

Jak byly objeveny kvarky, 1. ČÁST

Poznámky k 50. výročí formulace kvarkového modelu



Jiří Chýla

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 2, 182 21 Praha 8; chyla@fzu.cz

Podle současné představy o struktuře hmoty a silách působících v mikrosvětě jsou základními stavebními kameny hmoty tři generace kvarků a leptonů. Přitom z kvarků jsou složeny mimo jiné protony a neutrony, které představují více než 99,9% hmotnosti atomů. Zatímco nejznámější lepton – elektron – je znám již od konce 19. století a je stále považován za elementární částici, myšlenka, že protony a neutrony jsou složeny z ještě fundamentálnějších částic, se zrodila počátkem roku 1964 ve snaze pochopit vlastnosti rodiny nově objevených hadronů, částic příbuzných protonu a neutronu. V článku jsou popsány okolnosti, které vedly Murraye Gell-Manna a George Zweiga současně k formulaci kvarkového modelu hadronů. Podrobně jsou rozebrány nejen zásadní rozdíl mezi fyzikálním obsahem pojmu „elementární konstituent“ hadronů, tak jak ho chápali Gell-Mann a Zweig, ale i obtíže, na které přijetí tohoto modelu zpočátku narazilo v důsledku velmi neobvyklých vlastností, které kvarky měly. Jsou připomenuty další klíčové okamžiky vývoje kvarkového modelu a nové experimentální poznatky, které přivedly koncem 60. let Richarda Feynmana k formulaci partonového modelu hadronů, a přirozené splynutí kvarkového a partonového modelu v rámci kvantové chromodynamiky, jež byla formulována v roce 1973. Článek končí „listopadovou revolucí“ v roce 1974, kdy byla objevena rodina částic, které svědčily o existenci čtvrtého, půvabného kvarku, a jejichž vlastnosti jednoznačně prokázaly správnost koncepce „konkrétních“ kvarků George Zweiga. V první části článku je popsán teoretický a experimentální vývoj zhruba od poloviny 50. let 20. století až do publikace článků Gell-Manna a Zweiga počátkem roku 1964, v druhé pak následující desetiletí až do všeobecného přijetí kvarků jako fundamentálních částic standardního modelu.

Nobelova cena za fyziku pro rok 2013 byla udělena Françoisi Englertovi a Peteru Higgsovi „za teoretický objev mechanismu, který přispěl k našemu pochopení původu hmotnosti subatomárních částic a který byl nedávno potvrzen objevem předpověděné fundamentální částice v experimentech ATLAS a CMS na urychlovači Large Hadron Collider v CERN“.

Higgsův boson byl posledním chybějícím článkem ve standardním modelu částicové fyziky, který popisuje základní stavební kameny hmoty a síly mezi nimi působící. Více než 99,9% hmotnosti nám známé hmoty je přitom obsaženo v protonech a neutronech, jež jsou ve standardním modelu složeny z kvarků. Pro pochopení důvodů, proč trvalo deset let, než byla myšlenka elementárních konstituentů, z nichž jsou složeny protony, neutrony, mezony a další hadrony, všeobecně přijata a proč tato myšlenka narazila zpočátku na silný odpor velké části fyzikální obce, je třeba připomenout okolnosti, za nichž se zrodila, a atmosféru, která v první polovině šedesátých let ve fyzice elementárních částic vládla.

Ačkoliv se v souvislosti s kvarky obvykle nehovoří o jejich objevu, protože v přírodě samostatně neexistují, je přesto analogie mezi tím, jak Rutherford objevil atomové jádro, a tím, jak Zweig objevil o padesát let později kvarky, velmi poučná. Tyto dva objevy spojuje i jedna další okolnost: ani za jeden nebyla přes jejich zásadní důležitost udělena Nobelova cena.

Jak bylo objeveno atomové jádro

O objevu atomového jádra jsem psal podrobně v [1], zde připomenou jen klíčovou tabulku z práce Geigera a Marsdena [2]. V ní byly srovnány podrobné výsledky měření úhlového rozdělení alfa částic, které se rozptylovaly na zlaté a stříbrné fólii, s předpovědí Rutherforda [3] z roku 1911, odvozené v rámci klasické mechaniky za předpokladu, že veškerý kladný náboj v jádře je soustředěn ve velmi malém středu. Souhlas dat s touto předpovědí, měřený přibližnou konstantností čísel ve čtvrtém a šestém sloupci, byl s ohledem na jednoduchost experimentálního uspořádání pozoruhodný a jasně svědčil o správnosti Rutherfordova předpokla-

» Problém to byl sice principiální, ale pro kvantovou elektrodynamiku v praxi nevýznamný. «

du. Je zajímavé a pro analogii s objevem kvarků příznačné, že Rutherford svůj model formuloval na základě velmi přibližných měření Geigera a Marsdena z roku 1909, která jen naznačovala, že částic rozptýlených do zadu bylo nečekaně mnoho.

Empirická skutečnost, že kladný náboj atomu je koncentrován ve velmi malém středu, jádru, vedla Rutherforda k formulaci „planetárního modelu“ atomu, v němž elektrony obíhají kolem jádra. Skutečnost, známá již od roku 1871, že atomy vysílají charakteristické diskrétní spektrum elektromagnetického záření, vedla Bohra krátce po publikaci práce [2] k formulaci modelu [4], jenž kombinoval klasické pojmy, jimiž jsou popisovány částice, tj. poloha a hybnost, s Planckovou kvantovou hypotézou. Toto neorganické a vnitřně protikladné spojení dvou rozdílných světů je zajímavé proto, že ukazuje, jak těžko se měnilo základní paradigma fyziky a jak neradi se fyzikové vzdávali zažitých pojmů. A to přesto, že Bohrov model popisoval data o spektrech elektromagnetického záření pozoruhodně dobře a vysvětloval základní klasicky nepochopitelné vlastnosti, jimž je stabilita základních stavů atomů a identita atomů daného prvku. Planck o Bohrových postulatech v nobelovské přednášce v roce 1918 řekl toto:

Jádro Bohrova modelu atomu je tvořeno řadou předpokladů, které by před dvaceti lety byly každým fyzikem rázně odmítnuty. Skutečnost, že v atomu hrají zvláštní roli některé zcela určitým způsobem vybrané orbity, by ještě šlo přijmout, ale daleko méně to, že elektrony při pohybu po těchto oběžných drahách vůbec nevyzařují. Myšlenka, že by se frekvence vyzařovaných fotonů měly lišit od oběhových frekvencí elektronů, se pak musí zdát každému fyzikovi s klasickým vzděláním na první pohled monstrózní a naprosto nepřijatelná.

Přesto byla Nielsu Bohrovi po právu v roce 1922 udělena Nobelova cena za fyziku „za jeho služby při výzkumu struktury atomů a záření, které z nich vychází“. Důvody, proč Bohrov „monstrózní“ model fungoval, vysvětlila až o čtyři roky později kvantová mechanika

Standardní model

Již sto let víme, že my sami, naše Země i veškerá viditelná hmota ve vesmíru je složená z atomů, ty pak z atomových jader a elektronů a atomová jádra z protonů a neutronů. Výsledkem posledního půlstoletí bádání je poznání, že protony a neutrony jsou dále složeny ze dvou druhů kvarků, označovaných písmeny *u*, *d*. Ty společně se dvěma tzv. **leptony**, elektronem a elektronovým neutrinem, tvoří základní stavební kameny nám známé hmoty a mají společnou vlastnost: spin 1/2. Kromě této čtveřice **fundamentálních fermionů** existují i dvě další, které pro „běžnou“ hmotu kolem nás nepotřebujeme, ale které přesto hrají v přírodních zákonech důležitou roli.

