

Kvantová elektrodynamika a Feynmanovy diagramy

Chceme-li objasnit základní principy dnešního standardního modelu, musíme začít stručnou rekapitulací kvantové teorie elektromagnetických sil – **kvantové elektrodynamiky** – která v mnoha ohledech sloužila jako vzor při formulaci moderních teorií slabých a silných interakcí. Kvantová elektrodynamika (v dalším budeme často užívat všeobecně rozšířené anglické zkratky QED) vznikla už na přelomu dvacátých a třicátých let 20. století, brzy po kvantové mechanice, ale svou moderní podobu dostala až asi o dvacet let později. Poněkud formálně řečeno, QED je teorie kvantovaného elektromagnetického pole (jemuž odpovídají fotony), interagujícího s nabitými částicemi – např. s elektrony a pozitrony. Nabité částice se přitom také interpretují jako kvanta určitého pole; to však nemá klasickou fyzikální analogii jako pole elektromagnetické. Rovnice QED nelze řešit přesně a je třeba se uchýlit k přibližným metodám. Nejznámější takovou metodou, ostatně běžně užívanou ve všech modelech kvantové teorie, je tzv. **poruchový rozvoj**. Ten je založen na představě, že příslušná interakce je dostatečně slabá a její efekt lze přibližně započítat jako relativně malou korekci k volnému pohybu částic. Vyjádřeno matematicky to znamená, že síla interakce (chápané jako „porucha“ ve volném pohybu) je charakterizována nějakým malým parametrem a přibližné hodnoty fyzikálně zajímavých veličin – jako je třeba účinný průřez rozptylu nebo rozpadová pravděpodobnost – se vyjadřují pomocí systematického rozvoje v mocnínách takového parametru. Jednotlivé členy mocninné řady lze přitom v rámci kvantové teorie pole spočítat v zásadě vždy, pomocí více či méně technicky komplikovaného algoritmu. V kvantové elektrodynamice je charakteristickým

(bezrozměrným) malým parametrem tzv. konstanta jemné struktury, $\alpha = \bar{e}^2/\hbar c$ (název má původ v atomové spektroskopii), jejíž numerická hodnota je blízká $1/137$. Samotná síla elektromagnetické interakce kvantovaných polí je úměrná elementárnímu náboji e a poruchový rozvoj je proto přirozeně uspořádán v mocninách $\sqrt{\alpha}$.



R. Feynman
1918–1988

Moderní verze QED je neodmyslitelně spojena s univerzálním „obrázkovým písmem“ kvantové teorie pole – **Feynmanovými diagramy** (grafy), které, jak sám název napovídá, vynalezl jeden z nejpopulárnějších fyziků dvacátého století Richard Feynman. Tato technika spočívá v grafické reprezentaci matematických výrazů, které vznikají při výpočtech v rámci poruchového rozvoje. Přesněji řečeno – použijeme-li formálního jazyka kvantové teorie – konkrétní

Feynmanův diagram pro určitý proces (např. rozptyl nebo rozpad) představuje dílčí příspěvek k “elementu S -matice”, který obecně dává „amplitudu pravděpodobnosti“ toho, že k uvažovanému procesu dojde (označení S pochází od anglického, resp. německého výrazu pro rozptyl, „scattering“, resp. „Streuung“). Kvadrát absolutní hodnoty elementu S -matice pak podle standardního pravidla kvantové teorie vyjadřuje pravděpodobnost daného procesu a z ní lze poměrně jednoduše dostat relevantní experimentálně měřitelnou veličinu jako je např. účinný průřez. Konkrétní Feynmanův graf vždy odpovídá určitému řádu poruchového rozvoje (tj. určité mocnině příslušného malého parametru) a úplný element S -matice odpovídající uvažovanému procesu je formálně součtem všech relevantních diagramů (rozumí se ve všech řádech). Sečíst všechny diagramy pro daný proces je ovšem nadlidský úkol, protože jich zpravidla přispívá nekonečně mnoho (s rostoucím řádem poruchového rozvoje přitom jejich počet dramaticky roste). Pro přibližný výpočet však naštěstí obvykle stačí omezit se na několik prvních řádů nebo dokonce jen na nejnižší z nich – technika Feynmanových

Silná interakce

Jakmile se od poloviny šedesátých let začal postupně pro-
sazovat kvarkový model hadronů, bylo zřejmé, že stará
Yukawova teorie jaderných sil založená na představě
výměny pionů nemůže obstát jako realistický popis silné
interakce na fundamentální úrovni. Trvalo však několik let,
než byla vytvořena adekvátní teorie mezikvarkových sil.
Problém spočíval v tom, že z počátku nebylo příliš jasné,
co je vlastně relevantní „náboj“ hadronových konstituentů,
který způsobuje, že existují baryony a mezony jako vázané
stavy tří kvarků, resp. kvarku a antikvarku. Začátkem sedm-
desátých let se vyjasnilo, že rozhodující dynamickou roli
hraje kvantové číslo nazývané **barva** (o kterém jsme se již
zmínili v předchozí kapitole), jež bylo do kvarkového modelu
původně zavedeno kvůli uspokojivému popisu baryonů slo-
žených z identických kvarků. K tomu je třeba nejprve uvést
pár slov na vysvětlenou.

