

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Chýla

Od barevných kvarků ke kvantové chromodynamice a Nobelově ceně za fyziku v roce 2004

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 50 (2005), No. 1, 2--26

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141251>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2005

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>

Od barevných kvarků ke kvantové chromodynamice a Nobelově ceně za fyziku v roce 2004

Jiří Chýla, Praha

Pokrok ve vědě jde často daleko složitějšími cestami, než jak se o tom dočítáme v knihách o historii vědy. To platí zvláště o teoretické fyzice, částečně proto, že dějiny píší vítězové. Historikové často ignorují různé cesty, jimiž se vývoj ubíral, mnohé falešné stopy, po nichž se fyzikové ubírali, a všechny chybné představy, jež měli. Četbou historických pramenů jen vzácně získáme správnou představu o skutečné podstatě vědeckého pokroku, do něhož patří fraška stejně jako triumf. Vznik a vývoj kvantové chromodynamiky je krásný příklad vývoje od frašky až k triumfu.

DAVID GROSS, laureát Nobelovy ceny za fyziku v roce 2004

Úvodní citát z přednášky *25 let asymptotické volnosti*, kterou David Gross přednesl v roce 1998 na konferenci o historii fyziky, snad nejlépe vystihuje cestu, kterou se v uplynulých zhruba padesáti letech ubíraly snahy fyziků pochopit strukturu hmoty a zákonitosti, jimiž se její základní stavební kameny řídí. Loňská Nobelova cena za fyziku byla udělena za objev, který zásadním způsobem změnil naše chápání sil působících v mikrosvětě a který ve svých důsledcích vedl k tomu, že jsme pochopili strukturu protonů a neutronů, tedy částic, z nichž se skládá více než 99,9 % hmoty na Zemi.

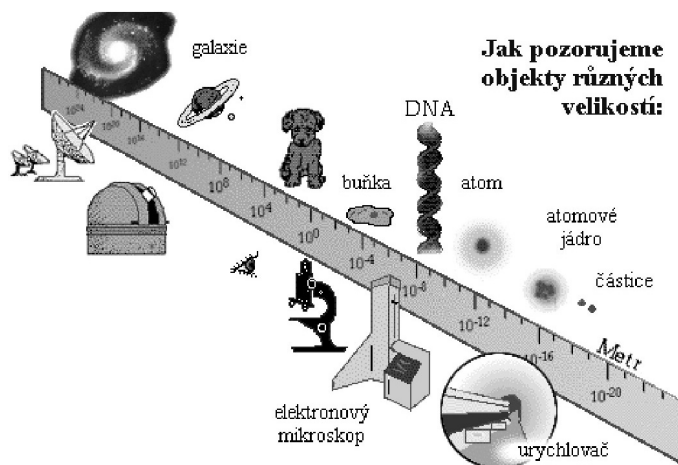
Objev vlastnosti některých sil působících v mikrosvětě, nazývané *asymptotická volnost*, má však i širší důsledky, neboť se dotýká otázky, jaký má — či nemá — smysl hovořit o něčem, co neexistuje v přírodě jako izolovaný objekt, ale jen jako součást složitějších systémů. Rubem asymptotické volnosti je totiž tzv. uvěznění kvarků, jev mimořádně zajímavý a v našem běžném životě velmi neobvyklý.

Abychom mohli aspoň v hrubých rysech pochopit hloubku a krásu těchto jevů a klikatou cestu k nim, musíme si připomenout základní experimentální i teoretické objevy, které přispěly k formulaci našich dnešních představ o struktuře hmoty na velmi malých vzdálenostech a o zákonitostech, které v mikrosvětě platí. Tyto představy jsou shrnuty v tzv. **standardním modelu** (SM), jehož základní rysy jsou nastíněny na stránkách 25 a 26.

Prof. JIŘÍ CHÝLA, CSc. (1948), Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8,
e-mail: chyla@fzu.cz

Od galaxií k nukleonům

První věc, kterou je užitečné si uvědomit, jsou rozměry, o něž dále půjde. Na obrázku 1 je znázorněna posloupnost některých fyzikálních objektů a jejich velikostí, od těch největších, jimiž se zabývá kosmologie, až po ty nejmenší, jež jsou předmětem zájmu fyziků částic.

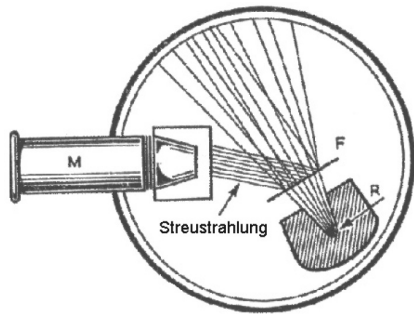
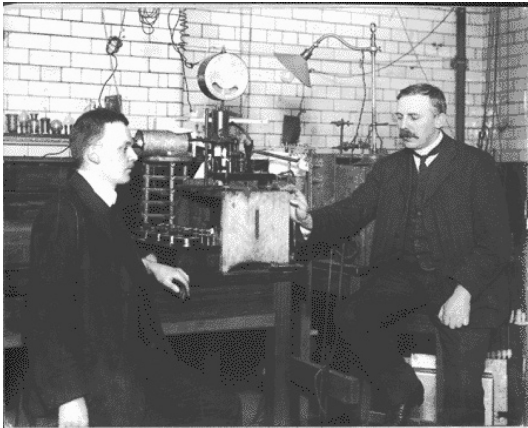


Obr. 1. Rozměry různých fyzikálních objektů.

Připomeňme, že **atomové jádro** objevil **Rutherford** se svými asistenty Geigerem a Marsdenem v roce 1911 při studiu rozptylu alfa částic na terčičku ze zlata a jiných prvků. Základní schéma jeho pokusu, znázorněné na obr. 2, se stalo prototypem dalších experimentů, a proto ho zde připomeneme: výsledky srážek dvou částic srovnáváme s předpověďmi stávající teorie, jež vychází ze známých struktur a zákonitostí, a z případných odchylek usuzujeme na „novou fyziku“, ať tím myslíme nové částice, síly či jevy. Tato strategie zůstala dodnes stejná. Co se ovšem dramaticky změnilo, je velikost a složitost experimentálních aparatur. Na obr. 3 vpravo je schematický náčrt zařízení, jež použili Geiger a Marsden ve svých měřeních a jehož poloměr byl zhruba 30 cm. Vzdálenost terče, tj. fólie ze zlata, od detektoru, kterým bylo kukátko délky asi 10 cm, na jehož předním okénku byla vrstva sirníku zinečnatého, byla 2,5 cm.



Obr. 2. Schéma Rutherfordova experimentu, který se stal prototypem všech srážkových experimentů. Ze srovnání výsledku očekávaného na základě tehdejšího modelu atomu a naměřených dat Rutherford usoudil, že kladný elektrický náboj je soustředěn v malém prostorovém objemu. Zdroj i terč se v moderních experimentech pohybují proti sobě.



Obr. 3. Vlevo: Rutherford s Marsdenem u svého zařízení, jehož schéma je znázorněno vpravo. Částice alfa vycházející ze zdroje R se rozptýlily na zlaté fólii F a dopadaly na vrstvu ZnS na předním okénku kukátka M, které se otáčelo kolem osy kolmé na rovinu obrázku a do nějž se dívali střídavě Geiger s Marsdenem.

Čtenář si možná na obr. 1 všiml obrovského rozdílu mezi velikostí atomových jader a samotných atomů, jenž znamená, že převážná část objemu atomů je prázdná. Tato skutečnost je důsledkem velikosti elektrického náboje, hmotnosti elektronu a charakteru elektromagnetických sil. Ty sice s rostoucí vzdáleností mezi elektricky nabitými částicemi klesají, ale v jistém smyslu „pomalu“.

Zcela jiné je rozložení hmoty v atomových jádrech, kde jsou protony a neutrony (společně nazývané „nukleony“) natěsnány vedle sebe a objem jader je tedy přímo úměrný počtu nukleonů. Tento zásadní rozdíl rozložení hmoty v jádrech od rozložení hmoty v atomech je důsledkem odlišného charakteru sil, které nukleony v jádrech váží. Tyto síly, zvané „jaderné“, působí totiž jen do vzdálenosti zhruba poloměru protonu a na větších vzdálenostech velmi prudce klesají.

Charakter zákonů mikrosvěta

Struktura hmoty a zákony, jimiž se její základní stavební kameny řídí, se opírají o dvě teorie, jež spatřily světlo světa počátkem minulého století a jež zásadním způsobem změnily naše představy o prostoru, čase a silách, jež v mikrosvětě působí: **teorii relativity a kvantovou teorii**. Nemáme zde prostor pro podrobnější rozbor těch vlastností, v nichž se popis mikrosvěta zásadně liší od klasické fyziky, ale dvě z nich si připomenout musíme.

První se týká jednoho z důsledků Einsteinovy teorie relativity: **ekvivalence hmotnosti a energie**, vyjádřené ve známém vzorci $E = mc^2$. Elektrická energie z jádra ani životodárné paprsky ze Slunce by neexistovaly, kdyby se molekuly, atomy a jejich jádra řídily zákony klasické fyziky, které sice dovolují přeměnu různých forem energie, ale nikoliv přeměnu klidové hmotnosti částic na kinetickou energii jiných. Jedině díky

zmíněné ekvivalenci je také možné, že při srážkách částic mohou vznikat částice jiné, což je jeden ze základních procesů, které v mikrosvětě probíhají.

Svět kolem nás však ke své existenci „potřebuje“ i specifický charakter zákonů, kterými se řídí mikrosvět. V polovině dvacátých let minulého století **Heisenberg**, **Schrödinger** a několik dalších fyziků, vedeni snahou pochopit základní vlastnosti atomů, formulovali tzv. **kvantovou mechaniku**. Vycházeli přitom z hypotézy o existenci kvant energie, kterou formuloval Planck na jaře roku 1900, aby vysvětlil spektrum záření absolutně černého tělesa. Příběh, jak se Planck ke své hypotéze doslova probojoval přes vlastní pochybnosti o jejím smyslu, je fascinující a ukazuje, jak nečekaně a těžko se rodí nové myšlenky.