Mezi kvarky a leptony působí čtyři druhy sil: **gravitační, elektromagnetické, slabé a silné**.

Kromě těch prvních patří tři ostatní do třídy tzv. **kalibračních teorií pole**, jež poskytují základní rámec pro popis sil v mikrosvětě. Mají společnou charakteristiku: lze je popsat pomocí „výměny“ zprostředkujících částic tzv. nosičů sil, v odborné terminologii **intermediálních vektorových bosonů** (IVB), které mají spin 1 a jejichž hmotnost je nepřímo úměrná dosahu sil, které zprostředkují. Nosičem elektromagnetických sil je foton, nosiči silných sil jsou gluony, nosiči slabých sil jsou tři – dva elektricky nabitě a označované W^+ a W^- a třetí, označovaný Z , elektricky neutrální. Na rozdíl od fotonu jsou těžké, zhruba 90krát těžší než proton.

TABLE II.
Variation of Scattering with Angle. (Collected results.)

I. Angle of deflection, ϕ .	II.	III.	IV.	V.	VI.
	$\sin^4 \phi/2$	Number of scintillations, N.	$\frac{N}{\sin^4 \phi/2}$	Number of scintillations, N.	$\frac{N}{\sin^4 \phi/2}$
150°	1.15	22.2	19.3	33.1	28.8
135	1.38	27.4	19.8	43.0	31.2
120	1.79	33.0	18.4	51.9	29.0
105	2.53	47.3	18.7	69.5	27.5
75	7.25	136	18.8	211	29.1
60	16.0	320	20.0	477	29.8
45	46.6	989	21.2	1455	30.8
37.5	93.7	1760	18.8	3300	35.3
30	225	5260	23.6	7800	35.0
22.5	690	20300	29.4	27300	39.6
15	3445	105400	30.6	132000	38.4
30	223	5.3	0.024	3.1	0.014
22.5	690	16.6	0.024	8.4	0.012
15	3445	93.0	0.027	48.2	0.014
10	17330	508	0.029	200	0.0115
7.5	54650	1710	0.031	607	0.011
5	276300	3320	0.012

Obr. 1 Tabulka z práce Geigera a Marsdena [3].

ka Schrödingera a Heisenberga. Uvidíme, že podobně „monstrózní“ se o půl století později zdála myšlenka, že nukleony jsou složeny z ještě menších konstituentů. A podobně jako kvantová mechanika vysvětlila monstrózní předpoklady Bohrova modelu, našla i monstrózní hypotéza fundamentálních konstituentů hmoty, které neexistují jako volně izolované částice a mají necelocíselný elektrický náboj, svoje přirozené vysvětlení v rámci kvantové chromodynamiky.

Slepá ulička hadronového rovnostářství

V roce 1929 formuloval Dirac kvantovou elektrodynamiku, kvantovou teorii dvou interagujících polí: elektromagnetického a elektronového. Brzy se ovšem ukázalo, že kvantové korekce, které tato teorie přináší, vedou na nekonečné hodnoty fyzikálních veličin, a to v důsledku jejich chování na velmi malých vzdálenostech. Během 40. let minulého století formulovali Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman a Freeman Dyson proceduru, jež se nazývá **renormalizace**, jak tato nevídaná nekonečna z teorie odstranit. Prvním třem jmenovaným byla za to v roce 1965 udělena Nobelova cena za fyziku.

V roce 1955 podnikli Landau, Pomerančuk a jejich spolupracovníci pokus dát renormalizaci názorný fyzikální a dobrý matematický smysl [5] (viz text v rámečku). Neúspěch tohoto pokusu vedl Landaua a velkou část teoretiků k **odklonu od kvantové teorie pole** jako základního teoretického nástroje pro popis silných interakcí. Problém, na který Landau při snaze dát renormalizaci dobrý smysl narazil, byl sice principiální, ale pro kvantovou elektrodynamiku v praxi irelevantní, a tak ji bylo možno dále používat pro popis fyzikálních procesů. Problém by nastal teprve, kdybychom se snažili popsat srážky elektricky nabitých částic při nepředstavitelně velkých energiích, které ve vesmíru nepanovaly ani v době inflační fáze jeho vývoje. Tato šťastná okolnost je důsledkem malé číselné hodnoty tzv. konstanty jemné struktury rovné 1/137. Pro popis silných interakcí mezi nukleony a mezony však analogická veličina nabývá hodnoty srovnatelné s jedničkou a problémy se smysluplným popisem sil mezi hadrony nastávají již při běžných energiích. Většina teoretiků se v důsledku toho přiklonila matematickému formalismu teorie tzv. **analytické S-matice**, která má přímý vztah k experimentálně měřitelným veličinám.



Renormalizace

Způsob odstranění nekonečnů v rámci poruchové teorie, formulovaný Feynmanem, Schwingerem, Tomonagou a Dysonem a používaný dodnes, spočívá, velmi zhruba řečeno, v redefinici parametrů vystupujících v teorii, konkrétně v kvantové elektrodynamice elektrického náboje a hmotnosti elektronu. Ukazuje se, že vyjdeme-li z tzv. „holých“ veličin, elektrického náboje a hmotnosti, lze řád po řádu všechna nekonečna shrnout do formálně nekonečných veličin, jimiž jsou vynásobeny holý elektrický náboj nebo holá hmotnost. Prohlásíme-li za fyzikální, tj. měřitelné veličiny tyto formálně nekonečné výrazy a vyjádříme-li v těchto „renormalizovaných“ veličinách poruchové řady pro fyzikální veličiny, nekonečna z nich zcela zmizí. Tato procedura je jasná a jednoduchá v nejnižším řádu poruchové teorie, ale dokázat, že takto lze odstranit nekonečna ve všech řádech je velmi složité. Renormalizovaná kvantová elektrodynamika se ukázala jako mimořádně úspěšná při popisu jemných efektů v atomech a byla proto většinou fyziků (byť ne všemi) přijata přesto, že z hlediska principiálního uspokojivá není. Nikdy se s ní nesmířil například sám otec kvantové elektrodynamiky Paul Dirac, který o ní ještě v roce 1974 prohlásil toto:

Většina fyziků je s touto situací velmi spokojena. Říkají: „Kvantová elektrodynamika je dobrá teorie a my se o její základy nemusíme obávat.“ Musím říci, že já jsem s touto situací velmi nespokojen, protože tak zvaná „dobrá teorie“ zanedbává nekonečna, která se objevují v jejich rovnicích, a to způsobem zcela libovolným. Tohle prostě není rozumná matematika. Rozumná matematika zanedbává veličiny, které jsou malé, a ne veličiny, které jsou nekonečně velké a vám se nehodí do krámu! ... Já prostě nemohu tolerovat odklon od standardních pravidel matematiky. Z toho podle mého názoru plyne, že základní rovnice nejsou správné. Musejí být nějakým drastickým způsobem změněny, tak aby se v nich nekonečna vůbec neobjevovala...

