

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Hořejší; Jiří Hošek
Nobelova cena za fyziku 1999

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 45 (2000), No. 1, 1--6

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141014>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2000

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 1999

Jiří Hořejší a Jiří Hošek

Nobelova cena za fyziku 1999 byla udělena holandským fyzikům Gerardu 't Hooftovi a Martinu Veltmanovi „za vyjasnění kvantové struktury elektroslabých interakcí ve fyzice“ (citace Švédské Akademie věd). Hlavně díky nim můžeme od poloviny 70. let mluvit o „Standardním modelu“, který umožňuje širokou třídu jevů ve světě elementárních částic teoreticky konzistentně popisovat, chápat a předpovídat ve shodě s experimentálními daty.

Prolog

Fyzika se zabývá pouze pozorovatelnými jevy a byly to právě experimenty, které už dávno přesvědčivě ukázaly, že mnohé přírodní jevy nelze popsat, tím méně pochopit, a už vůbec ne předpovědět pomocí zákonů klasické fyziky. První takovou oblastí jevů jsou jevy mikrosvěta, charakterizované elementárními jednotkami malosti (např. elementární jednotkou účinku je Planckova konstanta \hbar), kde se experimentálně projevují *principy kvantové mechaniky*. Druhou takovou oblastí jevů jsou ty, kde se objekty pohybují rychlostmi srovnatelnými s rychlostí světla, nebo mají energie srovnatelné či větší, než jsou jejich hmoty. Pro popis takových systémů je nezbytné používat *principy teorie relativity*. Fyzika elementárních částic se zabývá jevy, jejichž popis využívá obou principů.

Dorozumívacím jazykem fyziky je matematika. Zatímco klasickým fyzikálním jevům odpovídá bezprostřední mentální obraz vyjádřitelný matematikou fyzikálních zákonů, při popisu jevů kvantové relativistické fyziky postupuje příroda jinak: Pro potřeby mentálního obrazu matematické formy fundamentálních zákonů zavádí „irrelevancies“ (Paul Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Nobelova cena 1933 — spolu s Erwinem Schrödingerem). Bez nich by totiž výsledky složitých měření procesů mezi elementárními částicemi, která produkují konečkonců pouze čísla (násobky nejrůznějších etalonů), nedávaly žádný smysl.

V procesu *porozumění fyzikálním jevům*, nejen ve světě elementárních částic, bývají prvním krokem fenomenologické teorie. Ty ale, jak napovídá název, jevy popisují, neposkytují jejich pochopení a systematické odhady korekcí či nepřesností, jichž se při popisu jevů dopouštějí. Pouze v omezené míře také umožňují teoreticky rozpracovat důsledky, např. předpovídat jevy nové. „Dobré“ teorie takové vlastnosti mají. Vývoj

Prof. RNDr. JIŘÍ HOŘEJŠÍ, DrSc. (1951), Ústav částicové a jaderné fyziky MFF UK, V Holešovičkách 2, Praha 8;

Ing. JIŘÍ HOŠEK, CSc. (1943), Ústav jaderné fyziky AV ČR, Řež u Prahy.

v porozumění elektromagnetických, slabých i silných interakcí probíhá přesně podle uvedeného scénáře.

Fenomenologie

Dnes máme za to, že svět kolem nás (ale i ten daleko od nás!) je tvořen čtyřmi elementárními částicemi: 1. Kvarkem u (up = horní), který nese elektrický náboj $+\frac{2}{3}e$. 2. Kvarkem d (down = dolní), který nese elektrický náboj $-\frac{1}{3}e$. 3. Elektronem e, který zůstal elementární, jako býval před lety, a který nese náboj $-e$. 4. Neutrinem ν_e , které je elektricky neutrální. (Staré známé protony p a neutrony n, z nichž jsou tvořena atomová jádra, jsou slepeny z kvarků ($p \sim uud$, $n \sim ddu$).)