Kvantová mechanika zásadním způsobem mění naši představu, jak částice mikrosvěta popisovat: samotný pojem místa, kde se částice nachází, a dráhy, po níž se v klasické fyzice pohybuje, nemá v mikrosvětě přesný smysl a částice se v jistém smyslu chovají jako vlny. Nebudeme zde obsah tohoto výroku podrobněji rozebírat, ale připomeneme jeho jeden zásadní důsledek, totiž stabilitu atomů. Kdyby se protony, neutrony a elektrony, z nichž se skládá svět kolem nás, řídily zákony klasické fyziky, nebyly by atomy stabilní. Elektrony by podle těchto zákonů při oběhu kolem jádra spojitě vyzařovaly energii ve formě elektromagnetických vln a během krátké doby by se na něj „zřítily“. Skutečnost, že vázané stavy elektronů a protonů existují jen v diskrétních energetických stavech, je bezprostředním důsledkem kvantové povahy těchto částic.

Kvantová teorie pole, království, v němž ...

Teorie, již Heisenberg a Schrödinger formulovali, se obvykle nazývá nerelativistická kvantová mechanika. Popisuje systémy s konečným a dobře definovaným počtem částic, které se pohybují pomalu ve srovnání s rychlostí světla. Pro částice pohybující se velkými rychlostmi navrhl Paul Dirac v roce 1927 rovnici, která nese jeho jméno. O dva roky později pak formuloval základní principy kvantové elektrodynamiky (QED), jež popisuje vzájemné působení elektricky nabitých částic a fotonů, kvant elektromagnetického záření, které do fyziky zavedl v roce 1905 Einstein.

QED byla první kvantovou teorií pole (KTP), která byla pro popis procesů v mikrosvětě použita, a proto je vhodné aspoň krátce připomenout, jaké nové rysy přinesla a v čem se lišila od kvantové mechaniky. Spojení kvantové teorie s teorií relativity přineslo řadu problémů. Vyřešení jednoho z nich trvalo půl století a vyvrcholilo právě objevem, za nějž byla udělena loňská Nobelova cena.

Pojmově vychází kvantová teorie pole z představy o poli jako základní entitě, s níž pracujeme, a z klasické teorie elektromagnetického pole interagujícího s nabitými částicemi. Všechny částice přitom chápeme jako excitace základního stavu pole, jež se nazývá **vakuum**. Zatímco v klasické i kvantové mechanice pracujeme s částicemi, které se pohybují v prostoru a působí na sebe na dálku silami obvykle popisovanými pomocí pojmu potenciál, v kvantové teorii pole je silové působení mezi dvěma částicemi přenášeno vlnami odpovídajícími jiným částicím, jež se v prostoru šíří podobně jako

vlny na rybníce. To, co se vlní, není ovšem žádný „éter“ nebo jiná substance podobná vodě v rybníce, ale veličiny, které popisují, zhruba řečeno, intenzitu příslušného pole.

Základní rozdíl mezi kvantovou teorií pole a kvantovou mechanikou je v tom, že KTP popisuje také procesy, v nichž vznikají a zanikají částice. Tento rys KTP úzce souvisí s existencí antičástic a je přímým důsledkem spojení teorie relativity a kvantové teorie pole — v kvantové mechanice antičástice existovat nemusí. První antičástici — pozitron — předpověděl v roce 1929 Dirac na základě analýzy řešení své slavné rovnice. Poté, co počátkem roku 1932 Carl Anderson objevil v kosmickém záření částici, jež měla opačný elektrický náboj než elektron a stejnou hmotnost, dostali oba, Dirac i Anderson, Nobelovu cenu (Dirac hned v roce 1933, Anderson o tři roky později). Je zajímavé, že na konci své nobelovské přednášky Dirac vyslovil domněnku, že ve vesmíru existuje stejné množství hmoty a antihmoty, a tedy například galaxie tvořené antiatomy, které mají přesně stejné spektrum jako naše staré známé atomy. Jak dnes víme, první část Diracova tvrzení není pravda: v pozorovatelném vesmíru je antihmoty zanedbatelně.

Diracova rovnice však vedla i k dalšímu důležitému pojmu: spinu elektronu. Tento pojem existoval již v kvantové mechanice, ale teprve v rámci Diracovy rovnice a kvantové teorie pole se vyjasnil jeho původ a role, kterou má v mikrosvětě. Protože ta je opravdu důležitá, zastavíme se u pojmu „spin“ podrobněji.

... káču nelze zastavit ...

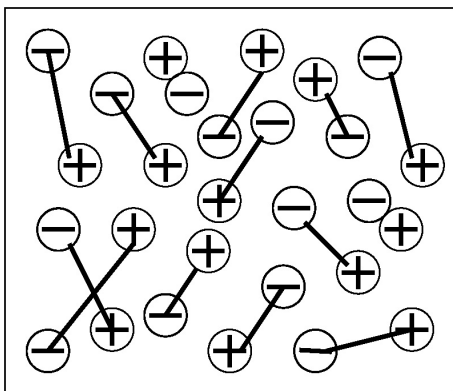
Každé dítě ví, co je káča, a má také zkušenost, že káču lze roztočit libovolně rychle a lze ji také zastavit. Síla, kterou k tomu potřebujeme, je úměrná veličině, která se nazývá moment hybnosti a je dána rychlostí rotace a rozložením hmotnosti káči. Zhruba řečeno, čím větší je rychlost rotace a čím hmotnější je káča, tím větší je moment hybnosti.

Spin elektronu je takovou „káčou mikrosvěta“, ale se dvěma důležitými rozdíly. Především **tuhle káču nelze zastavit!** Spin elektronu je vždy a za všech okolností stejný a rovný hodnotě, která je charakteristická pro celou jednu rodinu částic. Ve vhodných jednotkách je spin elektronu rovný $\frac{1}{2}$.

To ovšem není všechno. Na rozdíl od klasické káči, jež může při zadaném momentu hybnosti rotovat kolem libovolné osy v prostoru, a tedy se nacházet v nekonečně mnoha různých stavech, lišících se projekcí momentu hybnosti na libovolnou vybranou osu, **v mikrosvětě tohle neplatí.** Částice se spinem $\frac{1}{2}$ může existovat pouze ve dvou rozdílných spinových stavech, které budeme označovat symboly \uparrow a \downarrow a nazývat „nahoru“ a „dolů“. Obecně platí, že částice se spinem j (v oněch vhodných jednotkách) existuje celkem v $(2j + 1)$ různých spinových stavech. Přitom částice, jejichž spin je lichým násobkem $\frac{1}{2}$, nazýváme *fermiony*, a částice, jejichž spin je rovný celému číslu, nazýváme *bosony*. Jak za chvíli uvidíme, toto „kvantování“ spinu má zásadní význam pro strukturu atomů, a tedy i pro existenci vesmíru v té podobě, jakou známe.

... vakuum není prázdné ...

Kvantová mechanika popisuje stavy systémů s dobře definovaným — a nenulovým — počtem částic. Pro každý takový systém existuje stav s nejnižší celkovou energií, který se nazývá základní stav. Tak například pro systém jednoho elektronu odpovídá stav s nejnižší energií nulové kinetické energii. V kvantové teorii pole existují stavy s různým počtem a identitou částic, které chápeme jako excitace stavu pole s nejnižší energií. Tento stav, který v kvantové mechanice nemá žádnou analogii, se nazývá **vakuum**, neboť v něm nejsou přítomny žádné částice. Uvedený název je ovšem zavádějící, protože jde o velmi netriviální stav pole, který není v běžném slova smyslu „prázdný“. Kvantové efekty jsou v něm přítomné stejně jako v jeho vzbuzených stavech. Určitou, byť zjednodušenou představu o „struktuře“ vakua si lze udělat, srovnáme-li vakuum kvantové elektrodynamiky s mnohačásticovým systémem elektronů a stejného počtu pozitronů, jenž je — stejně jako vakuum — jako celek elektricky neutrální a chová se jako termodynamický systém určité teploty.



Obr. 4. Grafické znázornění vakua v kvantové elektrodynamice. Virtuální elektron-pozitronové páry „žijí“ po dobu, která je úměrná délce spojnice mezi elektronem a pozitronem.

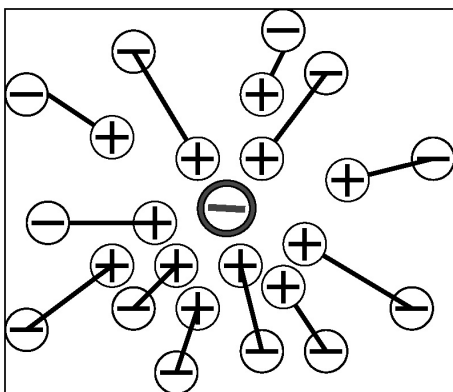
V tomto systému bude docházet k pružným rozptylům elektronů a pozitronů, ale i ke srážkám, v nichž pár elektron-pozitron anihiluje a vzniknou dva fotony. Tyto procesy by samy o sobě vedly k postupnému zmenšování počtu elektronů i pozitronů, až by tyto částice ze systému vymizely. Při dostatečně vysokých energiích elektronů a pozitronů však budou mít fotony vzniklé při anihilacích elektronů a pozitronů dostatečnou energii, aby při jejich srážkách probíhal i opačný proces: dva fotony mohou dát vznik páru elektron-pozitron. V takovém systému elektronů, pozitronů a fotonů pak probíhají neustále oba konkurenční procesy, při nichž se rodí i zanikají elektron-pozitronové páry. Všechny tyto částice jsou přitom reálné, tj. pokud by nějaká z nich vylétla ze systému ven, existovala by ve stejném stavu dál.

Vakuum kvantové elektrodynamiky se chová podobně jako tento systém, ovšem s tím důležitým rozdílem, že elektrony, pozitrony i fotony nejsou reálné, ale „virtuální“. To znamená, že po svém vzniku „žijí“ jen po konečnou dobu — někdy velmi krátkou (viz obr. 4), jindy delší — a nechovají se tedy zcela stejně jako reálné částice. Přesto za určitých okolností je rozdíl mezi chováním reálných a virtuálních částic malý a má

tedy smysl tento pojem zavádět. Na rozdíl od popsaného systému reálných elektronů a pozitronů však nejen celý systém, ale i každý makroskopický objem vakua musí být elektricky neutrální a vakuum se tedy chová ve všech místech prostoru zcela stejně. Tato jednoduchá mechanická analogie nám pomůže pochopit klíčový pojem kvantové elektrodynamiky a později i podstatu objevu, ze nějž byla udělena loňská Nobelova cena.

... konstanta není konstantní ...