V roce 1955 podnikl Landau a jeho spolupracovníci pokus [5] dát renormalizaci matematicky i fyzikálně dobrý smysl. Protože zmíněná nekonečna pocházela z kvantových efektů na malých vzdálenostech, vyšli z aproximace, že elektron má konečný poloměr r_0 . Na kouli o tomto poloměru vložili elektrický náboj e_0 a spočetli kvantové efekty, které mají podobný charakter jako polarizace dielektrika a vedou ke stínění vloženého náboje, jež lze popsat efektivním elektrickým nábojem $e(r)$ na vzdálenosti r od vloženého náboje. Zjistili, že v limitě $r_0 \rightarrow 0$ a pro konstantní vložený náboj e_0 jde efektivní náboj $e(r)$ pro libovolnou vzdálenost r k nule. Výsledkem byla triviální, neinteragující teorie elektronového a elektromagnetického pole. Aby měl efektivní elektrický náboj v limitě $r_0 \rightarrow 0$ konečnou hodnotu, musel vložený náboj e_0 růst s klesajícím poloměrem r_0 . To v principu nevedilo, problém byl v tom, že $e_0(r_0)$ divergovalo do nekonečna na **konečné vzdálenosti**, což znamenalo, že nelze provést limitu $r_0 \rightarrow 0$, jež odpovídá fyzikálnímu bodovému elektronu.

Pohybové rovnice standardní kvantové teorie pole byly nahrazeny svůdnou myšlenkou tzv. **bootstrapu** a místo poruchové řady jako základního matematického nástroje pro výpočet fyzikálních veličin zaujaly tzv. **disperzní relace**, odrážející analytickou strukturu amplitud rozptylu. **Podstatou bootstrapu byl předpoklad, že všechny hadrony jsou stejně elementární** a amplitudy rozptylu hadronů lze jednoznačně určit z několika podmínek a vlastností na ně kladených: analytičnosti, znalosti poloh singularit, jež jsou dány hmotnostmi hadronů, unitarity, křížové symetrie a znalosti chování v nekonečnu. Guruem bootstrapistů byl **Geoffrey Chew** (1924), jehož radikální evangelium, odrážející postoj Landaua, bylo formulováno v [6]:

Domnívám se, že konvenční spojení polí se silně interagujícími částicemi je prázdné. Zdá se mi, že žádná vlastnost silných interakcí nebyla objasněna pojmem pole. Veškeré úspěchy teorie v této oblasti byly založeny na unitaritě analyticky pokračované S-matice a principech symetrie. Nechci tvrdit (jako Landau), že konvenční teorie pole je nutně chybná, jen že je sterilní ve vztahu k silným interakcím a že, jako starý voják, je odsouzena nikoliv zemřít, ale prostě se vytrátit... Představa, nedílně spojená s konvenční lagranžovskou teorií pole, že určité částice jsou fundamentální, zatímco jiné jsou složené, je stále méně přijatelná...

Chew a jeho bootstrap zásadním způsobem ovlivnil myšlení Murraye Gell-Manna a formoval jeho celoživotní postoj k otázce reality možných konstituentů hadronů, které sám později navrhl. Gell-Mann a Chew a jeho bootstrap vzpomíná téměř s dojetím [7]:

A co se mi zvláště líbilo, byla myšlenka, že všechny hadrony jsou stejně elementární nebo neelementární, to se mi zdálo jako pěkný princip. Geoff to nazýval „jaderovou demokracií“, ale já to raději nazýval „hadronovým rovnostářstvím“, šlo ovšem o stejnou věc. A to mne silně ovlivnilo o dva roky později v souvislosti s kvarky, kdy jsem tuto ideu mírně upravil ve smyslu, že žádné pozorovatelné hadrony nejsou elementárnější než jiné. A to stále platí. Přesto, že máme elementární objekty? Ano, elementární objekty nebyly pozorovány mezi hadrony a žádný pozorovatelný hadron nebyl elementárnější než jiný. Tohle jsem si myslel v týž den na návštěvě na Columbiu, kdy jsem přemýšlel o kvarcích. A v to od té doby věřím. Myslím si, že to je pravda.

Naděje vkládané do bootstrapu se nakonec nesplnily, neboť se ukázalo, že podmínky kladené na amplitudy rozptylu neposkytují skutečný dynamický princip, z něhož by bylo možné je jednoznačně stanovit, ale představují jen rámec, který musejí splňovat. Po objevu asymptoticky volných kvantových polí (viz dále) a formulaci kvantové chromodynamiky v roce 1973 se fyzikové ochotně a rádi vrátili ke kvantové teorii pole jako základnímu nástroji pro popis všech sil v mikrosvětě. Stín bootstrapu zůstal jen v pozoruhodném jevu uvěznění kvarků.

Osmerou cestou k pochopení zoologie částic

Tak, jak rostl počet nově objevovaných částic od konce 40. let v kosmickém záření a na urychlovačích, ob-

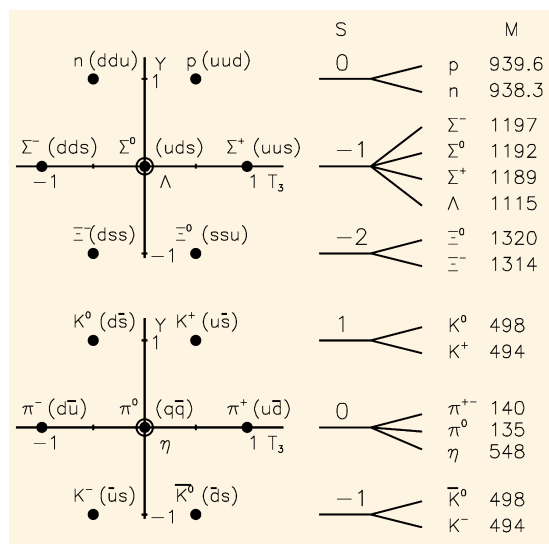
Izotopický spin a izospinová invariance silných interakcí

Ve druhé polovině 30. let 20. století vznikla na základě dat o srážkách protonů a neutronů představa, že z hlediska jaderných sil (v dnešní terminologii silných interakcí) představují proton (p) a neutron (n) dva stavy jedné částice, zvané nukleon. Malý rozdíl hmotností protonu a neutronu byl připsán elektromagnetickým interakcím. Z hlediska matematického formalismu šlo o první případ netriviální **vnitřní symetrie** částic, popsané grupou SU(2). Poté, co byl koncem 40. let objeven triplet pionů (π^+ , π^- , π^0), byla hypotéza izospinové invariance rozšířena i na piony a posléze i na podivné mezony a baryony, které byly během 50. let minulého století objeveny v kosmickém záření a na urychlovačích. Během těchto let se tato hypotéza ve srážkách nukleonů a mezonů plně potvrdila a stala se výchozím bodem budování teorie silných interakcí.

» Pohybové rovnice standardní kvantové teorie pole byly nahrazeny svůdnou myšlenkou tzv. bootstrapu. «



» V ní z „Osmeré cesty“ nezbylo téměř nic. «



Obr. 2 Oktety baryonů se spinem 1/2 a pseudoskalárních mezonů. Symboly v závorkách je kvarkové složení. Hmotnosti částic jsou v MeV.

jevovaly se snahy pochopit jejich souvislosti a hledat nějaké „elementární konstituenty“. Již v roce 1949 se pokusili Fermi a Yang [8] interpretovat piony jako vázaný systém nukleonů a antinukleonů, a to dokonce dříve, než byl antiproton v roce 1955 skutečně objeven. Tak například kladně (záporně) nabitý pion byl interpretován jako vázaný stav protonu a antineutronu (neutronu a antiprotonu) a neutrální pion jako kombinace párů proton-antiproton a neutron-antineutron. Výchozím bodem jejich modelu byla hypotéza izotopické invariance silných interakcí.