Záhadou záhad je dodnes experimentální fakt, že z rodiny či generace „každodenních“ částic (u, d; e, ν_e) umíme na urychlovačích z energie „stvořit“ dvě další repliky, rodiny či generace, které se fyzikálně chovají úplně stejně jako generace první (mají stejné interakce), pouze jsou těžší. Existují tedy generace (u, d; e, ν_e), (c, s; μ , ν_μ) a (t, b; τ , ν_τ). Přitom u, d, c, s, t, b jsou kvarky nesoucí poetická jména (c – charmed = půvabný, s – strange = podivný, t – top = nejvyšší, b – beautiful = nádherný nebo bottom = nejnižší) a μ , ν_μ , τ , ν_τ jsou leptony pojmenované prozaicky svými řeckými písmeny.

Mezi uvedenými elementárními částicemi se zatím experimentálně projevují tři druhy kvantových sil či interakcí. Teoretičtí fyzikové mají v popisu práce jejich projevy popsat, pochopit a rozpracovat jejich předpovědi. Experimentální fyzikové mají v popisu práce takové teorie prověřovat a objevovat předpovězené efekty; sní však o objevech, které předpovězeny nebyly. Dříve ale, než se pustíme do popisu těchto interakcí, zavedeme důležitou „irelevanci“ z matematické kuchyně fyziky elementárních částic a budeme říkat, že *elementární částice jsou kvanty svých polí*. Že je foton nehmotným kvantem (částicí) elektromagnetického pole, přitom považujeme za celkem stravitelné tvrzení.

1. *Elektromagnetické interakce* jsou zprostředkovány výměnami elektricky neutrálních fotonů a působí mezi elektricky nabitými částicemi.

2. *Slabé interakce* jsou zprostředkovány výměnami těžkých kvant elektricky nabitých polí W_{\pm} a těžkých kvant elektricky neutrálního pole Z (tzv. intermediální bosony W a Z). Působí mezi všemi částicemi všech tří generací i mezi sebou. Typickým slabým procesem je β -rozpad: $d \rightarrow u + e + \nu_e$.

3. *Silné interakce* jsou zprostředkovány výměnami nehmotných, elektricky neutrálních kvant gluonového pole, tzv. gluonů. Působí pouze mezi kvarky a mezi gluony navzájem a „lepší“ kvarky a gluony (glue = lepidlo) do protonů, neutronů a jiných tzv. hadronů. Této interakci se dnes říká kvantová chromodynamika.

Všechny tři typy interakcí jsou různými realizacemi myšlenkově hlubokého *principu lokální kalibrační invariance* (Chen Ning Yang, Robert Mills, 1954). Tento princip přirozeně vyjadřuje experimentálně pozorované charakteristické rysy jednotlivých interakcí:

1. Všechny jsou zprostředkovány výměnami kvant Yangových-Millsových (YM) polí se spinem 1. Nepřehlédnutelný je ale fakt, že foton a gluony jsou nehmotné, zatímco W a Z bosony jsou velmi těžké ($m_W \sim 86 m_p$, $m_Z \sim 97 m_p$).

2. Počet vyměňovaných kvant je jednoznačně určen typem spojitě symetrie pohybových rovnic dané interakce: Jeden foton odpovídá symetrii elektromagnetických interakcí, která je matematicky ekvivalentní rotacím v rovině, charakterizovaným jedním úhlem. Tři intermediální bosony odpovídají symetrii slabých interakcí, která je matematicky ekvivalentní rotacím v prostoru, charakterizovaným třemi úhly. Osm gluonů odpovídá symetrii silných interakcí, která nemá názornou geometrickou analogii. Vytváří ji osm unitárních unimodulárních matic rozměru 3×3 .

3. Každá z interakcí je univerzální, čímž myslíme, že pro nejrůznější elementární částice je charakterizována jedinou bezrozměrnou vazbovou konstantou. Síla elektromagnetických interakcí je dána konstantou jemné struktury $\alpha = e^2/4\pi = \frac{1}{137}$. Ta vstupuje např. do formule pro experimentálně měřitelnou veličinu, již je účinný průřez elektromagnetického procesu $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ v nejnižším řádu: $\sigma_{em} \sim (\alpha/\pi)s^{-1}$ (s je kvadrát těžiškové energie e^+e^- systému). Účinný průřez analogického slabého procesu $e^+e^- \rightarrow \nu_e\nu_e$ (ν_e označuje elektronové antineutrino) je v nejnižším řádu možno vyjádřit jako $\sigma_W \sim (G_F^2/\pi)s$, kde G_F je určeno z jiného slabého procesu: $G_F = 10^{-5}m_p^{-2}$. Porovnáme-li účinné průřezy σ_W a σ_{em} při energii odpovídající $s = m_p^2$, okamžitě pochopíme, proč se slabé interakci říká slabá: $\sigma_W/\sigma_{em} \sim 10^{-10}$ (!). Analogicky, porovnáme-li typický účinný průřez silné interakce v nejnižším řádu s elektromagnetickým, pochopíme, proč se silné reakci říká silná — její účinné průřezy jsou o několik řádů větší než elektromagnetické.