Tím klíčovým pojmem je pojem „efektivního elektrického náboje“. Většina čtenářů si asi vzpomene na středoškolskou fyziku, ebonitovou tyč, liščí ocas a Coulombův zákon, který říká, jak na sebe v klasické fyzice působí dva elektricky nabitě objekty. V tomto zákoně vystupují veličiny, jimž říkáme elektrické náboje. Ty mají pro všechny známé částice hodnoty, jež jsou celočíselným násobkem elektrického náboje pozitronu. Elektrický náboj je tedy v klasické fyzice číslo a nejinak je tomu i v kvantové mechanice. I tam jsou síly působící například mezi dvěma elektrony popsány veličinou, která se nazývá potenciál a jež je přímo úměrná druhé mocnině náboje elektronu a nepřímo úměrná jejich vzdálenosti.



Obr. 5. Polarizace vakua v kvantové elektrodynamice v důsledku vložení záporného holého náboje (tučný kroužek).

V kvantové elektrodynamice je tomu ovšem jinak, a to právě v důsledku netriviální „struktury“ vakua. Vložíme-li totiž do vakua například elektron s nábojem e_B , kterému je zvykem říkat „holý“ náboj, dojde vlivem jeho působení na virtuální elektrony a pozitrony, které se ve vakuu nacházejí, k jevu, který se nazývá „polarizace vakua“. Při ní dochází k tomu, že virtuální pozitrony jsou k místu, kam byl vložen holý náboj, přitahovány, zatímco virtuální elektrony jsou naopak od holého náboje odpuzovány, jak je to naznačeno na obr. 5. To má za následek, že prostorová hustota kladných nábojů nesených virtuálními pozitrony vakua je v každé konečné vzdálenosti od holého náboje větší než hustota záporných nábojů nesených virtuálními elektrony. Proto je také celkový náboj $e(r)$ uzavřený v kouli o poloměru r od holého náboje v absolutní velikosti menší než vložený holý náboj a tato velikost navíc **klesá se vzdáleností** r , jak konkrétně uvidíme za chvíli. Protože silové působení na vzdálenosti r od holého

náboje je určeno právě veličinou $e(r)$, je zvykem ji nazývat „**efektivní elektrický náboj elektronu**“. Netriviální struktura vakua tedy v kvantové elektrodynamice vede ke **stínění** původně vloženého holého náboje. Chceme-li „vidět“ původní vložený, holý náboj, musíme se k němu co nejvíce přiblížit, nejlépe až na nulovou vzdálenost. V tom ovšem, jak uvidíme, je problém.

... a nad vším vládne Maestro Pauli

V roce 1924, ve věku pouhých 24 let a ještě předtím, než Heisenberg a Schrödinger formulovali kvantovou mechaniku, vyslovil Wolfgang Pauli princip, který se dnes nazývá „**Pauliho vylučovací princip**“. Bez přehánění lze říci, že právě tomuto principu, jenž nemá v klasické fyzice obdobu, vděčíme za bohatost struktur mikrosvěta, a tím i za svou vlastní existenci.

Pauliho princip se týká systémů identických částic. Tyto částice jsou charakterizovány jednak veličinami, jako jsou energie a hybnost, které popisují jejich pohybový stav, jednak různými „kvantovými čísly“. Mezi nimi hraje klíčovou úlohu spin, jehož klasickou analogii i kvantový původ jsme již připomněli.

Pauliho princip říká, že **v systému identických fermionů nemohou být žádné dvě částice ve zcela stejném stavu**. Jinými slovy, pokud uvažujeme například systém dvou elektronů, jež mají stejné hybnosti, musí se jejich stavy lišit orientací spinu: jeden musí směřovat „nahoru“ a druhý „dolů“. Právě toto omezení na možné stavy elektronů v atomech brání tomu, aby v základních stavech atomů všechny elektrony zaujímaly nejnižší možnou energii — musí se proto plnit i vyšší energetické hladiny. Jedině díky platnosti Pauliho principu tak existuje bohatost struktur atomů a molekul. **Žádné takové omezení neplatí pro systémy bosonů**, jichž může být v jednom stavu neomezený počet. I tato skutečnost má dalekosáhlé (a přímo pozorovatelné) důsledky, ale těmi se v tomto článku nebudeme zabývat.

Pauli vylučovací princip formuloval ještě před zrodem kvantové mechaniky, ale teprve v rámci kvantové teorie pole chápeme jeho hlubší příčiny a souvislosti. Ty ovšem daleko přesahují rámec tohoto článku.

Až příliš dokonalé stínění

Efekt netriviální struktury vakua v kvantové elektrodynamice, jak jsme ho nastínili v jednom z předchozích odstavců, se v učebnicích teorie pole vykládá v kapitole o tzv. „renormalizaci“. Za formulaci a kvantitativní rozpracování této procedury dostali v roce 1965 Richard Feynman, Julian Schwinger a Sin-Itchiro Tomonaga Nobelovu cenu. Problém, k jehož řešení jejich práce přispěly, se týkal skutečnosti, že pravidla kvantové elektrodynamiky vedla při výpočtu příspěvku „polarizace vakua“ k nekonečným hodnotám. Tato nekonečna přitom pocházela od příspěvku virtuálních elektron-pozitronových párů, které ve vakuu „žijí“ velmi (nekonečně) krátce.

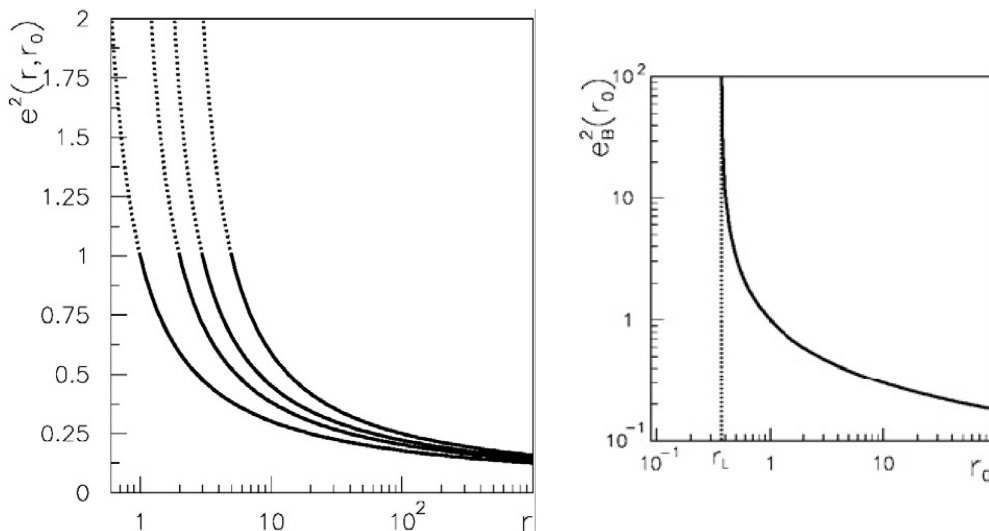
Zmínění tři pánové spolu s Freemanem Dysonem vymysleli koncem 40. let minulého století recept, jak se těchto nekonečen zbavit, či jak se odborně říká, jak teorii „renormalizovat“. Jejich procedura poskytuje konečné předpovědi pro všechny měřitelné fyzikální veličiny. Tyto předpovědi jsou navíc ve vynikající shodě s experimentem. Ne každý fyzik se ovšem s renormalizací v kvantové elektrodynamice smířil, neboť šlo o proceduru používající značně „špinavé“ matematické postupy a motivovanou jediným cílem, totiž dostat z teorie konečné předpovědi. Nesmířitelným kritikem procedury renormalizace byl sám otec kvantové elektrodynamiky Paul Dirac, jenž na její adresu v roce 1974 řekl:

*„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 jejích 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! Nesouhlasím tedy v tomto bodě s většinou dnešních fyziků. **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. Tento požadavek povede nutně ke skutečně drastické změně, malá změna nepostačí.“*

Jak dnes víme, a to právě díky loňským laureátům Nobelovy ceny, Diracovy výhrady byly oprávněné v případě kvantové elektrodynamiky, ale nikoli v případě teorií Yanga a Millse (přesněji řečeno některých z nich), o nichž se zmíníme v další části.

Paul Dirac ovšem nebyl sám, komu procedura renormalizace připadala fyzikálně vyumělkovaná a matematicky nečistá. Mezi další patřili i dva významní ruští teoretici: Lev Landau a Izák Pomerančuk. Ti se v první polovině 50. let pokusili dát proceduře renormalizace lepší fyzikální obsah a matematický smysl. Jejich strategie byla v zásadě jednoduchá a fyzikálně velmi názorná. Protože nekonečna ve standardním přístupu pocházejí od příspěvků elektron-pozitronových párů, jež ve vakuu „žijí“ velmi krátce a jsou tedy v prostoru velmi blízko sebe, lze se těchto nekonečen snadno zbavit, když budeme elektrony a pozitrony považovat za kuličky o konečném poloměru r_B (od anglického „bare“, tj. „holý“). Protože ovšem fyzikální elektron nemá podle našich dnešních představ konečný rozměr, je třeba holý náboj nakonec scvrknout až na bod, tj. položit na konci celé procedury $r_B = 0$.

Landau a Pomerančuk spočítali podle pravidel kvantové elektrodynamiky závislost efektivního elektrického náboje $e(r)$ na poloměru r_B holého náboje za předpokladu, že velikost holého náboje na jeho poloměru nezávisí. Výsledek je znázorněn na obr. 6, a to pro několik hodnot poloměru r_B holého elektronu. To, co je na obrázku podstatné, je skutečnost, že **pro každé pevné r jde efektivní elektrický náboj $e(r, r_B)$ s klesajícím r_B k nule**. Pokud je tedy elektrický náboj holého elektronu konstanta nezávislá na jeho poloměru, dostáváme v limitě bodového elektronu teorii, v níž elektrony



Obr. 6. Vlevo: Tvar závislosti efektivního elektrického náboje $e(r, r_0)$ na poloměru r_0 holého náboje pro několik hodnot $r_0 = 5, 3, 2, 1$ a pevné e_B . Vpravo je vyneseno tvar závislosti čtverce holého náboje e_B^2 , jež zaručuje konečný efektivní náboj $e(r, r_0)$ pro všechna r . Na obou osách jsou vyneseny relativní jednotky.

a pozitrony na sebe nepůsobí, neboť efekty polarizace vakua holé náboje dokonale odstíní. To sice dává smysl, ale je to fyzikálně nezajímavý výsledek.

