

Kvarky s barvou a vůní a co dál?

Jiří Chýla, Fyzikální ústav AV ČR

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

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. Nobelova cena za fyziku, kterou byl David Gross spolu s Frankem Wilczekem a Davidem Politzerem v roce 2004 poctěn, 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 99.9% hmoty na Zemi. Jejich objev, k němuž se ještě vrátím, 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.

Hledání základních stavebních kamenů hmoty a zákonitostí, jimiž se řídí, je pradávná touha filozofů a přírodovědců. Samotný pojem „elementární“ měl proměnný obsah: od čtyř elementů starých Řeků, přes atomy Johna Daltona až po kvarky a leptony současné fyziky elementárních částic. Co bylo včera „elementární“ je dnes „složené“ a nejinak tomu bude asi i v budoucnosti. Důležitým zlomem ve vývoji našeho chápání menších a menších objektů byl objev atomového jádra v roce 1911. Rutherford tehdy ukázal, že převážná část objemu atomů je prázdná a většina hmoty je soustředěna v malém objemu o poloměru několika femtometrů ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$), atomovém jádře. Tento okamžik znamenal zrod jaderné fyziky a atomové jádro a jeho vlastnosti jsou také spojovacím mostem mezi chemií a tím, co se dnes volně nazývá fyzikou elementárních částic. Ta se sice již posunula na ještě nižší úroveň struktury, ale protony a další atomová jádra jsou stále základním nástrojem při studiu mikrosvěta. Pro fyziku atomů a molekul jsou ovšem důležité vlastnosti elektronů a protonů jen jako celků, nikoliv jejich jemnější struktura. Je to dáno tím, že rozměry atomů a molekul jsou o několik řádů větší, než rozměr protonu. Nic z toho, o čem vypráví tento článek proto není pro chemii prakticky „užitečné“ a žádný objev, na který se fyzikové elementárních částic tak těší, nepřispěje k hlubšímu pochopení složitých chemických struktur a jejich vlastností. Pokrok ve studiu mikrosvěta na subjaderné úrovni však může ukázat, jak se do přírodních zákonů dostávají ty základní fyzikální veličiny, jako jsou hmotnosti, elektrické náboje a magnetické momenty elektronů, protonů a neutronů, které pro chemii představují vstupní parametry. Pochopit, proč mají tyto veličiny právě takové hodnoty, jaké mají, může být zajímavé i pro chemii, neboť existence a bohatost v přírodě existujících chemických struktur citlivě závisí na jejich numerických hodnotách. Kdyby byl elektron dvakrát těžší či měl poloviční elektrický náboj, vypadal by svět zcela jinak.

V dalším nejdříve podáme stručný přehled současného stavu našich znalostí struktur a zákonitostí mikrosvěta, jímž budeme rozumět vše menší než zhruba 1 femtometr.¹ Tyto znalosti, jež jsou obvykle shrnovány pod termínem „**standardní model**“ (SM) elementárních částic, jsou výsledkem více než půl století experimentálního a teoretického zkoumání mikrosvěta, na němž se podíleli tisíce fyziků. Cesta ke SM

¹ Pro svět subatomárních částic je mezinárodní systém jednotek nevhodný a je proto zvykem používat přirozené jednotky, jimiž je v případě energie gigaelektronvolt ($\text{GeV} = \text{miliarda eV}$). Klidová hmotnost protonu odpovídá energii 0.94 GeV. Navíc se pracuje v jednotkách, v nichž číselné hodnoty rychlosti světla c a Planckovy konstanty $h/2\pi$ jsou rovny 1. Rozměr délky je pak GeV^{-1} a konstanta jemné struktury je vyjádřena pomocí elektrického náboje elektronu je dáno jako $\alpha \equiv e^2 / 4\pi$.

byla trnitá se spoustou zákrutů a vzrušujících okamžiků a kráčeli po ní smutní hrdinové i milácci štěstěny, kteří by si zasloužili naši pozornost, ale na něž v tomto článku bohužel není místo².

V druhé části pak nastíníme několik směrů, jimiž se dnes teorie ve snaze vylepšit SM ubírá. SM je sice při popisu experimentálních dat velmi úspěšný, ale má řadu slabých míst, které svědčí o tom, že jde jen o „efektivní teorii“, pod níž zřejmě leží ještě hlubší úroveň struktury a zákonů mikrosvěta. Co to bude dnes ještě nevíme, ale do konce tohoto desetiletí se snad dozvíme, který z těchto směrů, pokud vůbec některý, je správný. Měly by k tomu přispět experimenty na novém mohutném urychlovači, který se staví v Evropském středisku fyziky částic CERN v Ženevě a jenž by měl začít pracovat koncem roku 2008.

Charakter zákonů mikrosvěta

Zákony, jež platí v mikrosvětě, se opírají o dvě teorie, které spatřily světlo světa počátkem minulého století: **teorii relativity a kvantovou teorii**. Jedním z důsledků Einsteinovy teorie relativity je **ekvivalence hmotnosti a energie**. Energie získaná 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. Jedině díky zmíněné ekvivalenci je také možné, že při srážkách částic mohou v mikrosvětě částice vznikat i zanikat.