Kvarky jsou fermiony se spinem $1/2$ a musí tedy splňovat
Pauliho vylučovací princip – to znamená, že dva identické
kvarky nemohou být ve stejném kvantovém stavu (tento
princip je ve skutečnosti důsledkem obecnějšího pravidla,
podle něhož kvantově-mechanická vlnová funkce systému
identických fermionů musí být *antisymetrická* při jejich
permutacích). Charakteristiky některých známých baryonů
složených ze stejných kvarků (jako je např. Δ^{++} nebo Ω^-) však
ukazují na to, že jejich vlnové funkce (v základním stavu)
jsou symetrické jak vůči prostorovým, tak i spinovým pro-
měnným. V rámci původního Gell-Mann – Zweigova modelu
to představovalo paradox – zdálo se, že kvarky nelze pova-
žovat za standardní fermiony, navzdory polocelé hodnotě
jejich spinu. Tento problém lze odstranit, předpokládáme-
li, že každý kvark existuje ve třech různých „barvách“:

v matematické řeči, kvark s určitou vůní představuje ve skutečnosti triplet vůči další (v tomto případě přesné) symetrii $SU(3)$. Základní stav výše zmíněných baryonů je pak antisymetrický právě vůči barvě a potenciální spor se základními principy kvantové teorie je tak odvrácen.

Ideu, že každý typ kvarku se může vyskytovat ve třech různých stavech charakterizovaných dodatečným kvantovým číslem, formulovali v roce 1965 Moo-Young Han a Yoichiro Nambu (jako „model tří tripletů“, neboť tehdy byly známy pouze vůně u , d a s).¹² Název „barva“ navrhl pro toto kvantové číslo o několik let později Gell-Mann (je ostatně také autorem termínu „vůně“), který původní Han-Nambuovo schéma transformoval do podoby užívané dnes. (Na vysvětlení je třeba říci, že v Han-Nambuově modelu mají kvarky určitého typu s různými barvami také odlišné elektrické náboje, zatímco podle Gell-Manna existují trojice kvarků se stejným nábojem a s různými barvami.). Představa barevných kvarků se navíc hodila i pro objasnění některých dalších otevřených otázek částicové teorie své doby, jako byl např. problém rozpadu neutrálního pionu na dva fotony.

Pro popis interakcí kvarků se z počátku užíval model podobný kvantové elektrodynamice, v němž místo fotonu figuroval „gluon“, částice se spinem 1, která byla podle tehdejších představ barevným singletem, tj. nenesla žádnou barvu. Z dobové literatury je však také zřejmé, že už ve druhé polovině šedesátých a na začátku sedmdesátých let někteří teoretici (jako první zřejmě Y. Nambu) uvažovali o multipletu barevných gluonů – tj. o schématu, které v podstatě odpovídá současným představám. Rozhodující zlom však nastal až v roce 1973, v souvislosti s objevem tzv. **asymptotické volnosti** neabelovských kalibračních teorií; právě v tomto roce nakonec vznikla **kvantová chromodynamika (QCD)** jakožto polní teorie silných interakcí založená na principu lokální symetrie „barevné“ $SU(3)$. V takové teorii je pak nositelem

¹² Pro úplnost poznamenejme, že modelu tří barev byl ekvivalentní koncept „parastatistiky“ kvarků, navržený O. W. Greenbergem v roce 1964.

interakce **oktet barevných gluonů** – ty odpovídají osmi Yang-Millovým polím ($8 = 3^2 - 1$) a podle známých obecných pravidel interagují také samy se sebou (existují samointerakce tří a čtyř gluonů). K obsahu a významu konceptu asymptotické volnosti se vrátíme za chvíli, ale nejprve snad stojí za to uvést několik poznámek historického charakteru.



D. Gross
1941–



F. Wilczek
1951–



D. Politzer
1949–

Je skutečně poněkud obtížné přesně a objektivně označit práci, v níž byla kvantová chromodynamika poprvé formulována. Asymptotickou volnost odhalili David Gross s Frankem Wilczekem a nezávisle na nich David Politzer; své výsledky publikovali ve stejném čísle časopisu *Physical Review Letters* zhruba v polovině roku 1973. Ačkoli jejich výpočty měly dosti obecnou platnost, měli evidentně na mysli i možné aplikace v realistické teorii silných interakcí. Na druhé straně, za vlastní tvůrce QCD se v literatuře často označují Harald Fritzsch, Murray Gell-Mann a Heinrich Leutwyler, a sice na základě jejich společného článku publikovaného koncem roku 1973 v časopise *Physics Letters*. Tato práce však byla zaslána k publikaci až několik měsíců po otištění zásadních článků Grosse, Wilczeka a Politzera. Existují i odkazy na jednu z dřívějších prací Fritzsche a Gell-Manna (obsaženou ve sborníku mezinárodní konference o fyzice vysokých energií konané v Chicagu roku 1972), ale při jejím studiu pozorný čtenář snadno zjistí, že ta je v daném kontextu poněkud zavádějící. Spíše se tedy zdá, že začátkem sedmdesátých let základní