Během 50. let minulého století byla objevena celá řada podivných i nepodivných mezonů se spinem 0 a baryonů se spinem 1/2, které tvořily izotopické triplety, dublety a singlety. Byl objeven první izotopický multipllet baryonů se spinem 3/2, kvartet částic $\Delta = (\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-)$. Ve všech případech jsou rozdíly hmotností částic uvnitř jednoho izospinového multipletu velmi malé a vysvětlitelné rozdílností elektrických nábojů. V roce 1956 Sakata rozšířil model Fermiho a Yanga i na podivné mezony a baryony s tím, že trojice proton, neutron a Λ hyperon tvořila základní, fundamentální baryon B a všechny ostatní hadrony byly kombinacemi $B\bar{B}$ v případě mezonů a $BB\bar{B}$ v případě baryonů. Tak například podivný baryon Σ^+ byl v tomto modelu kombinace $p\bar{n}\Lambda$. Sakatův model zůstal ovšem jen na kvalitativní úrovni a nikdy se nerozvinul do konkrétní kvantitativní teorie, která by umožňovala spočítat hmotnosti hadronů z hmotností základních baryonů p, n, Λ . Neopíral se ani o grupu SU(3), která se nabízel jako přirozené zobecnění grupy symetrie mezi třemi základními baryony. Přesto představoval krok správným směrem.

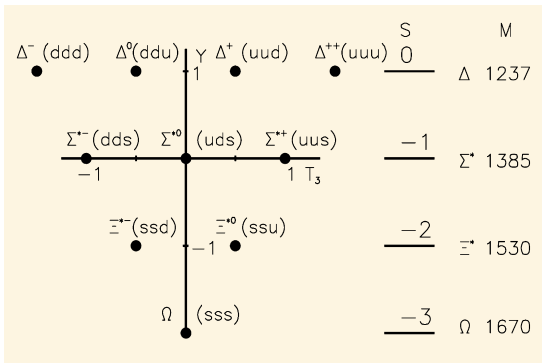
V roce 1954, krátce předtím, než upadla kvantová teorie pole pro silné interakce do nemilosti, vyšla práce Yanga a Millse [9]. V ní autoři zobecnili princip lokální kalibrační invariance, na němž je postavena kvantová elektrodynamika, na případ interakce mezi izotopickým tripletem pionů a izotopickým dubletem nukleonů, jež tvořily reprezentace grupy SU(2). Této práci si přes pět let nikdo nevěšiml, mimo jiné i proto, že předpovídala existenci tripletu elektricky nabitých kalibračních bosonů (mezonů se spinem 1, tzv. vektorových mezonů), které hrály analogickou roli jako fo-

ton v kvantové elektrodynamice a které měly být také nehmotné. Žádné takové částice v té době ovšem nebyly známy.

Až na přelomu padesátých a šedesátých let se několik teoretiků, mezi nimi Neeman a Gell-Mann, k myšlenke kalibračních teorií vrátilo v souvislosti s tím, že všechny do té doby objevené pseudoskalární mezony (mezony se spinem 0 a zápornou paritou) a baryony se spinem 1/2 přirozeným způsobem zaplňovaly oktety grupy SU(3) (viz obr. 2).

Vzhledem k tomu, že k jednoznačnému určení částice v daném oktetu stačila tři kvantová čísla (izospin I, jeho třetí projekce I_3 a hypernáboj Y), bylo jasné, že se nejedná o fundamentální multipllet grupy SU(8), ale o oktety grupy SU(3). Uvedené tři veličiny určovaly elektrický náboj Q podle vztahu $Q = T_3 + Y/2$, kde hypernáboj Y je dán součtem baryonového náboje a podivnosti: $Y = B + S$.

Počátkem roku 1961 publikovali Neeman [10] a Gell-Mann [11] práce, v nichž přímočaře zobecnili kalibrační princip Yanga a Millse na grupu SU(3) a formulovali teorii, v níž oktety mezonů a baryonů interagovaly prostřednictvím výměny oktetu vektorových mezonů, které, podobně jako v případě grupy SU(2), měly být nehmotné a které v té době stále nebyly známy. Zajímavou okolností je skutečnost, že zatímco Neemanova práce vyšla časopisecky, Gell-Mannova, příznačně nazvaná *Osmerá cesta, teorie silných interakcí*, pouze jako preprint. Jeho obsah je ovšem pozoruhodný, oktety mezonů a baryonů jsou konstruovány explicitě z fundamentálního tripletu SU(3) a antitripletu a k tomu účelu jsou zavedeny 3×3 matice, které od té doby nesou označení „Gell-Mannovy matice“. Přitom trojice leptonů elektron, záporný mion a (elektronové) neutrino složila jako „model unitární symetrie“. Gell-Mann tento text zaslal v březnu 1961 do Physical Review, ale krátce nato ho sám stáhl, podle autora autorizované biografie Gell-Manna [12] proto, že se obával, že se jeho hypotéza nepotvrdí. To sice může u Gell-Manna, který byl již v té době výraznou osobností, překvapit, ale je pravda, že počátkem roku 1961 nebyl znám ani jeden vektorový mezon, kterých mělo podle Osmeré cesty existovat osm a které měly hrát v teorii klíčovou roli jako nosiče sil mezi mezony a baryony. V září 1961 Gell-Mann zaslal do Physical Review revidovanou verzi, jež vyšla v březnu 1962 [13]. V ní z Osmeré cesty nezbylo téměř nic, kalibrační teorie ani Yang a Mills nebyly ani zmíněny a hlavní pozornost byla věnována tzv. symetrickému Sakatovu modelu. V něm nejsou protony, neutrony a Λ baryony fundamentální částice, ale jsou součástí vyššího multipletu grupy SU(3) a fundamentální triplet grupy SU(3) neodpovídá žádné částici. Konkrétně měl být oktet baryonů součástí patnáctipletu, který vznikne podobně jako v Sakatově modelu ze dvou fundamentálních tripletů a jednoho antitripletu: $3 \otimes 3 \otimes \bar{3} = 15 \oplus \bar{6} \oplus 3 \oplus 3$. Tento model byl pro Gell-Manna přitažlivý, protože byl konzistentní s doktrínou hadronového rovnostářství, které se Gell-Mann upsal. Znamenal ovšem, že by k osmi známým baryonům se spinem 1/2 mělo existovat sedm dalších. Ani to ovšem nebylo vyloučeno, protože v té době byly objevovány další a další částice, z nichž četné nepřečkaly prověrku času a z tabulek zase zmizely. V osmé kapitole [13] byla pak jako alternativa k symetrickému Sakatovu modelu zmíněna Osmerá



Obr. 3 Dekuplet baryonů se spinem 3/2 podle grupy SU(3) – kvartet Δ byl znám od poloviny 50. let, triplet Σ^* od roku 1960.

cesta, založená na skutečnosti, že ze tří fundamentálních tripletů grupy SU(3) lze vytvořit podle schématu $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$ dekuplet, okteta a singlet. Gell-Mann v této práci žádnou ze dvou alternativ neupřednostňoval, měl „vajíčka v obou koších“.