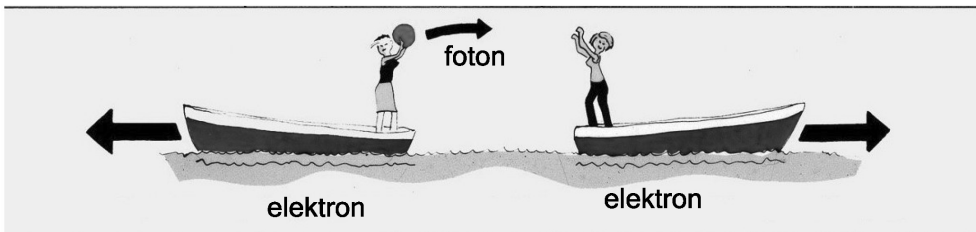
Pozorného čtenáře možná napadne přirozená otázka, kterou si před 50 lety položili také Landau s Pomerančukem: jestliže konstantní holý náboj vede na nulový efektivní náboj, jak musí záviset holý elektrický náboj e_B na jeho poloměru r_B , abychom pro každou hodnotu r dostali v limitě nekonečně malého r_B konečné hodnoty efektivního elektrického náboje $e(r)$? Odpověď, graficky znázorněná v pravé části obr. 6, znamená, že pro klesající poloměr holého elektronu r_B jeho elektrický náboj musí růst, a to až do nekonečna. To samo o sobě nevádí, co ale vadí, je skutečnost, že se tak děje **pro konečnou hodnotu poloměru r_B** , rovnou tzv. **Landauovu poloměru r_L** . Pro ještě menší poloměry pak dostáváme zcela nefyzikální (komplexní) hodnoty holého elektrického náboje e_B . Jinými slovy holý elektron nemůžeme scvrknout až na bod, jak bychom potřebovali. Tento rys procedury renormalizace kvantové elektrodynamiky je skutečný problém, neboť konečný rozměr elektronu není slučitelný s teorií relativity. Pro Landaua a Pomerančuka byla tato skutečnost důvodem pro odmítnutí kvantové elektrodynamiky jako skutečně základní teorie, byť nebyli v tomto ohledu tak nesmlouvaví jako Dirac.

Procedura, kterou formulovali Landau a Pomerančuk, sice nevedla k cíli, jímž byla fyzikálně motivovaná a matematicky dobře definovaná metoda, jak se v kvantové elektrodynamice vypořádat s nekonečny, ale její základní strategie byla z dnešního hlediska správná. Jak s velkým překvapením zjistili loňští laureáti Nobelovy ceny, existuje totiž třída teorií, v nichž tato procedura k cíli vede. A co je nejdůležitější, vše nasvědčuje tomu, že právě tyto teorie si v mikrosvětě oblíbila matka příroda.

Ještě dříve, než se těmito teoriemi budeme zabývat, je ovšem třeba vysvětlit, jak je možné, že skoro ve všech učebnicích kvantové teorie pole je kvantová elektrodynamika považována za nejlepší teorii, jakou pro popis mikrosvěta máme. Důvod spočívá v tom, že hodnota Landauova poloměru r_L je tak malá, že **problémy, které jsme zmínili v předchozích odstavcích, jsou sice principiální, ale v praxi se nikdy neprojeví**. Konkrétně pro případ, že uvažujeme jen elektron a žádné další elektricky nabitě částice, je hodnota r_L vyjádřená v metrech rovna číslu, jež má za nulou a desetinnou tečkou 293 nul. To je tak nepředstavitelně malé číslo, že pragmatický přístup ke kvantové elektrodynamice má jistě oprávnění. Ani ve fyzice není fundamentalismus vždy přínosem. O pár odstavců níže uvidíme, že fyzikálně závažné — a negativní — důsledky měly Landauovy a Pomerančukovy argumenty pro teorie snažící se popsat síly, které drží pohromadě protony a neutrony v jádrech. K nim nyní obrátíme svou pozornost.

Nenápadný začátek

Dne 1. října 1954, zhruba ve stejné době, kdy Landau a Pomerančuk dokončovali svou kritickou analýzu kvantové elektrodynamiky, publikovali dva mladí američtí teoretičtí fyzikové Chen Ning Yang a Robert Mills práci, v níž položili základy určité třídy teorií, které dnes tvoří základní rámec pro popis všech sil v mikrosvětě. O důležitosti a důsledcích kroku, který učinili, však tehdy neměli ani tušení. Díky loňským laureátům Nobelovy ceny víme, že právě tyto teorie — nazývané Yangovy-Millsovy, nebo také neabelovské kalibrační teorie — mají tu úžasnou vlastnost, že netrpí neduhy, které Landau a Pomerančuk odhalili u kvantové elektrodynamiky.

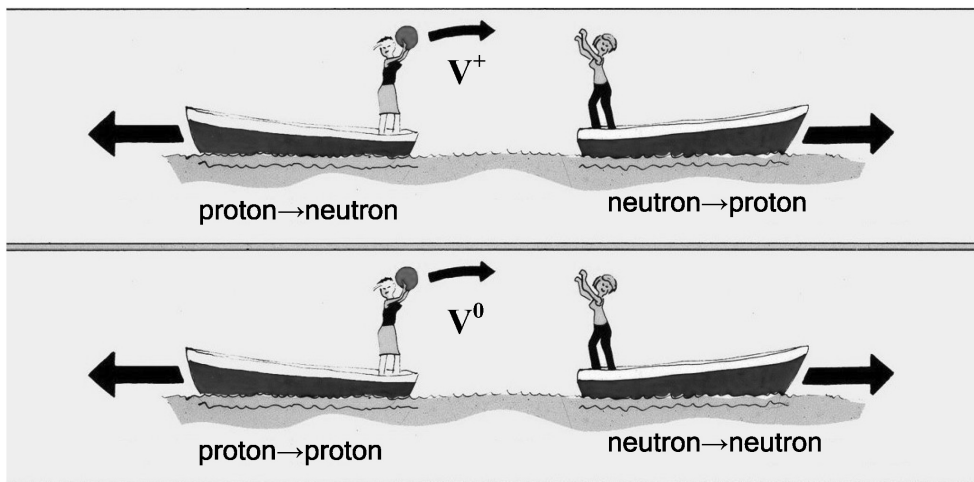


Obr. 7. Mechanická analogie mechanismu elektromagnetických sil působících mezi dvěma elektrony v kvantové elektrodynamice. Protože foton má nulovou klidovou hmotnost, „dohodíme“ s ním do nekonečna a elektromagnetické síly mají proto daleký dosah. Tímto způsobem lze ovšem jednoduše modelovat jen odpudivé síly.

Yang a Mills ve své práci zobecnili kvantovou elektrodynamiku pro popis sil, které jsou odpovědné za vazbu protonů a neutronů v jádrech a které se proto nazývají jaderné. Tyto síly, jež do fyziky zavedl v roce 1935 japonský teoretik Hideki Yukawa, mají jiné vlastnosti než síly elektromagnetické, které drží dohromady elektrony a jádra v atomech. Jedno však mají společné: podobně jako síly mezi dvěma elektrony jsou v kvantové elektrodynamice „zprostředkovány“ výměnou fotonu (jejíž mechanická

analogie je na obr. 7), byly síly v Yukawově teorii jaderných sil zprostředkovány výměnou částic, jež se dnes nazývají piony. Existují tři piony, dva elektricky nabitě a jeden neutrální. Analýza experimentálních dat dále ukázala, že piony mají spin nula. Za předpověď existence pionů získal Yukawa v roce 1949 Nobelovu cenu, krátce potom, co byly objeveny v kosmickém záření.

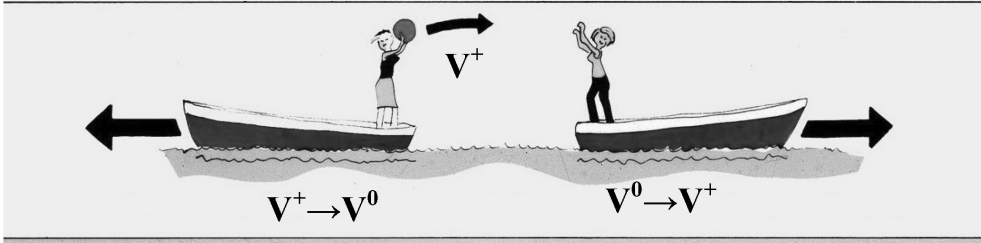
Z hlediska jaderných sil **jsou proton a neutron dva různé stavy jedné částice**, nukleonu, které se liší hodnotou vnitřního kvantového čísla, jež se nazývá **izospin**. Přívlastek „vnitřní“ vyjadřuje skutečnost, že na rozdíl od spinu izospin nesouvisí s žádnou charakteristikou v prostoru. Dvojice proton a neutron je popsána stejným matematickým aparátem jako dvojice spinových stavů elektronu „nahoru“ a „dolů“.



Obr. 8. Mechanická analogie mechanismu jaderných sil v systému tvořeném protonem a neutronem v teorii Yanga a Millse. Na horním obrázku proces „nábojové výměny“, při němž se proton mění na neutron a obráceně, dole pružný rozptyl, zprostředkovaný výměnou neutrálního vektorového bosonu V^0 .

Průkopnický význam práce Yanga a Millse spočíval v tom, že svou teorii jaderných sil budovali v těsné analogii s kvantovou elektrodynamikou na základě principu, jenž se tajuplně nazývá **princip lokální kalibrační invariance**. Čtenář se nemusí lekat, nebudeme zde zabíhat do technických podrobností. To, co je důležité, jsou dva důsledky tohoto principu: síly mezi dvěma elektrony jsou „zprostředkovány“ výměnou, ilustrovanou na obrázku 7, částice se spinem 1, jíž říkáme foton. Protože elektrony při „přehazování“ fotonu nemění elektrický náboj, jsou fotony elektricky neutrální. Podobně v teorii Yanga a Millse jsou síly mezi dvěma nukleony zprostředkovány výměnou tří částic se spinem 1, nazývaných „**zprostředkující vektorové bosony**“: kladně nabitého V^+ , záporně nabitého V^- a neutrálního V_0 (viz obr. 8).