Společné rysy všech tří interakcí jsou těžko přehlédnutelné. Vnímavého čtenáře by nemělo překvapit, že prakticky okamžitě po formulaci principu lokální kalibrační invariance se začaly objevovat pokusy o fenomenologické sjednocení elektromagnetických a slabých interakcí postulováním společné kalibrační symetrie. Protagonisty těchto pokusů byli Abdus Salam (1960) a Sheldon Glashow (1961). Kromě problému s rozdílem ve hmotách YM kvant (který prostě ignorovali) se museli vypořádat s experimentálním faktem, že elektromagnetické interakce jsou zrcadlově symetrické, kdežto slabé nikoliv.

Teorie

Případ dobré teorie elektromagnetických interakcí nás vrací do 50. let: Forma kalibrační symetrie byla známa (jeden nehmotný foton) a kvantování elektromagnetického pole nepřiliš složité. Přesto musela odpovídající kvantová elektrodynamika vyřešit jeden obtížný problém: Ve výpočtech korekcí k experimentálně pozorovatelným, a tedy evidentně konečným veličinám se objevovaly nekonečné výrazy! Richard Feynman, Julian Schwinger a Sin-itiro Tomonaga zformulovali rafinovaný předpis, jímž je všechny nekonečné výrazy, které se ve výpočtech objevují, možné lokalizovat do dvou parametrů: elektrického náboje a hmoty elektronu. Jejich číselné hodnoty nejsou pak teoreticky spočitatelné, ale každý z nich je třeba určit z jednoho nezávislého experimentu. Matematicky je tento předpis, zvaný renormalizace, založen na

faktu, že nekonečno minus nekonečno může být konečné číslo. Za přesné výpočty elmag. korekcí, které se od té doby prováděly (např. korekce k σ_{em}), a za předpovědi ryze kvantových elmag. efektů, které byly posléze experimentálně potvrzeny (např. anomální magnetický moment elektronu) obdrželi Feynman, Schwinger a Tomonaga v roce 1965 po právu Nobelovu cenu.

Případ dobré teorie slabých interakcí se ukázal mnohem, mnohem složitější.

Za prvé, o přesném tvaru kalibrační symetrie se dlouhá léta mohlo pouze spekulovat — vždyť intermediální bosony W a Z byly objeveny až v roce 1983!

Za druhé, dlouho neexistoval ani předpis, jak kalibrační pole obsahující W_{\pm} „pořádně“ kvantovat. Významnou vlastností principu lokální kalibrační invariance totiž je, že vztah mezi kalibračními poli a jejich kvanty (částicemi) není jednoznačný. Je dán s přesností do libovolné funkce. Tato nejednoznačnost je pro kvantování, s výjimkou fotonu, značnou komplikací. Problém vyřešili L. Fadějev a V. Popov v roce 1967 v duchu nejlepších tradic teoretické fyziky: zavedli elegantní irrelevance — pomocná pole, jejichž kvanty jsou fiktivní částice, duchové.

Za třetí, princip lokální kalibrační invariance nepřipouští, aby kvanta YM polí interagující pouze s kvarky a leptony a mezi sebou byla hmotná — je tedy ve flagrantním rozporu s fakty! Pro řešení tohoto obtížného problému navrhl v roce 1967 Steven Weinberg použít princip „spontánního narušení symetrie“. Tento princip, opět plný irrelevantností, byl předtím používán a s úspěchem testován v nerelativistické teorii kvantových polí při popisu supravodivosti. Do relativistické podoby ho převedl Peter Higgs. Jako první si uvědomil, že o hmotnosti či nehmotnosti YM kvant nerozhoduje pouze symetrie pohybových rovnic, do nichž vstupují, ale také symetrie jejich řešení. Ukázal, že lze zformulovat kalibračně invariantní teorii hmotných YM kvant, pokud připustíme, že YM pole interagují kromě leptonů, kvarků a mezi sebou navzájem také se skalárními poli, jejichž pohybové rovnice mají nesymetrické řešení rovné konstantě. (Právě tato konstanta fixuje hmoty YM částic.)