Důležitý okamžik pro další vývoj teorie silných interakcí nastal v létě 1962 na konferenci v Ženevě, kde byl oznámen objev izotopického dubletu baryonů se spinem 3/2, označovaných jako Ξ^{*-} a Ξ^{*0} , který doplnil známý izotopický kvartet Δ a izotopický triplet Σ^* , na devět baryonů se spinem 3/2 (obr. 3). Data dále ukazovala, že rozdíl hmotností Δ a Σ^* (149 MeV) je téměř stejný jako rozdíl hmotností Σ^* a Ξ^* (145 MeV). Protože dekuplet grupy SU(3) je složen z izotopického kvartetu, tripletu, dubletu a singlem, byl objev dubletu Ξ^* silným náznakem, že by měla existovat ještě jedna částice se spinem 3/2 a hmotností okolo 1 675 MeV. V diskusi po oznámení objevu Ξ^* Gell-Mann tuto částici (dnes označovanou jako Ω^-) i její hmotnost předpověděl, a především za tuto předpověď získal v roce 1969 Nobelovu cenu. Je ovšem doloženo přímými svědky, včetně autorů objevu Ξ^* , že stejnou předpověď měl připravenou i Yuval Neeman, neboť zvěsti o objevu Ξ^* v odborných kruzích již nějakou dobu kolovaly. Vzhledem k tomu, že o Osmerou cestu měli Gell-Mann i Neeman stejnou zásluhu, měl podle mého názoru dostat Nobelovu cenu i Neeman, jehož životní osudy byly navíc daleko komplikovanější a klikatější než Gell-Mannovy.

Baryon Ω^- , jehož existence byla klíčová pro formulaci kvarkového modelu, byl objeven ve srážkách záporných kaonů s protony na urychlovači v Brookhavenu až koncem ledna 1964 (obr. 4), ale další vývoj na tento objev nečekal. Fyzikové stáli před přirozenou otázkou: existují částice, které odpovídají fundamentálnímu tripletu grupy SU(3), z něhož (a jeho antitripletu) lze zkonstruovat libovolné multiplety grupy SU(3), a z nichž se tedy všechny pozorované mezony a baryony skládají? Odpověď přišla od dvou fyziků, jejichž životní příběhy byly diametrálně odlišné, ale které se v klíčový okamžik protnul: Murraye Gell-Manna a George Zweiga. Každý z nich byl motivován jiným aspektem fenomenologického úspěchu Osmeré cesty a i jejich interpretace pojmu „základní konstituenty“ hmoty byly dramaticky odlišné.

Jak Gell-Mann vymyslel „tokové“ kvarky

Gell-Mann na svou cestu ke kvarkům, jak nazval objekty, jež v jeho pohledu odpovídaly fundamentálnímu tripletu grupy SU(3), vzpomíná slovy [7]:

Na jaře 1963 jsem přednášel na MIT obecný kurz o elementárních částicích a jedna věc, o níž jsem mluvil, se týkala otázky, zda triplet SU(3) v Osmeré cestě by mohl představovat skutečný objekt. Zkoušel jsem různá schémata a samozřejmě i $3 \times 3 \times 3 = 1+8+8+10$. Bylo zarážející, že všechny známé baryony zaplňovaly singlety, oktety a dekuplety, a silně to naznačovalo, že baryony byly vytvořeny ze třech fundamentálních tripletů. Ale uvědomoval jsem si, že v tom případě by triplety měly neceločíselný elektrický náboj. A tak jsem třídě řekl, abychom se této možnosti vyhnuli, bude asi třeba zavést čtyři objekty.

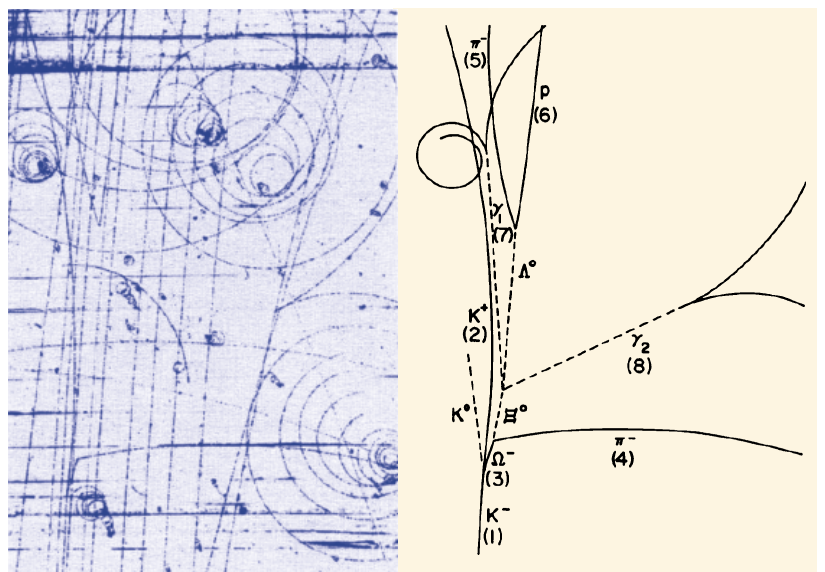
Zmínka o čtyřech objektech vycházela ze snahy dostat fyzikálně relevantní oktety a dekuplety kombinací stejného počtu tripletů a antitripleťů (tedy částic a antičástic) podle vztahů

$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$$

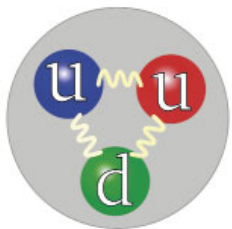
$$3 \otimes 3 \otimes \bar{3} \otimes \bar{3} = 27 \oplus 10 \oplus 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1 \oplus 1$$

U mezonů není s neceločíselnými náboji problém, neboť podle první relace jsou kombinacemi tripletů a antitripleťů SU(3), ale abychom dostali okteta a dekuplet baryonů, bylo nutno předpokládat existenci čtvrtého fundamentálního objektu, jímž byl elektricky neutrální izotopický singlet s baryonovým číslem 1 (a samozřejmě jeho antičástice). V tomto modelu byly baryony tvořeny kombinacemi *třb*, resp. *třtb* a všechny čtyři fundamentální objekty mohly mít celočíselný náboj i baryonové číslo. Zde je však třeba zdůraznit, že proti neceločíselnému elektrickému náboji neexistovaly žádné vážné, fyzikálně motivované argumenty, kromě toho, že zatím takové částice nebyly pozorovány. Gell-Mann ve vzpomínkách pokračuje slovy:

A pak někdy v březnu nebo dubnu jsem jel na Kolumbijskou univerzitu dát seminář a Bob Serber se mne při obědě zeptal, proč nevyužívám formuli $3 \times 3 \times 3 = 1+8+8+10$ a nepostuluji nějaký objekt, který by triplet reprezentoval. A já mu řekl, že jsem o tom samozřejmě přemýšlel, ale moc se mi nelíbí, protože náboje vycházejí neceločíselné. Když jsem o tom pak přemýšlel, napadlo mne, že tyhle částice možná nikdy nevyjdou ven, nejsou pozorov-



Obr. 4 Vlevo: snímek z bublinové komory zachycující srážku záporného kaonu s protonem, v níž vznikl baryon Ω^- v procesu $K^- p \rightarrow K^0 \Omega^-$. Vpravo: grafická rekonstrukce případu vlevo.



Vnitřní struktura protonu: dva kvarky u a jeden kvark d. Zdroj: CC BY-SA 2.5 Arpad Horvath

vatelné. Jsou navždy uvízlé uvnitř hadronů. A pak není žádný spor s hadronovým rovnostářstvím, které jsem měl tak rád. Jediné, co je třeba říci, že všechny pozorovatelné hadrony jsou stejně neelementární, a to se mi velmi zamlouvalo. A tak jsem se touhle věcí začal zabývat, abych viděl, zda je to vážná možnost.