Základní rozdíl od Yukawovy teorie je tedy v tom, že v teorii Yanga a Millse mají zprostředkující částice spin 1, zatímco u Yukawy měly spin 0. Nejdůležitější je ovšem skutečnost, že na rozdíl od fotonů, které na sebe nepůsobí, neboť jsou elektricky neutrální, částice V^+ , V^- a V^0 na sebe vzájemně působí stejnými silami, jaké samy

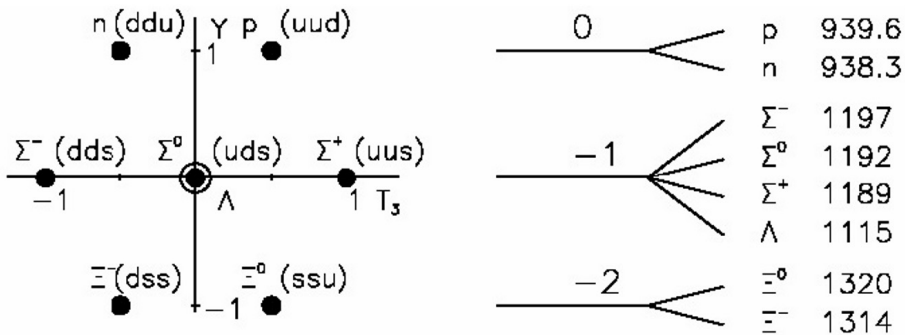


Obr. 9. Síly působící mezi třemi zprostředkujícími vektorovými bosony v teorii Yanga a Millse jsou zprostředkovány výměnou stejných vektorových bosonů jako síly mezi nukleony.

zprostředkují. Je tedy například možná „výměna“ znázorněná na obrázku 9. Právě tato vlastnost teorií Yanga a Millse má za důsledek pozoruhodné vlastnosti sil působících mezi kvarky, o nichž si za chvíli řekneme něco více.

Osmerá cesta do nitra hmoty

Období od roku 1950 do poloviny šedesátých let bylo bohaté na experimentální objevy nových částic. Některé byly objeveny v kosmickém záření, ale od roku 1953 stále více v experimentech na urychlovačích v USA a později i v Evropském středisku fyziky částic CERN v Ženevě. Nebudeme se zde tímto vzrušujícím obdobím podrobněji zabývat, jen se krátce zastavíme na konci roku 1963, kdy došlo k objevu, jež rozhodujícím způsobem předznamenal další vývoj.



Obr. 10. Oktet baryonů se spinem $\frac{1}{2}$, do nějž patří také proton a neutron. Částice ležící na vodorovných přímkách mají stejnou hodnotu kvantového čísla, jemuž se říká podivnost, a blízké hmotnosti. Rozdíly hmotností mezi různými „patry“ jsou ovšem podstatně větší. Z hlediska jaderných sil představují všechny částice přitom jen různé stavy jednoho hyperonu. Symboly v závorkách specifikují kvarkové složení, o němž bude řeč dále.

Na samém konci roku 1963 byla na urychlovači v americké národní laboratoři v Brookhaven objevena částice, jež se nazývá hyperon Ω^- . Tu předpověděli v létě 1962 teoretičtí fyzikové Murray Gell-Mann a Yuval Ne'eman na základě teoretického

schématu, jehož cílem bylo najít řád ve stále rostoucím zvěřinci nových „elementárních“ částic. Ty uvozovky jsou na místě, neboť pojem „elementární“ má časově proměnný obsah: co bylo včera „elementární“, je dnes často „složené“. Určité pravidelnosti, které oba zmínění teoretici ve změní dat počátkem roku 1961 rozpoznali, nazval Gell-Mann „**Osmerou cestou**“ (anglicky **Eightfold Way**), neboť velkou část tehdy známých „elementárních“ částic bylo možno uspořádat do osmic, které byly v jistém smyslu příbuzné (viz obr. 10). Z hlediska matematického formalismu tyto osmice představovaly bázi Hilbertova prostoru, na němž působí přidružená reprezentace grupy $SU(3)$. Bylo to podobné, jako když Mendělejev vytvořil svou periodickou tabulku prvků. Objev hyperonu Ω^- potvrdil správnost Gell-Mannova a Ne’emanova klasifikačního schématu. Chyběl ale nějaký dynamický princip, který by pravidelnosti ve spektrech existujících částic vysvětloval. Tím se stal **kvarkový model**.

Esa nebo kvarky?

Počátkem roku 1964, prakticky současně s objevem hyperonu Ω^- , navrhli **George Zweig** a **Murray Gell-Mann** hypotézu, že pozorovaná symetrie baryonů a mezonů je projevem skutečnosti, že tyto částice jsou složeny z ještě elementárnějších objektů, které Zweig nazval „esa“ a Gell-Mann „kvarky“ a které odpovídají fundamentální reprezentaci grupy $SU(3)$. Ujal se druhý název, zřejmě proto, že Gell-Mann byl známější.



| <u>Ace</u> | | <u>Quark</u> |
|------------|-------------|--------------|
| ● | p_0 | u |
| ▲ | m_0 | d |
| ■ | λ_0 | s |
| ◆ | | c |

Obr. 11. George Zweig, jeden z tvůrců kvarkového modelu a jeho označení pro kvarky, které nazýval „esa“.

Podle kvarkového modelu se všechny tehdy známé mezony (částice příbuzné pionům) a baryony (částice, jako je nukleon) skládaly ze tří druhů (nazývaných „vůně“ a označovaných u, d, s) kvarků a antikvarků. Kvarky přitom **měly spin $\frac{1}{2}$** a nesly elektrické náboje, jež byly **neceločíselnými násobky náboje pozitronu**. Baryony byly

tvoreny trojicemi kvarků, zatímco mezony páry kvark-antikvark. Tak například proton a neutron měly následující kvarkové složení:



Od počátku kvarkového modelu existovaly dva rozdílné přístupy k obsahu pojmu kvark a k interpretaci výrazu „složený“, zosobněné samotnými zakladateli. Na jedné straně stál Zweig, který považoval kvarky za fyzikální objekty a pracoval s nimi podobně jako s nukleony v jádře. Na druhé straně pro Gell-Manna byly kvarky primárně matematické objekty, které sice usnadňovaly některé úvahy, ale které neměly přímý fyzikální význam, tak jako ho mají například elektrony.

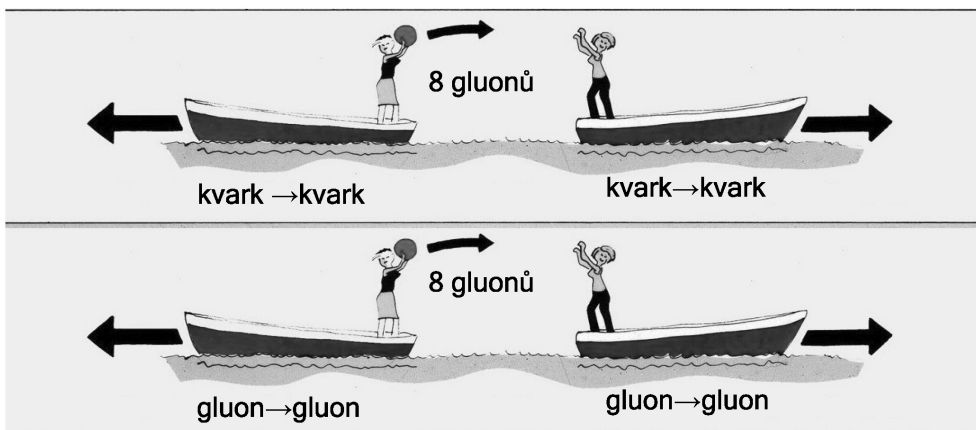
Kvarkový model poskytoval jednoduché a přirozené vysvětlení pozorovaných hadronů, ale narážel na dva vážné problémy. Prvním byla skutečnost, že všechny do té doby známé částice měly elektrické náboje, které byly celočíselnými násobky elektrického náboje elektronu. Pro to sice neexistoval žádný hlubší teoretický důvod, ale přesto řada fyziků právě z toho důvodu přijímala kvarkový model od počátku s nedůvěrou. Tato nedůvěra dále rostla s tím, jak selhávaly snahy řady experimentálních skupin najít kvarky jako volné částice.

Druhý vážný problém se týkal kvantitativního popisu některých částic, jako byl například právě již zmíněný hyperon Ω^- . Potíž byla v tom, že v kvarkovém modelu se tato částice skládala ze tří s-kvarků, které byly v přesně stejném stavu (všechny spiny orientovány „nahoru“ či „dolů“), což bylo ovšem v rozporu s posvátným Pauliho principem.

Bez barvy to nejde

Tento problém byl odstraněn zavedením nového kvantového čísla kvarků, které dostalo název „barva“ a které nabývalo tří různých hodnot. To umožnilo, aby se stavy tří s-kvarků v hyperonu Ω^- lišily právě v barvě a Pauliho princip byl respektován. V optické terminologii tento stav odpovídá „bezbarvé“ kombinaci tří s-kvarků.

Rozhodující krok pro budování teorie silných sil mezi kvarky učinil **Yoichiro Nambu**, který jako první pochopil, že barva neslouží jen pro uspokojení Pauliho principu, ale že hraje dynamickou roli při popisu sil působících mezi kvarky. Nambu předpokládal, že tyto síly jsou **zprostředkovány** (viz obr. 12) **výměnou 8 vektorových bosonů, jež se dnes nazývají gluony** a které hrají podobnou roli jako foton pro elektromagnetické síly (a bosony W^+ , W^- a Z pro slabé síly). Gluony jsou přitom samy barevné. Nambuův model poskytoval kvalitativní vysvětlení, proč v přírodě nemohou existovat nejen kvarky samotné, ale ani takové kombinace kvarků a antikvarků, které jsou barevné. Jinými slovy síly působící mezi barevnými objekty zajišťují, že v přírodě existují jen jejich bezbarvé kombinace. Dnes víme, že Nambuův model měl všechny základní rysy kvantové chromodynamiky. Nebyla to ovšem plnokrevná kvantová teorie pole, ale „jen“ model.



Obr. 12. Grafické znázornění mechanismu sil působících mezi dvěma kvarky (nahore) a dvěma gluony (dole) zprostředkované výměnami osmi barevných gluonů. Při výměnách se obecně mění barva kvarků a gluonů-loděk, ale tak, že při každém aktu „odhození“ gluonu se barva zachovává.

