto neslučitelné s fenomenologií známých hadronových rozpadů. Na začátku 70. let se naštěstí vyjasnilo, že řešení je poměrně jednoduché. Stačí zavést další kvark se stejným elektrickým nábojem jako u , svázat jej s kombinací d a s , která je ortogonální k původní Cabibbově směsi, a všechny nežádoucí efekty se vyruší. Průkopnickou práci na toto téma publikovali v roce 1970 Sheldon Glashow, Jean Iliopoulos a Luciano Maiani (GIM) a jejich čtvrtý kvark je nyní znám pod označením c („charm“). Postulovat novou elementární částici jen pro záchranu zbytku teorie vyžadovalo tehdy určitou odvalu, ale tvůrcům standardního modelu štěstí přálo, neboť v roce 1974 byla existence kvarku c s očekávanými vlastnostmi potvrzena, a to hned ve dvou nezávislých experimentech.

V polovině 70. let tak byla teorie elektroslabých interakcí z nejhoršího venku, ale i v rámci GIM modelu se čtyřmi kvarky zůstával problém teoretického výkladu narušení CP symetrie otevřený. Ve skutečnosti však v té době už pár let existovalo, alespoň na papíře, teoretické schéma, v němž kýžený efekt vycházel přirozeně. Byl to právě model, který navrhli M. Kobayashi a T. Maskawa a předpokládala se v něm existence 6 kvarků (ačkoli termín „kvark“ zde nebyl použit). Stojí za zmínku, že jejich práce byla zaslána k publikaci už v září 1972, tj. dva roky před potvrzením čtvrtého kvarku c . Výpočet, který provedli Kobayashi a Maskawa, je z dnešního hlediska až překvapivě jednoduchý. Důsledně využili především toho, že v rámci standardního modelu jsou hmoty kvarků generovány prostřednictvím jejich interakce s Higgsovým polem. Hmotové členy, které tak vznikají, lze matematicky popsat pomocí vhodné matice a tu je třeba diagonalizovat, chceme-li identifikovat fyzikální částice. Příslušné pootočení kvarkových polí se nevyhnutelně přeneso do interakcí slabých kvarkových proudů s intermediálním vektorovým bosonem W a výsledná forma slabé interakce pak obsahuje matici směšování kvarků; v případě modelu se 6 kvarky je to matice 3×3 , parametrizovaná pomocí tří rotačních úhlů „Cabibbova typu“ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ a jedné fáze δ (v komplexní jednotce $\exp(i\delta)$). A jak už jsme naznačili dříve, právě přítomnost komplexních čísel v Kobayashiově-Maskawově (KM) matici způsobuje narušení symetrie CP ! V modelu se 4 kvarky je výsledná směšovací matice typu 2×2 a je popsána jediným reálným parametrem — Cabibbovým úhlem. V takovém případě tedy nejsou ve hře komplexní čísla a symetrie CP je zachována; minimální počet kvarků, pro nějž KM mechanismus funguje, je právě šest. Podle teorie, kterou Kobayashi a Maskawa prezentovali ve své vizionářské práci poměrně skromně, má tak narušení CP stejný původ jako úhly Cabibbova typu!

Pokud jde o vlastnosti KM matice v obecném případě, je snad na místě jednoduchá vysvětlující technická poznámka. Uvažujeme-li n „generací“ elementárních fermionů (tj. počet kvarků je $2n$), je směšovací matice vždy unitární, typu $n \times n$. Obecně je tedy popsána pomocí n^2 reálných parametrů, ale její první řádek a první sloupec je možno učinit čistě reálnými pomocí vhodné redefinice fází kvarkových polí, jež tvoří slabé proudy. Celkový počet fyzikálně relevantních reálných parametrů je tedy roven $n^2 - (n + n - 1) = (n - 1)^2$. Z nich připadá $n(n - 1)/2$ na rotační úhly a na komplexní fáze tak zbývá $(n - 1)(n - 2)/2$ parametrů. Je tedy okamžitě vidět, že v GIM modelu

se čtyřmi kvarky (kde $n = 2$) je relevantní právě jen jeden úhel a komplexní fáze se může objevit až pro $n = 3$.

Numerické hodnoty relevantních parametrů směšovací matice kvarků ovšem původní Kobayashiova-Maskawova teorie nepředpověděla (a žádnou takovou předpověď nemáme dodnes). Snad ale stačí, že v hlavních rysech byl jednoduchý KM model nakonec ohromujícím způsobem potvrzen, ačkoli ve své době jejich publikace prošla prakticky bez povšimnutí. Světová komunita začala brát KM mechanismus vážně zřejmě až po roce 1975, kdy byl objeven „těžký lepton“ tau (což napovídalo, že existuje třetí generace elementárních fermionů). V roce 1977 byl pak odhalen pátý kvark b („bottom“) a původně zcela nenápadná práce Kobayashiho a Maskawy se stala všeobecně známou a nesmírně populární. Existence šestého kvarku t („top“) byla pak experimentálně prokázána v roce 1994.



Tabulka částic standardního modelu

Podstatné přitom je, že mnoho nezávislých experimentů až do dnešního dne potvrzuje, že všechny efekty narušení CP symetrie ve světě subjaderných částic lze skutečně popsat pomocí KM směšovací matice. S ohledem na starou Cabibbovu práci se dnes tato matice obvykle označuje zkratkou CKM.

8. Nedozírné následky nenápadných teorií

Teoretické práce, které přinesly svým autorům Nobelovu cenu za rok 2008, mohly v době svého vzniku působit celkem skromně a nenápadně, ale jejich konečné důsledky byly opravdu dalekosáhlé. Standardní model, v němž hraje důležitou roli jak princip spontánního narušení symetrie, tak i schéma směšování šesti kvarků vedoucí k narušení CP symetrie, motivoval realizaci unikátních a velmi nákladných experimentů, které správnost základních teoretických představ potvrdily. Navíc, některé klíčové experimenty začnou v nejbližší budoucnosti a můžeme tak očekávat další významné prohloubení našich znalostí fyziky těsně spojené s touto Nobelovou cenou. Při udělení tak prestižní ceny se vždy vynoří otázka, zda je ocenění úplně spravedlivé a eventuelně kdo jiný by si ji třeba také zasloužil. Yoichiro Nambu je jako laureát evidentně nezpochybnitelný, ale i Jeffrey Goldstone se o teorii spontánního narušení symetrie zasloužil velmi výrazně. Nambu však byl zřejmě přece jen první. Makoto Kobayashi a Toshihide Maskawa v raných 70. letech daleko předběhli svou dobu, ale například část italské fyzikální komunity namítá, že měl být oceněn také Nicola Cabibbo. Osobně považuji takový nárok za přehnaný, protože Cabibbo ve své době vlastně jen poněkud překvapivým způsobem popsal tehdy známá data a jeho teoretické předpovědi jistě neměly tak dramatický dopad, jako tomu bylo v případě KM modelu. Navíc Kobayashi a Maskawa dostali cenu především za objasnění mechanismu narušení symetrie CP , nikoli za zobecnění schématu směšování kvarků. V každém případě nobelovský výbor může v daném roce vybrat nejvýše tři laureáty a to je určitě skoro vždy velmi těžký úkol. Bez ohledu na subjektivní názory různých zájmových skupin je v kauze posledních nobelistů jasné především to, že v částicové fyzice za sebou zanechali mimořádně výraznou stopu a výzkum v oblastech, k nimž podstatným způsobem přispěli, stále pokračuje.