Výsledkem jeho úvah byl krátký článek [14], v němž se pokusil smířit doktrínu bootstrapu s empirickým úspěchem Osmeré cesty. Tento cíl je formulován již prvním odstavci:

Pokud předpokládáme, že silné interakce baryonů a mezonů jsou správně popsány v pojmech „Osmeré cesty“, máme pokušení hledat nějaké fundamentální vysvětlení této situace. Velmi slibný je čistě dynamický model „bootstrapu“ všech silně interagujících částic, v němž lze odvodit zachování izotopického spinu a podivnosti i narušení unitární symetrie jen z vnitřní konzistence modelu.

Gell-Mann byl přesvědčen, že fyzikální smysl mají jen veličiny popisující hadrony a správná teorie by měla popisovat vztahy mezi těmito veličinami. Kvarky nebo i jiné objekty mu proto sloužily jen jako nástroj, jak takové vztahy najít, z teorie pracující s kvarky je „abstrahovat“ a postulovat jejich platnost pro veličiny popisující hadrony. V článku diskutuje dva modely opírající se o empirický úspěch Osmeré cesty, z nichž je možno abstrahovat vztahy pro veličiny popisující hadrony. První, který uvažoval, je již zmíněný model se čtyřmi fundamentálními entitami (Gell-Mann se vyhýbal výrazu „částicemi“), tvořenými SU(3) tripletem a singletem, v němž nabývají elektrické náboje i baryonová čísla celočíselných hodnot. Svým typicky opatrnickým způsobem pak zmínil i druhou možnost, v níž chybí unitární baryonový singlet:

Jednodušší a elegantnější schéma lze zkonstruovat, jestliže povolíme neceločíselné hodnoty nábojů. Základního baryonu b se lze zcela zbavit, jestliže tripletu přiřadíme následující vlastnosti: spin 1/2, z = -1/3 a baryonové číslo 1/3. Členy tripletu u(2/3), d(-1/3) a s(-1/3) nazveme kvarky q a členy antitripletu antikvarky \bar{q} .

V této větě Gell-Mann poprvé použil název pro hypotetické fundamentální entity – „kvarky“ –, který se okamžitě ujal. Význam tohoto slova a zajímavé okolnosti jeho vzniku jsou popsány v [15]. Veličiny v závorkách jsou elektrické náboje v jednotkách náboje pozitronu. Energeticky nejnižší konfigurace tří kvarků odpovídaly v tomto modelu experimentálně pozorovaným částicím v baryonovém oktetu a deketpletu SU(3), zatímco mezony odpovídaly kombinacím kvarku a antikvarku. Hlavní smysl zavedení kvarků je uveden o dvě věty níže:

Formální matematický model založený na teorii pole lze zkonstruovat s použitím kvarků stejně jako s protonem, neutronem a Λ baryonem ve starém Sakatově modelu, přičemž silné interakce jsou připsány poli neutrálního vektorového mezonu, jenž interaguje se třemi kvarky symetricky. V tomto rámci je elektromagnetický tok (v orig. „current“, pozn. J. Ch.) dán výrazem

$$\left[\frac{2}{3} \bar{u} \gamma_\alpha u - \frac{1}{3} \bar{d} \gamma_\alpha d - \frac{1}{3} \bar{s} \gamma_\alpha s \right].$$

Tento výraz, v němž vystupují neceločíselné elektrické náboje trojice kvarků u, d, s, je obvyklý výraz

pro elektromagnetický tok generovaný fermionem se spinem 1/2 a Gell-Mann ho v dalším společně s podobným výrazem pro slabý tok kvarků použil pro odvození tzv. komutačních relací mezi těmito toky. Ty pak z tohoto konkrétního polního modelu „abstrahoval“ a doufal, že jejich použití v rámci formalismu disperzních relací povede k úplnému určení elektromagnetických a slabých toků fyzikálních hadronů. Takto zavedené kvarky proto Gell-Mann nazýval „tokové“ kvarky.

V článku není nic o kvarkovém složení konkrétních mezonů a baryonů ani o tom, co je původem pozorovaného narušení unitární symetrie v hmotnostech mezonových a baryonových multiplletů a zda, resp. jak toto narušení unitární symetrie na úrovni hadronů souvisí s hmotnostmi samotných kvarků. Neznepokojoval ho proto ani problém statistiky kvarků, na nějž narazil Zweig. Poznámka na závěr článku

Je zajímavé spekulovat o tom, jak by se kvarky chovaly, kdyby byly fyzikálními částicemi s konečnou hmotností (místo čistě matematických entit, jakými by byly v případě nekonečné hmotnosti)... Pátrání po stabilních kvarcích s nábojem 2/3 a -1/3 nebo stabilních dikvarcích s nábojem = 2/3, 1/3 nebo 4/3 na urychlovačích s nejvyššími energiemi by nám pomohlo ujistit se o neexistenci reálných kvarků.

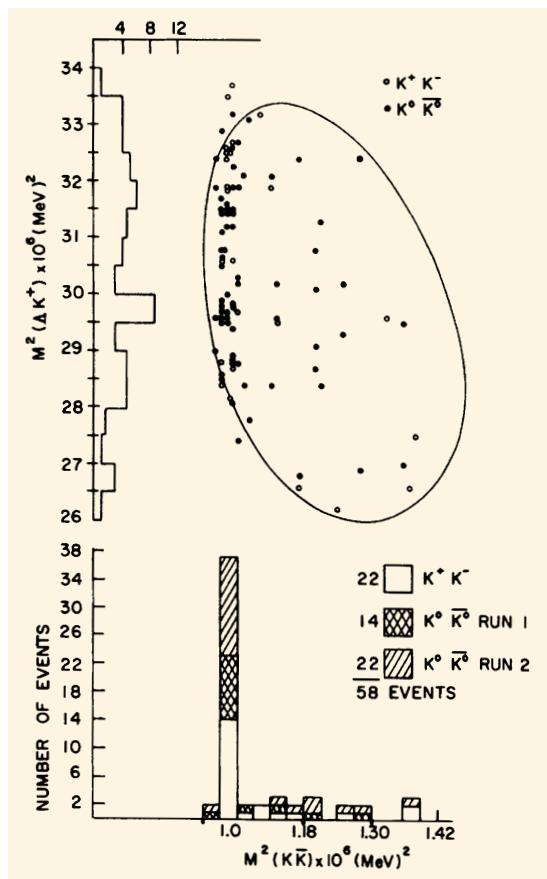
je zjevně v duchu Gell-Mannovy víry v hadronové rovnostářství. Svůj pohled na roli kvarků v teorii silných interakcí Gell-Mann shrnul v létě 1964 v článku [16] takto:

Abychom získali vztahy, o nichž budeme předpokládat, že jsou pravdivé, využijeme metodu abstrakce z modelu založeného na lagranžovské teorii pole. Jinými slovy, konstruujeme matematickou teorii silně interagujících částic, která může, ale nemusí mít cokoli s realitou, nalezneme vhodné algebraické relace, které platí v modelu, postulujeme jejich platnost a pak model zahodíme. Tento postup můžeme srovnat s metodou, kterou někdy používají ve francouzské kuchyni: kus masa z bažanta se pečce mezi kousky telecího a to se pak vyhodí.