Ale ani s ní to Zweig a kvarky neměli lehké

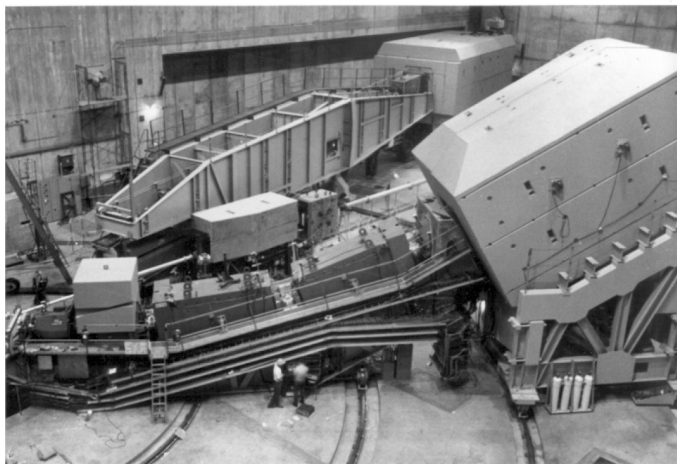
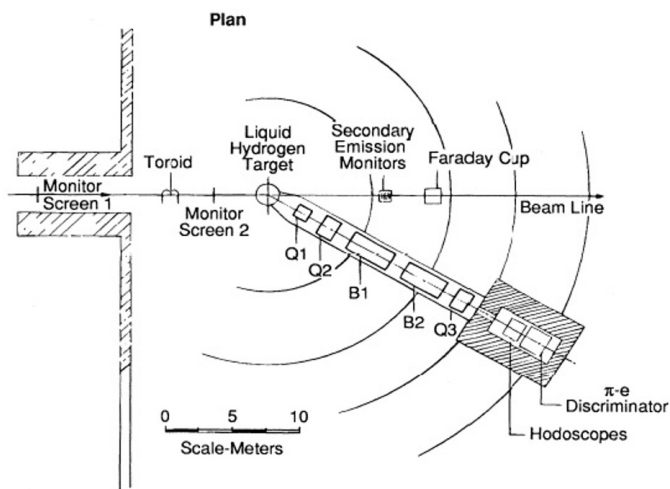
Ani model barevných kvarků však nebyl v druhé polovině 60. let minulého století všeobecně přijat, neboť teoretické předpoklady na jedné straně a neúspěch při hledání kvarků na straně druhé byly pro mnohé fyziky vážnými argumenty pro jejich odmítnutí. K tomu pak ještě přistupovala celková atmosféra nedůvěry ke kvantové teorii pole, o níž jsme se již zmínili v jedné z předchozích částí. Řada fyziků proto odmítala samotnou představu, že nějaké částice by měly být elementárnější než jiné. Tento názor vyústil v doktrínu „jaderné demokracie“, jejímž hlavním hlasatelem byl mladý americký teoretik Geoffrey Chew. Tato doktrína hlásala, že všechny mezony a baryony jsou stejně „dobré“ a nemá proto smysl snažit se je chápat jako objekty složené z nějakých menších, fundamentálnějších částíček. Dnes víme, že to byla slepá ulička, ale až do roku 1973 se zdálo, že právě tudy vede cesta k teorii sil mezi mezony a baryony. Řada významných fyziků považovala kvarkový model za šarlatánství nehodné skutečných vědců. Lidé jako Zweig, Lipkin a další příznivci kvarkového modelu měli problémy své práce vůbec publikovat.

Na přelomu 60. a 70. let se zdálo, že kvarkový model je v posledním tažení, neboť se objevily nové experimentální údaje, které naznačovaly vnitřní rozporuplnost jeho samotných základů. Jak ale uvidíme, byla to jen přehánka, po níž se zase vyjasnilo.

Překvapení ze Stanfordu

Data, o nichž jsme se již zmínili, byla získána ve Stanfordském urychlovačovém centru SLAC, kde byl v roce 1967 uveden do provozu nový, 5 kilometrů dlouhý lineární

urychlovač elektronů. Těmito elektrony byly ostřelovány protony a ze srovnání naměřeného úhlového rozdělení rozptýlených elektronů s tehdejšími teoretickými představami činili fyzikové závěry o struktuře protonu. Základní experimentální uspořádání těchto pokusů, zachycené na obr. 13, bylo tedy stejné jako v pokusech Rutherforda, Geigera a Marsdena v roce 1911, o nichž jsme se zmínili zkraje článku. Při srovnání s obr. 3 si však čtenář jistě všimne rozdílu ve velikosti jednotlivých částí obou experimentů. Co v Rutherfordově experimentu měřilo centimetry a vážilo kilogramy, mělo ve SLAC metry a tuny.



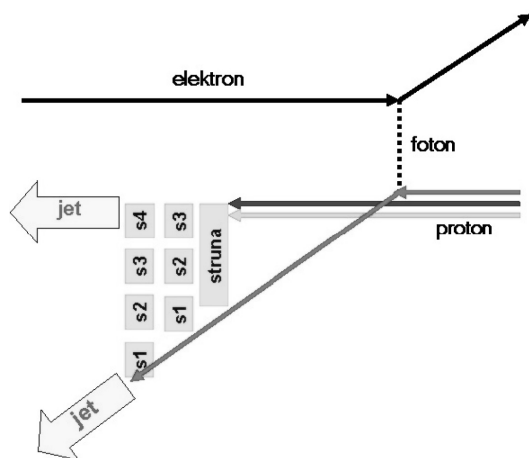
Obr. 13. Schematické uspořádání experimentu, v němž byly ve SLAC rozptýlovány elektrony na protonech (nahore) a ramena spektrometru, která umožňovala měřit úhly a energie rozptýlených elektronů.

Připomeňme, že od poloviny 50. let ve SLAC probíhaly na starším a menším urychlovači experimenty s pružným rozptylem elektronů na protonech, které ukázaly, že **proton se chová jako kulička o poloměru asi 1 femtometr.**

Překvapení, které přinesly nové experimenty, spočívalo v tom, že „tvrdé“ a nepružné srážky elektronů s protony vypadaly tak, jako by se elektron rozptyloval **na téměř volných bodových částicích se spinem $\frac{1}{2}$** , jež Feynman nazval „partony“. Tento jev, jenž se nazývá „škálování“, by sám o sobě nebyl nic divného, pokud by byly ony hypotetické partony uvnitř protonu slabě vázány a bylo je tedy možno z protonu vyrazit. Přírozená snaha ztotožnit partony s kvarky narážela proto na problém, že nikdo žádný volný kvark nepozoroval. Právě tento na první pohled nepřekonatelný rozpor mezi dvěma různými experimentálními svědectvími o vlastnostech a chování kvarků byl skutečný problém.

Koncem 60. let krize důvěry v kvarkový model i kvantovou teorii pole vyvrcholila a beznaději propadali i jejich nejsilnější příznivci. Jako ilustraci připomeňme slova jednoho z nich, Jamese Bjorkena z podzimu 1967 (pod pojmem „elementární konstituenty“ jsou míněny kvarky): *„Zdá se, že dosavadní data neukazují na velké hodnoty účinného průřezu, které tento model bodových konstituentů předpovídá. Budou zapotřebí další data k tomu, aby byl model elementárních konstituentů úplně vyvrácen.“*

Jeden z mála, kdo skepsi nepropadal, byl Richard Feynman, skvělý teoretik s mimořádným citem pro konstrukci vhodných modelů. Právě on formuloval základní představu o tom, jak tvrdé srážky elektronů s protony probíhají. Tato představa měla několik slabých míst, ale jak ukázal další vývoj, byla v zásadě správná. Feynmana především neodradila skutečnost, že kvarky v přírodě neexistují jako volné částice. Proces tvrdé srážky elektronu s protonem rozdělil do dvou etap, zachycených na obrázku 14. Během první etapy se elektron pružně rozptýlí na jednom z kvarků, který se po rozptýlení po určitou dobu pohybuje, jako by nevěděl, že volně existovat nemůže. Podobně i zbytek protonu, tvořený dvěma zbývajících kvarky. V této etapě tedy Feynman pracoval s kvarky stejně jako s elektrony a používal i stejný matematický aparát. Tato etapa srážky trvá do té doby, dokud vzdálenost mezi vyráženým kvarkem a zbytkem protonu nepřekročí zhruba 1 femtometr.



Obr. 14. Feynmanova představa o průběhu tvrdé srážky elektronu s protonem, jehož výsledkem jsou dva jety.

Jakmile vzdálenost mezi vyráženým barevným kvarkem a zbytkem protonu (také barevným) přesáhne zhruba 1 femtometr, charakter sil, které mezi nimi působí, se změní. Místo aby s rostoucí vzdáleností dále klesaly až na nulu, jak tomu bylo u elektromagnetických sil, síly mezi kvarkem a zbytkem protonu zůstávají zhruba konstantní, podobně jako je tomu u natahované pružiny nebo struny. V této analogii můžeme pokračovat, abychom odpověděli na otázku, co se stane se strunou natáhnutou mezi kvarkem snažícím se uletět a zbytkem protonu. Každá reálná struna může při natahování prasknout, přičemž vzniknou dvě kratší struny, které se mohou dále trhat na ještě menší atd. Podobně při „přetržení“ naší kvarkové struny vznikají kratší a kratší struny (označené s_1 , s_2 , s_3 atd.), až se jejich délky zmenší na cca 1 femtometr, což jsou délky odpovídající baryonům a mezonům.

Výsledkem procesu trhání barevné struny mezi vyráženým kvarkem a zbytkem protonu, který se nazývá „hadronizace“, jsou pak dvě úhlově kolimované spršky částic, které letí zhruba v původních směrech výletu kvarků a zbytku protonu. Tyto spršky, jimž se říká „**jety**“, jsou tedy stopami po kvarcích. Dále se o nich zmíníme podrobněji a ukážeme, jak vypadají v dnešních detektorech. Skutečnost, že směry a energie jetů dobře odpovídají směrům a energiím původních kvarků, je netriviální vlastnost procesu hadronizace.

Výše popsáný model průběhu tvrdých srážek se velmi dobře osvědčil při popisu řady procesů, ale v době, kdy ho Feynman koncem 60. let formuloval, se zdál neslučitelný s jakoukoliv kvantovou teorií pole. Vše naopak naznačovalo, že kvantová teorie pole je pro popis sil mezi kvarky zcela nevhodná a je třeba ji nahradit něčím jiným.