Při aplikaci Higgsova mechanismu pro popis hmotných W_{\pm} bosonů měl Weinberg neobyčejně šťastnou ruku. Především zvolil správný typ kalibrační symetrie: totiž ten, který už dříve použili Salam a především Glashow ve svých raných pokusech o elektroslabé sjednocení. Kromě toho si z mnoha myslitelných typů Higgsových skalárních polí zvolil ten nejjednodušší. Výsledkem byl fenomenologický model, „ošklivá žába“, který:

- Předpovídá existenci těžkých W_{\pm} specificky interagujících se slabými (nabitými) proudy leptonů a kvarků. Tento sektor byl Weinberg povinen reprodukovat. Jeho nízkoenergetickým přiblížením byl letitý fenomenologický popis slabých interakcí, v té době experimentálně úspěšný, jehož duchovním otcem byl v dávném roce 1932 jasnozřivý Enrico Fermi.
- Do určité míry sjednocuje elektromagnetické a slabé interakce (postulovaná symetrie není „prostá“).
- Předpovídá existenci těžkého Z bosonu specificky interagujícího s novým slabým elektricky neutrálním proudem leptonů a kvarků.

- Předpovídá hmoty kvant W a Z bosonů v závislosti na jediném parametru, který je třeba určit experimentálně.
- Předpovídá existenci jednoho velmi těžkého Higgsova bosonu se spinem 0 (kvanta Higgsova skalárního pole).

Model byl fyzikální veřejností úplně ignorován. Weinberg však věřil, že je ve skutečnosti dobrou teorií, a jeho renormalizovatelnost se intenzivně pokoušel dokázat. Marně. Samotné ingredience, pro důkaz renormalizovatelnosti nutné, byly právě tou dobou objevovány a jejich opravdové pochopení, bez něhož jsou tvůrčí aplikace sotva myslitelné, vyžadovalo určitý čas.

Ten uzrál v roce 1969, kdy v Utrechtu 38letý profesor Martin Veltman, mezi fyziky elementárních částic všeobecně známý jako „Tini“, přijal nového 23letého doktoranda Gerarda 't Hoofta. Veltman sám byl hluboce přesvědčen o použitelnosti kalibračních polí nejen v elektromagnetických, slabých a silných interakcích, ale i v interakcích gravitačních! Ve svých pokusech dokázat renormalizovatelnost YM teorií, složitějších než kvantová elektrodynamika, dosáhl nezanedbatelných dílčích úspěchů. Byl si jasně vědom toho, že pokud předpis renormalizace, jak lokalizovat nekonečné výrazy v těchto teoriích, vůbec existuje, bude technicky nebo přímo kombinatoricky velmi komplikovaný. Aby se při výpočtu složitých kvantových amplitud vystříhal chyb, vyvinul k tomu účelu počítačový program SCHOONSHIP, po léta potom považovaný za klasický.

Do problematiky zasvěcený 't Hooft dostal za úkol pokusit se renormalizovatelnost kalibračních polí dokázat. Úkolu se zhostil nad veškerá očekávání. V roce 1971 publikoval dvě práce, které ze dne na den posunuly teoretické chápání dynamiky elementárních částic o obrovský kus kupředu.

- Dokázal renormalizovatelnost kalibračních teorií pro případ, kdy kalibrační částice jsou nehmotné. Tento důkaz záhy našel uplatnění v kvantové chromodynamice, která se tou dobou právě rodila.
- Dokázal renormalizovatelnost kalibračních teorií pro případ, kdy kalibrační částice získají hmotu Higgsovým mechanismem. Při důkazu geniálně využil vlastnosti kalibračních teorií, považované na notorickou komplikaci — nejednoznačnosti vztahu mezi YM polem a jeho částicí: Volil libovolné funkce vhodně tak, aby formulaci dílčího okruhu problémů vždy maximálně zjednodušil. Jak významný harvardský teoretik Sidney Coleman trefně poznamenal, proměnil Gerard 't Hooft svým důkazem Glashowovu-Weinbergovu-Salamovu (GWS) žábu v okouzující princeznu. GWS model se záhy stal standardní teorií elektroslabých interakcí a spolu s kvantovou chromodynamikou standardním modelem (SM) elementárních částic.