Kvarky byly pro Gell-Manna tím telecím, vztahy mezi veličinami popisujícími hadrony tím bažantem. Jak uvidíme, tento legitimní postoj se ukázal jako sterilní a dnes jen málokdo pochybuje o tom, že kvarky mají konkrétní fyzikální obsah a že jejich vlastnosti jednoznačně určují vlastnosti veličiny popisující hadrony. Tomu, že neexistují jako samostatné volné částice, dnes rozumíme a není to na překážku, abychom považovali kvarky za reálné fyzikální objekty. Metoda „abstrakce“ nefunguje a my musíme pracovat přímo s kvarky. V zásadě tak, jak to navrhl druhý otec kvarků – George Zweig.

Jak Zweig objevil „konkrétní“ kvarky

S myšlenkou elementárních objektů, z nichž jsou složeny mezony a baryony, přišel současně s Gell-Mannem také o osm let mladší George Zweig (ročník 1937). Jeho cesta k poznání, že mezony a baryony jsou složené systémy, interpretace konstituentů, z nichž jsou mezony a baryony složeny, i smysl, v jakém „složenost“ hadronů chápal, se přitom diametrálně lišila od kvarků Gell-Manna. Zweig byl počátkem 60. let doktorandem na Caltechu, kde v té době pracovala řada skvělých fy-



Obr 5. Dvojměrné rozdělení případů procesu $K^-p \rightarrow \Lambda + K + \bar{K}$ jako funkce kvadrátů invariantních hmotností párů $K\bar{K}$ (osa x) a ΛK (osa y) a jeho projekce na tyto osy.

ziků – mezi nimi i Gell-Mann a Feynman. Tématem Zweigovy doktorské disertace byla analýza rozpadů nabitých kaonů produkovaných ve srážkách na urychlovači v Berkeley s cílem hledat projevy narušení invariance při obrácení toku času, tedy v podstatě experimentální práce. S negativními výsledky nebyl ovšem spokojen, a tak se po dvou letech rozhodl přejít na teorii. Požádal Gell-Manna, aby byl jeho školitelem, ale ten právě odcházel na sabbatical na východní pobřeží, a tak poslal Zweiga za Feynmanem. Ten ho přijal, ale nové téma mu neurčil. Disertaci na původní experimentální téma v lednu 1964 Zweig obhájil, ale ještě předtím, během osmi měsíců od konce dubna 1963, ukázal, že data o nově objeveném vektorovém mezonu, označovaném ϕ , svědčí o tom, že je složen z elementárnějších objektů.

V polovině dubna 1963 se totiž objevila práce [17], v níž byl oznámen objev nového vektorového mezonu s hmotností 1 019 MeV, jenž vznikal ve srážkách záporných kaonů s protony na urychlovači v Brookhavenu v procesu $K^-p \rightarrow \Lambda + K + \bar{K}$. Na obrázku 5 je vyneseno dvojměrné rozdělení případů tohoto procesu jako funkce kvadrátů invariantních hmotností dvojic $K\bar{K}$ a ΛK a projekce tohoto rozdělení na obě osy. V projekci na osu x je jasně patrný pík v rozdělení invariantní hmotnosti páru $K\bar{K}$, obsahující 23 případů, který svědčí o existenci mezonu s hmotností okolo 1 000 MeV. V práci byly určeny i další charakteristiky nové částice: spin 1, parity -1 a izotopický spin 0. Částice s takovými vlastnostmi se podle tehdejších teoretických představ měla rozpadat především na tři piony. Náznak několika případů tohoto rozpadu byl pozorován, ale jejich po-

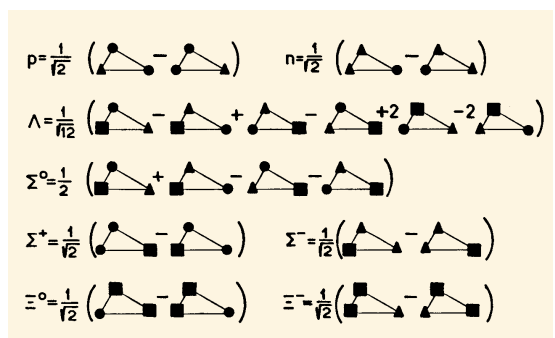
čet představoval asi třetinu případů rozpadu na dvojici kaonů. Autoři [17] si této nečekané skutečnosti všimli, ale nepovažovali ji za „zneklidňující“.

Pozorovaná částice se rozpadala převážně na dvojici, $K\bar{K}$ a nikoliv na tři piony, přestože její hmotnost byla jen těsně za dvojnásobkem hmotnosti kaonů, tj. 990 MeV, zatímco hmotnost tří pionů je jen 420 MeV. Zweig nebyl zatížen doktrínou jaderného rovnostářství a bootstrapu, podle nějž procesy, které nejsou nějakým zákonem zachování zakázány, jsou dovoleny a probíhají s maximální pravděpodobností určenou unitaritou, což v případě rozpadů částic znamenalo, že rozpady na lehké částice jsou četnější než na těžké částice. Vlastnosti ϕ mezonu byly v přímém rozporu s touto doktrínou a to bylo pro Zweiga jasným svědectvím o vnitřní struktuře ϕ mezonu a odrazovým můstkem k formulaci jeho modelu.

V rozsáhlém preprintu [18] nazvaném *An SU₃ Model for Strong Interaction Symmetry and its Breaking*, jehož první verze [19] se objevila v polovině ledna 1964, Zweig na základě vlastností ϕ mezonu formuloval model, který vycházel z empiricky úspěšné SU(3) symetrie, ale v němž navíc fundamentálnímu tripletu grupy SU(3) odpovídá trojice „es“, z nichž jsou složeny všechny mezony a baryony. Obsah preprintu dobře charakterizuje jeho abstrakt:

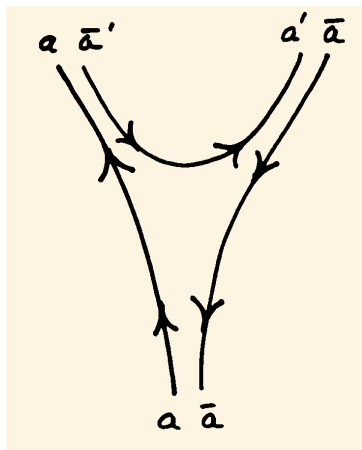
Mezony i baryony jsou zkonstruovány ze třech fundamentálních částic nazvaných esa. Esa se dělí na izotopický dublet a singlet. Každé eso nese baryonové číslo 1/3 a neceločíselný elektrický náboj... SU(3) (ale ne Osmé cest) je postulována jako vyšší symetrie silných interakcí. Narušení symetrie se předpokládá univerzální, a to v důsledku rozdílnosti hmotností es. Rozsáhlá prostorovo-časová a grupově-teoretická struktura je předpovězena pro mezony i baryony v soulase s experimentálními údaji. ... Je navrženo experimentální pátrání po esech.

Zweigova esa A_1, A_2, A_3 z hlediska kvantových čísel přesně odpovídala Gell-Mannovým kvarkům u, d, s , ale na rozdíl od něj s nimi Zweig pracoval podobně jako s nukleony v jádrech. V práci [18] jsou zkonstruovány explicitní výrazy pro vlnové funkce základních stavů tří es odpovídajících oktetu baryonů se spinem 1/2 (obr. 6) i deketu baryonů se spinem 3/2 a párů kvark-antikvark odpovídajících oktétům pseudo-skalárních i vektorových mezonů. Původ rozdílnosti hmotností izotopických multipletů v rámci jednoho unitárního multipletu je důsledkem podstatně vyšší hmotnosti podivného esa s ve srovnání s hmotnostmi izotopického dubletu es, d a určitého přirozeného



Obr. 6 grafické znázornění vlnových funkcí oktetu baryonů se spinem 1/2. Esa odpovídající kvarkům u, d, s jsou znázorněna kroužky, trojúhelníky a čtverečky.