Kartágo musí být — definitivně — zničeno

Mezi pochybovače patřil i David Gross, jenž spolu s dalším teoretikem Curtisem Callanem podnikl promyšlený pokus **zničit jednou provždy kvantovou teorii pole** jako základní nástroj pro popis sil působících mezi kvarky. Sám na to v roce 1992 vzpomínal takto:

„Zcela cíleně jsem se rozhodl dokázat, že lokální kvantová teorie pole nemůže vysvětlit experimentální fakt škálování a neposkytuje tedy vhodný rámec pro popis silných interakcí. Výsledky experimentů s hlubokým nepružným rozptylem měly tedy definitivně rozhodnout otázku platnosti kvantové teorie pole. Plán útoku měl dvě části. Za prvé jsem chtěl dokázat, že pro vysvětlení škálování byla nutná ultrafialová stabilita, tj. vymizení efektivní vazbové konstanty silných interakcí na malých vzdálenostech, později nazvaná »asymptotická volnost«. Za druhé jsem chtěl ukázat, že asymptoticky volné teorie neexistují.“

Na vysvětlenou k předchozímu citátu dvě poznámky. „*Hlubokým nepružným rozptylem*“ jsou míněny již zmíněné tvrdé srážky elektronu s protonem, při nichž vzniká typicky mnoho sekundárních částic. „*Vymizení efektivní vazbové konstanty silných interakcí na malých vzdálenostech*“ se zdálo nutné k tomu, aby bylo možné pochopit jev, který jsme výše nazvali „škálování“. Pokud by totiž vazbová konstanta (jíž je

míněn efektivní barevný náboj kvarků) zůstala na malých (ve srovnání s rozměrem protonu, tj. 1 femtometrem) vzdálenostech **konečná**, nebo dokonce rostla, jak je tomu v kvantové elektrodynamice, muselo by škálování být **velmi silně narušeno**. Jinými slovy kvarky by se při rozptylu na elektronech **nechovaly jako téměř volné částice se spinem $\frac{1}{2}$** , jak tomu nasvědčoval experiment.

Asymptotická volnost byla lákavá i proto, že poskytovala základní rámeček pro pochopení neexistence volných kvarků. Růst efektivního barevného náboje na vzdálenostech velkých ve srovnání s poloměrem protonu signalizoval (byť samozřejmě nedokazoval), že na těchto vzdálenostech dochází ke změně charakteru sil. Místo toho, aby s rostoucí vzdáleností klesaly, jak je tomu v případě sil elektromagnetických, zdálo se možné, že síly působící mezi kvarky jsou na vzdálenostech větších než jeden femtometr zhruba konstantní. V takovém případě by pak nebylo možné kvarky v nukleonech a mezonech od sebe odtrhnout. Problém byl ovšem v tom, že žádná do té doby prozkoumaná kvantová teorie vlastnost asymptotické volnosti neměla.

Práce na zničení Kartága postupovaly zdárně a první část plánu byla do konce roku 1972 úspěšně provedena. Bylo jasné, že jen asymptoticky volné kvantové teorie pole mají šanci popsat zdánlivě protichůdné aspekty sil působících mezi kvarky. Kartágo stálo před posledním útokem krvežíznivých teoretiků.

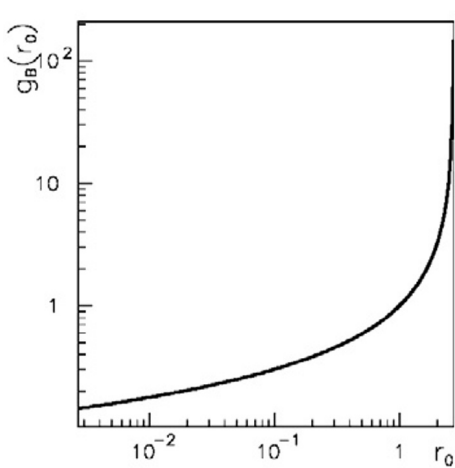
Zbývalo tedy zasadit poslední úder: dokázat, že žádné asymptoticky volné kvantové teorie neexistují. K tomu bylo třeba vyšetřit vlastnosti poslední třídy teorií, která do té doby ještě nebyla podrobně prozkoumána, a tou byly právě neabelovské kalibrační teorie Yanga a Millse, o nichž jsme se již zmínili. Tento úkol zadal na podzim 1972 Gross Franku Wilczekovi, svému jednadvacetiletému doktorandovi. Shodou okolností prakticky ve stejnou dobu dostal od svého školitele jen o rok starší David Politzer úkol, jenž měl s programem Grosse důležitý styčný bod. Tito dva mladíci pak během půl roku ukázali, že David Gross se mýlil a že neabelovské kalibrační teorie jsou (za určitých okolností) asymptoticky volné! D. Gross na tento okamžik vzpomíná slovy:

„Pro mne byl objev asymptotické volnosti zcela neočekávaný. Tak jako ateista, jenž právě přijal poselství z hořícího keře, se ze mne stal okamžitě věřící. Teorie pole nebyla chybná, ale škálování lze vysvětlit v rámci asymptoticky volné teorie silných interakcí.“

Sága objevu asymptotické volnosti má i další zajímavé okolnosti. Jak jsme se již zmínili, výpočty, jež vedly k jejímu objevu, probíhaly současně ve dvou institucích na východním pobřeží USA: Gross a Wilczek pracovali na univerzitě v Princetonu, jež není daleko od Harvardovy univerzity, kde se stejným problémem zápolil osamocенý mladičkový Politzer. Jeho výkon je v jistém směru ještě obdivuhodnější, uvědomíme-li si, že sám řešil problém, kterým se zabýval jeho vrstevník pod vedením zkušeného školitele. Práce obsahující objev asymptotické volnosti dorazily do časopisu Physical Review Letters v rozpětí šesti dnů a byly publikovány za sebou v jednom čísle. K druhé pozoruhodné okolnosti se vrátím v poslední části tohoto článku.

Asymptotická volnost: podstata a projevy

Jen pár týdnů po objevu třídy asymptoticky volných kvantových teorií pole Gross s Wilczekem a Politzer s Howardem Georgi publikovali práce, v nichž je podrobně rozpracována jedna z nich: **kvantová chromodynamika**. Tato teorie silných sil mezi barevnými kvarky navázala na základní pojmy kvarkového modelu, tak jak ho formulovali Zweig a Nambu v letech 1964–1965; v něm hrála barva klíčovou dynamickou roli. Asymptotická volnost v tomto případě znamená, že **efektivní „barevný náboj“**, tj. veličina, která charakterizuje silové působení mezi kvarky, **při zmenšující se vzdálenosti mezi kvarky neroste**, jako je tomu v kvantové elektrodynamice, ale **klesá!** Jinými slovy, **v kvantové chromodynamice vakuum neodstíňuje vložený barevný náboj, ale naopak ho zesiluje**. Toto zesílení je dokonce tak silné, že provádíme-li s kvarky stejnou proceduru, jakou prováděl s elektrony Landau v polovině 50. let, docházíme k závěru, že v limitě nekonečně malých vzdáleností se vložený „holý“ barevný náboj blíží k nule. Tento jev, který můžeme nazvat „**antistínění**“, byl na základě dřívějších zkušeností v kvantové teorii pole naprosto neočekávaný. Situace, zachycená na obrázku 15, je tedy zcela opačná než v kvantové elektrodynamice.



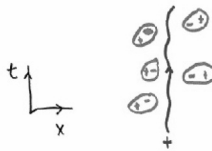
Obr. 15. Závislost holého barevného náboje g_B na jeho poloměru r_0 , zajišťující konečnost efektivního barevného náboje $g(r)$.

Frank Wilczek byl vloni v červnu v Praze na konferenci o fyzikálním programu připravovaném pro urychlovač LHC, který se v současné době buduje v CERN. Při této příležitosti mu byla udělena medaile Univerzity Karlovy za zásluhy o fyzikální vědy a Frank Wilczek proslovil v Karolinu přednášku, v níž se pojmem asymptotické volnosti a jejími projevy zabýval. Z této přednášky jsou i dva obrázky reprodukovány na obr. 16 a 17.

Protože pokles efektivního barevného náboje s klesající vzdáleností je základním rysem kvantové chromodynamiky, bylo jeho experimentální potvrzení od poloviny 70. let prvořadým úkolem mnoha experimentů. Připomeňme, že Nobelova cena se v oblasti teorie uděluje jen za výsledky, které byly experimentálně jednoznačně potvrzeny.

Na obr. 16 vpravo je vynesena závislost druhé mocniny efektivního barevného náboje na veličině Q , jež je úměrná $1/r$, získaná z dat řady různých experimentů. I když

Asymptotic Freedom: Concept

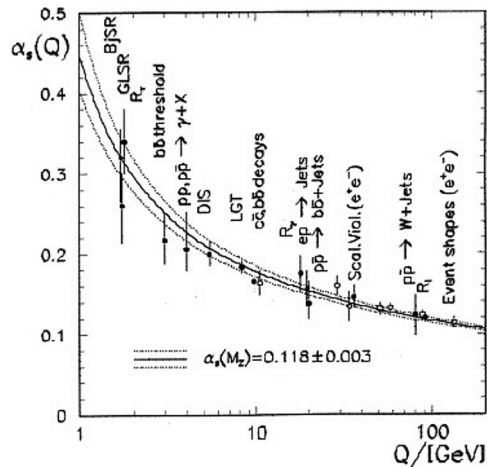


$$\Rightarrow \alpha_s(r)$$

By calculation,

$$\alpha_s(r) \xrightarrow{r \rightarrow 0} 0.$$

(the reverse of 'normal'!)



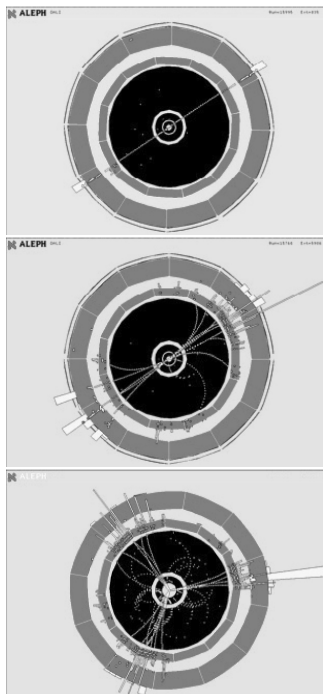
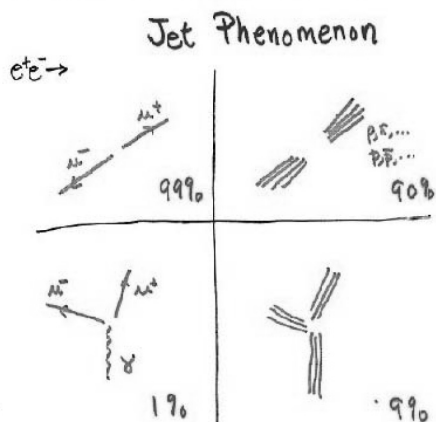
Obr. 16. Asymptotická volnost v kvantové chromodynamice (vlevo) a experimentální data potvrzující pokles efektivního barevného náboje (přesněji řečeno jeho druhé mocniny) se zmenšující se vzdáleností r mezi kvarky (vpravo, na vodorovné ose je vynesena veličina Q úměrná převrácené hodnotě $1/r$, malá r proto odpovídají velkým Q).

tento graf nepostihuje nejnovější stav, pokles efektivního barevného náboje na malých vzdálenostech (tj. velkých Q) je jasně patrný.