Události v elektroslabých interakcích pak dostaly rychlý spád: (i) V roce 1973 byly objeveny neutrální proudy v naprosté shodě s předpovědí SM. (ii) V roce 1974 byl objeven c -kvark s hmotou $m_c \sim 1,4 m_p$, jehož existenci standardní model vyžadoval. Glashow, Weinberg a Salam měli evidentně nárok na Nobelovu cenu. Dostali ji v roce 1979. (iii) V roce 1983 byly konečně objeveny v CERNu v Ženevě intermediální bosony W_{\pm} a Z v naprosté shodě s předpovědí SM.

t' Hooftovy a Veltmanovy průkopnické práce umožnily systematické výpočty elektroslabých kvantových korekcí, které od roku 1971, často formou teoretických předpovědí, nepřestávají odolávat všem nastražovaným experimentálním prověrkám. Nejsporně nejpůsobivější je teoretická předpověď velikosti hmoty top kvarku z přesně naměřených elektroslabých korekcí: Poté, co byly objeveny τ -lepton s hmotou m_τ zhruba $1,9 m_p$ (v roce 1975) a b-kvark s hmotou $m_b \sim 4,6 m_p$ (v roce 1977), byl podle GWS teorie top kvark „povinen“ existovat. Hmoty elementárních částic, jak už víme, sice renormalizovatelné teorie obecně počítat neumějí, lze ale jejich číselné hodnoty odhadnout z naměřených korekcí, které na hmotách závisejí. Z takové analýzy vycházela hodnota m_t neuvěřitelných $m_t \sim 160 m_p$ (20 %)! Není tedy divu, že na objev top kvarku s hmotou $m_t \sim 186 m_p$ bylo nutné čekat až do roku 1994, kdy byl ve Fermiho laboratoři v USA uveden do provozu vhodný urychlovač.

Zákonitým a zaslouženým udělením Nobelovy ceny prominentním teoretikům G. 't Hooftovi a M. Veltmanovi tak spěje historie dobré teorie elektroslabých interakcí k svému završení. Je-li opravdu dobrá, musí být objeven také touto teorií předpovězený Higgsův boson. Pokud se tak náhodou nestane, budeme se muset smířit s představou, že Higgsovo pole je pouze fenomenologickým projevem složitější, zatím neznámé dynamiky.

Epilog

Upřímně, byť poněkud neskromně vzato, dobrá teorie elektroslabých interakcí by mohla být lepší. V několika směrech rozhodně totiž fenomenologická je: (i) sjednocení elektromagnetických a slabých interakcí není dokonalé (postulovaná symetrie není prostá). (ii) Neumí počítat hmoty leptonů a kvarků jako číselné násobky jediného etalonu. (iii) Nevysvětluje původ nesymetrie slabých interakcí vůči prostorovému zrcadlení. (iv) „Neví“, proč existují právě 3 generace leptonů a kvarků.

Teorie silných interakcí, teprve v roce 1973 zformulovaná kvantová chromodynamika, se zdá být skutečně dobrá. Ne dost dobří jsou však teoretičtí fyzikové. Vysvětlit s její pomocí experimentální fakt, že kvarky a gluony nelze vysvobodit z jejich hadronových vězení, se jim přes veškeré letité úsilí nedaří.

Že po roce 1973 začaly vznikat na základě společného principu lokální kalibrační invariance pokusy o sjednocení dobrých teorií elektroslabých a silných interakcí v teorii „lepší“, by už čtenáře nemělo překvapit. Je to ale už docela jiný příběh. Zmíňme pouze toto: Pokusy o tzv. „velké sjednocení“ ještě nezískaly žádnou experimentální podporu, přesto už teoretičtí fyzikové sní o teorii „nejlepší“, založené na úplně nových, obecných a krásných, byť zatím spekulativních principech. Můžeme očekávat, že dnes fundamentální výsledky Gerarda 't Hoofta a Martina Veltmana, na nichž není co měnit, se stejně jako výsledky jejich slavných předchůdců stanou součástí budoucích fyzikálních teorií.