Obr. 7
Zweigův diagram preferovaného módu rozpadu mezonu složeného z esa a a jeho antiesy \bar{a} na mezony obsahující původní dvojici $a\bar{a}$.

předpokladu o vazbových energiích es uvnitř mezonů a baryonů.

V práci je také formulováno fenomenologické pravidlo, které vysvětlilo neobvyklé módy rozpadu ϕ mezonu. Grafické znázornění tohoto „Zweigova pravidla“ je na obrázku 7: mezon skládající se z páru eso-antieso $a\bar{a}$ se z dynamických důvodů rozpadá preferovaně na pár mezonů, které obsahují původní eso i antieso. Rozpady na jiné kanály, které jsou povoleny, jsou vůči tomuto preferovanému módu rozpadu potlačeny. Konkrétně v případě ϕ mezonu data svědčila o tom, že se skládá z esa a antiesy, které odpovídají kvarku s a jeho antikvarku, a rozpadá se proto dominantně na kaon a antikaon, které obsahují kvark s a jeho antikvark. Veličinu kvantifikující míru tohoto potlačení ovšem Zweigovo pravidlo neudávalo, ale bylo jasné, že čím těžší je eso a , tím větší lze očekávat potlačení. Zweigovo pravidlo sehrálo o deset let později klíčovou roli při interpretaci nově objevené částice J/ψ jako vázaného stavu čtvrtého, půvabného kvarku a jeho antikvarku.

V přednášce na letní škole [20] o půl roku později Zweig rozšířil symetrii SU(3) na symetrii SU(6) zahrnující i spin kvarků. Existence oktetu baryonů se spinem 1/2 (celkem 16 baryonů) a deketu baryonů se

spinem 3/2 (celkem 40 baryonů) naznačovala, že tyto baryony zaplňují 56-rozměrný multiplet grupy SU(6), jenž je plně symetrický vůči permutaci pořadí es. Aby byla celková vlnová funkce plně antisymetrická, jak vyžaduje Pauliho princip, musela být prostorová část vlnové funkce plně antisymetrická, což je v případě základních stavů velmi obtížně dosažitelné. Zweig si byl tohoto problému vědom, ale jeho vyřešení bylo již dílem jiných autorů.

Podobně jako v případě Gell-Mannovy práce o Osmé cestě [11], nebyla ani Zweigova práce [18] nikdy časopisecky publikována. V tomto případě ovšem v důsledku překážek, které tomu kladl Leon Van Hove, vedoucí teoretického oddělení CERN, kde byl tehdy Zweig na stáži [20]. Je neuvěřitelné, kam až zašel odpor k nekonvenční myšlence formulované mladým nezavedeným člověkem, která bořila tehdejší teoretickou doktrínu. Van Hove zrušil oznámený Zweigův seminář a nedovolil mu ho přesunout na jiný termín. Když měl Zweig v listopadu 2013 seminář před nabitým auditoriem v CERN [21], poznamenal v diskusi Alvaro de Rujula případně: „Seminář s padesátiletým zpožděním“. Zajímavé osobní svědectví o Zweigově cestě k esům a atmosféře, která tehdy ve fyzice elementárních částic vládla, je uvedeno v [22, 23].

Literatura

- [1] J. Chýla: Čs. čas. fyz. 61, 384 (2011).
- [2] H. Geiger, E. Marsden: Phil. Mag., Ser. 6, 25, 148 a 604 (1913).
- [3] E. Rutherford: Phil. Mag., Ser. 6, 21, 125 a 669 (1911).
- [4] N. Bohr: Phil. Mag., Ser. 6, 26, 161 (1913).
- [5] L. D. Landau, A. A. Abrikosov, I. M. Khalatnikov, Dokl. Akad. Nauk SSSR 95, 497, 773 a 1177 (1954); L. D. Landau: ve sborníku *Niels Bohr and the Development of Physics*. Pergamon Press, London 1955. Dostupné na WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Landau_pole.
- [6] G. Chew: *S-Matrix Theory*. Benjamin 1961.
- [7] <http://www.webofstories.com/play/murray.gell-mann/99>
- [8] E. Fermi, C. N. Yang: Phys. Rev. 76, 1739 (1949).
- [9] C. N. Yang, R. Mills: Phys. Rev. 96, 191 (1954).
- [10] Y. Neeman: Nucl. Phys. 26, 222 (1961).
- [11] M. Gell-Mann: Caltech CTSL-20.
- [12] G. Johnson: *Strange Beauty*. Random House 1999.
- [13] M. Gell-Mann: Phys. Rev. 125, 1067 (1962).
- [14] M. Gell-Mann: Phys. Lett. 8, 214 (1962).
- [15] <http://www.thefreedictionary.com/quark>
- [16] M. Gell-Mann: Physics 1, 63 (1964).
- [17] P. L. Connolly a kol.: Phys. Rev. Lett. 10, 371 (1963).
- [18] G. Zweig: CERN TH-412.
- [19] G. Zweig: CERN TH-401.
- [20] G. Zweig: „Fractionally charged particles and SU(6)“, in: *1964 International School of Physics „Ettore Majorana“: Symmetries in Elementary Particle Physics*. A. Zichichi, ed. 1965.
- [21] G. Zweig: Int. J. Mod. Phys. A 25, 3863 (2010).
- [22] G. Zweig: http://phsummer2013.web.cern.ch/PHsummer2013/Beginning_of_the_End_F.pdf.
- [23] G. Zweig: CALT-68-805, http://www-lib.kek.jp/cgi-bin/img_index?8102237.
- [24] G. Zweig: <http://ph-news.web.cern.ch/content/interview-george-zweig>.

Kalibrační teorie

Název „kalibrační teorie“ odráží skutečnost, že tyto teorie jsou invariantní vůči volbě veličin, kterými pole popisujeme (volbě tzv. „kalibrace“), zhruba ve stejném smyslu, jako objekty v našem prostoru jsou invariantní vůči volbě souřadnicového systému, který při jejich popisu používáme (tj. např. kartézský, polární apod.). Prototypem kalibrační teorie je teorie interagujících elektromagnetického a elektronového pole, které můžeme popisovat s použitím různých čtveřic skalárního a vektorového potenciálu, jež dávají stejné hodnoty fyzikálně měřitelných intenzit elektrického a magnetického pole. Matematickým nástrojem této teorie i její kvantové podoby, kvantové elektrodynamiky, je grupa U(1) fázových transformací elektronového pole. Krátce po formulaci kvantové elektrodynamiky v roce 1929 Ukázal Hermann Weyl, že ji lze odvodit z požadavku lokální kalibrační invariance, tj. nezávislosti jejích rovnic na změně fáze elektronového pole v každém bodě prostoru nezávisle. Důsledkem této invariance jsou dvě její základní vlastnosti: nulovost hmotnosti fotonů a zachování elektrického náboje. Teoretická obliba kalibračních polí spočívá v tom, že dávají za každých okolností smysluplné předpovědi (odborně řečeno jsou renormalizovatelné). To víme od roku 1970 díky Gerardu 't Hooftovi a Martinusu Veltmanovi, kteří za své práce získali v roce 1999 Nobelovu cenu.