Měření zachycená na obr. 16 ovšem nepředstavují jediné potvrzení správnosti kvantové chromodynamiky. Těch dnes existuje velmi mnoho. Značná část se přitom týká pojmu jet, jehož jsme se již dotkli v souvislosti s Feynmanovou představou o průběhu tvrdých srážek elektronů s protony. Jetům se věnoval i Frank Wilczek v přednášce v Karolinu, z níž je i levá část obr. 17. Znázorňuje nejjednodušší možný proces, v němž se jety produkují. Tím je anihilace elektronu a pozitronu, při níž vznikají dva nebo i více jetů. V levé části obr. 17 je znázorněna podobnost mezi produkcí páru mionů $\mu^+\mu^-$ a dvojice jetů. Zatímco miony a antimiony vznikající v prvním procesu můžeme přímo vidět, po páru kvark-antikvark vidíme jen stopy, jimiž jsou právě jety: úhlově kolimované spršky „běžných“ částic, jako jsou různé mezony a baryony. V pravé části obr. 17 jsou ukázány výsledky počítačové rekonstrukce záznamů průchodu mionů i jetů detektorem ALEPH, který byl v 90. letech umístěn na urychlovači LEP v CERN. I když jety jsou vždy tvořeny více částicemi, z obrázků je patrné, že můžeme definovat něco jako „osu jetu“ a s jety pak zacházet podobně jako s normálními částicemi (tedy například měřit úhlová rozdělení apod.).

Zkoumání produkce a vlastností jetů je dnes nedílnou součástí většiny experimentů a je také předmětem trvalého zájmu teoretiků. Intuitivní představa Feynmana o tom, co jet znamená, dostala v kvantové chromodynamice pevný teoretický základ. Bez přehánění lze říci, že kvantitativní porozumění mechanismu produkce jetů je předpokladem úspěchu při hledání nových jevů a struktur, včetně tak exotických, jako jsou struny či další rozměry prostoru a času.

Asymptotic Freedom: Evidence



Obr. 17. Srovnání produkce mionů a jetů ve srážkách elektronů s pozitrony.

Zvuky ticha

*People talking without speaking,
people hearing without listening, ...
(Lidé, co mluví a nic neříkají,
lidé, co slyší, ale neposlouchají ...)*

z písně P. Simona Sounds of Silence

Příběh objevu asymptotické volnosti má ještě jednu peripetii, o které stojí za to se zmínit, protože přináší důležité poučení. Gross, Wilczek a Politzer nebyli ve skutečnosti první, kdo na jev antistínění narazili (úmyslně přitom nepoužívám slova „objevili“). Tím byl další mladík, Gerard 't Hooft z Utrechtu. Ten, rovněž v rámci své doktorské disertace, dokázal ve spolupráci se svým školitelem Martinusem Veltmanem matematickou konzistenci teorie slabých sil, za což byli oba po zásluze oceněni Nobelovou cenou za fyziku v roce 1999. Podstatnou součástí jeho práce byl rozvoj jisté techniky výpočtů, kterou ve svých pracích použili Gross, Wilczek a Politzer.

Také 't Hooft se zabýval vlastnostmi třídy teorií, které měli naši tři hrdinové na mušce, a není proto příliš překvapivé, že při svých výpočtech dospěl k stejným výsledkům jako později oni. Výraz, jenž tento výsledek obsahoval, dokonce napsal na tabuli v diskusi na malé konferenci v Marseille v červnu 1972, zhruba 9 měsíců před pracemi Grosse, Wilczeka a Politzera. Sám mu však velký význam zjevně nepřikládal. Ten ovšem dobře chápal Kurt Symanzik, zkušený teoretik, jenž byl diskusi přítomen. I když

't Hooftovu výsledku příliš nevěřil — ani on si antistínění nedovedl v kvantové teorii pole představit — bylo mu jasné, co by to pro teorii sil mezi kvarky a možnost pochopit experimentální data znamenalo. Nad 't Hooftovým vzorcem sice pochybovačně kroutil hlavou, ale mladému Gerardovi podle jeho vlastních slov poradil: „Je-li to pravda, je to velmi důležité a měl byste to rychle publikovat, nebo to dříve udělá někdo jiný.“ Jak dnes sám vzpomíná, 't Hooft si jeho prorocká slova k srdci nevzal a s Veltmanem dále pracoval na jiném problému. Později toho asi litoval.

Tato epizoda ilustruje skutečnost, že nestačí o něčem vědět, ale je třeba význam věci také chápat a nenechávat si je jen pro sebe. Je proto smutné a jeho osobnosti nedůstojné, když 't Hooft dnes tvrdí, že již v roce 1972 věděl, že neabelovské kalibrační teorie mohou být asymptoticky volné, a nehovořil o tom jen proto, že předpokládal, že to „experti“ vědí také. Myslím, že výbor Nobelovy nadace se rozhodl správně, když loňskou cenu za fyziku udělil za objev asymptotické volnosti a že ji udělil právě Grossovi, Wilczekovi a Politzerovi. Pokud si ji ještě někdo zasloužil — za příspěvek k teorii sil mezi kvarky, širší rámec, do něhož tento objev zapadá — je to podle mého názoru Yoichiro Nambu.

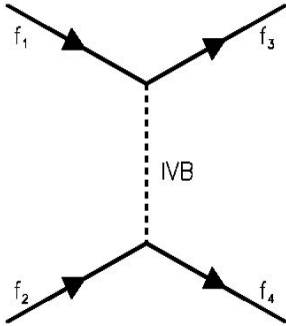
Standardní model v kostce

Současný stav našich znalostí zákonů mikrosvětla je shrnut v tzv. **standardním modelu**. Podle něj jsou základními stavebními kameny hmoty tři **generace fundamentálních fermionů**, tj. částic se spinem $\frac{1}{2}$, jež se dále dělí na **kvarky a leptony**.

| Generace | základní fermiony | | | náboj | název | síly | zprostředkující částice |
|----------|-------------------|-----------|------------|----------------|-------------------|--------|-------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | | | | |
| Kvarky | u u u | c c c | t t t | $\frac{2}{3}$ | elektromagnetické | foton | W ⁺ , W ⁻ , Z |
| | d d d | s s s | b b b | $-\frac{1}{3}$ | slabé | | |
| Leptony | ν_e | ν_μ | ν_τ | 0 | silné | gluony | |
| | e | μ | τ | -1 | | | |

Každý z šesti kvarků, označovaných symboly u (z anglického up), d (down), s (strange), c (charm), t (top), b (bottom), existuje ještě ve třech různých mutacích, nazývaných „**barvy**“. Z kvarků první generace jsou složeny například protony a neutrony, jež spolu s elektrony vytvářejí atomy, a tím i většinu hmoty na Zemi i ve viditelné části vesmíru.

Mezi kvarky a leptony působí čtyři typy sil: **gravitační, elektromagnetické, slabé a silné**. Kromě gravitační, jež v mikrosvětě nemá prakticky žádnou úlohu, mají ostatní síly důležitou společnou charakteristiku: lze je popsat pomocí výměny zprostředkujících částic, nazývaných **intermediální vektorové bosony**, znázorněné na obrázku na stránce 26. Výraz „vektorové“ znamená, že tyto částice mají spin 1. Základní rozdíl mezi kvarky a leptony je v tom, že silné síly působí jen na „barevné“ částice, a tedy jen mezi kvarky. Právě tyto síly odpovídají za vazbu kvarků uvnitř protonů a neutronů



a s elektromagnetickými silami za existenci a vlastnosti atomů. Ani bez slabých sil by ovšem vesmír nevypadal tak, jak vypadá. Ačkoliv jsou skutečně slabé na vzdálenostech řádu průměru protonu, mají jednu důležitou vlastnost: **nejsou invariantní vůči prostorové (P) a nábojové (C) inverzi** (tj. záměně pojmů „vpravo“ a „vlevo“, resp. „částice“ a „antičástice“), ba **ani vůči kombinované prostorové a nábojové inverzi**. Právě narušení této kombinované CP invariance je přitom podle našich dnešních znalostí klíčem k pochopení, proč je ve vesmíru více hmoty než antihmoty.

Kromě částic uvedených v tabulce hraje ve SM důležitou roli i dosud neobjevený tzv. **Higgsův boson**, částice se spinem nula, jež je ve standardním modelu v obrazném slova smyslu odpovědná za velikost hmotností kvarků, leptonů a intermediálních vektorových bosonů.

Elektromagnetické a slabé síly jsou v rámci SM popsány teorií, formulovanou koncem 60. let minulého století S. Glashowem, S. Weinbergem a A. Salamem (**GSW teorie**). Teorie silných sil byla formulována v roce 1973 D. Grosseem, F. Wilczekem a D. Politzerem. Její název **kvantová chromodynamika** (QCD) odráží skutečnost, že tato síla působí jen na částice nesoucí barvu.

I když kvarky nelze z protonu či neutronu vyrazit, experimentálně zjišťujeme, že je-li energie vyráženého kvarku či gluonu dostatečně velká, vylétají ve směru kvarků či gluonů úhlově kolimované svazky částic, nazývané „**jety**“. Z měření jejich vlastností pak usuzujeme na dynamiku samotných kvarků a gluonů. Jety dnes hrají při hledání zákonů mikrosvěta stejnou roli, kterou v minulosti hrály částice samotné.

Pro svět subatomárních částic je mezinárodní systém jednotek nevhodný a je proto zvykem používat přirozené jednotky. V případě energie je jí gigaelektronvolt (GeV), tj. miliarda elektronvoltů, a v případě délky femtometr (fm), tj. miliontina miliardtiny metru. Je to proto, že klidová hmotnost protonu odpovídá energii zhruba 1 GeV a jeho poloměr činí zhruba 1 fm.