Svět kolem nás však ke své existenci potřebuje i **kvantovou teorii**. Její historicky první forma, **nerelativistická kvantová mechanika**, vznikla v polovině dvacátých let minulého století jako vyvrcholení snahy řady velkých osobností jako byli **Bohr, Sommerfeld, Pauli, Heisenberg, Schrödinger, Dirac** a další, pochopit základní vlastnosti atomů poté, co v roce 1911 **Rutherford** objevil atomové jádro. Kdyby se protony, neutrony a elektrony, z nichž se skládá svět kolem nás, řídily zákony klasické fyziky, nebyly by atomy stabilní a neexistovaly by proto ani žádné struktury, kterými se chemie a fyzik zabývá. A neexistovali bychom samozřejmě ani my. Skutečnost, že vázané stavy elektronů a protonů existují jen v diskrétních energetických stavech, je bezprostředním důsledkem kvantové povahy těchto částic.

Kvantová mechanika si vynutila nejen zásadní změnu v pojmech, kterými svět atomů popisujeme, ale přinesla i první zcela neklasický pojem – vnitřní moment hybnosti elektronu, tj. jeho **spin**. V roce 1924, těsně předtím, než byla formulována kvantová mechanika a než byl pojem spinu formálně zaveden, vyslovil Wolfgang Pauli na základě zkoumání spekter atomů předpoklad, že elektron existuje ve dvou „klasicky nepopsatelných“ stavech. Pro systémy elektronů pak formuloval svůj „**vylučovací princip**“, jenž říká, že **v systému elektronů nemohou být žádné dva ve zcela stejném stavu**. Právě toto omezení na možné stavy elektronů v atomech brání tomu, aby v základních stavech atomů všechny elektrony zaujímaly nejnižší možnou energii a musí se plnit i vyšší energetické hladiny. Dnes víme, že elektron je jen jedna z mnoha částic, které mají poločíselný spin a jimž říkáme **fermiony**. Pro všechny tyto fermiony platí Pauliho princip. Žádné takové omezení neplatí pro systémy **bosonů**, částic s celočíselným spinem. Až donedávna se zdálo, že mezi fermiony a bosony je hluboká teoretická propast, neboť vlnové funkce popisující stavy fermionů a bosonů se liší vlastností symetrie vůči permutacím částic. Jedna z moderních teoretických představ, o níž se zmíníme, právě tuto bariéru nemilosrdně bortí.

Co o mikrosvětě víme

Základní poznatky o struktuře a zákonech mikrosvěta jsou shrnuty v již zmíněném SM. Podle něho jsou základními stavebními kameny hmoty tři tzv. **generace fermionů se spinem 1/2**, jež se dále dělí na **kvarky a leptony** (viz. tabulka 1). Každý ze šesti tzv. „**vůní**“ kvarků, označovaných symboly u (z anglického up), d (down), s (strange), c (charm), t (top), b (bottom), existuje ve třech různých stavech, nazývaných „**barvy**“. Elektrické náboje jsou v jednotkách elektrického náboje pozitronu. Čísla v závorkách ukazují klidové hmotnosti částic, resp. u neutrin horní meze na jejich hmotnosti. V případě kvarků, jež v přírodě

² Informace o klíčových experimentálních objevech, které přivedly ke standardní teorii i o tom, jak se „dělá“ fyzika elementárních částic dnes ve světě a jak k tomu přispívají čeští fyzikové lze najít v přehledných člancích a textech [1,2,3,4].

volné neexistují, jde o tzv. „konstituentní“ hmotnosti. Hierarchie hmotností kvarků a leptonů nevykazuje žádný zjevný řád, kromě obecného trendu, že hmotnosti částic rostou s pořadím generace. Otázka původu jejich hodnot je zcela otevřená a představuje jeden z hlavních problémů současné teorie.

$Q = \frac{2}{3}$	u u u (0.3 MeV)	c c c (1.5 GeV)	t t t (175 GeV)
$Q = -\frac{1}{3}$	d d d (0.3 MeV)	s s s (0.5 GeV)	b b b (4.5 GeV)
$Q = 0$	ν_e (3 eV)	ν_μ (0.2 MeV)	ν_τ (0.2 GeV)
$Q = -1$	e^- (0.5 MeV)	μ^- (0.1 GeV)	τ^- (1.8 GeV)

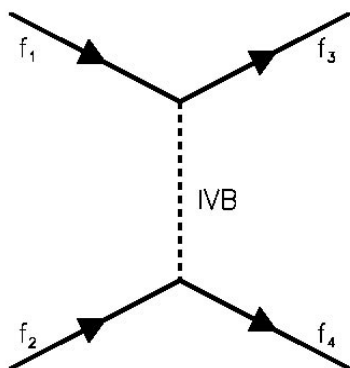
Tab. 1: Tři generace barevných kvarků a leptonů standardní teorie.

síly	IVB
elektromagnetické	foton
slabé	W^+, W^-, Z
silné	8 gluonů

Tab. 2: Tři základní síly mikrosvětla.

Z kvarků první generace jsou složeny částice nazývané **hadrony**, mezi něž patří protony a neutrony (obr. 1), jež spolu s elektrony vytvářejí atomy a tím i většinu hmoty na Zemi i ve viditelné části vesmíru. Proč existují v přírodě právě tři generace kvarků a leptonů je jedna ze základních otázek dnešní fyziky mikrosvětla. Ke každému kvarku a leptonu existuje i příslušná antičástice.

Mezi kvarky a leptony působí čtyři typy sil: **gravitační, elektromagnetické, slabé a silné**. Kromě gravitace, o níž se zmíníme až ke konci článku a jež v mikrosvětě na experimentálně dostupných vzdálenostech nehraje žádnou roli, lze ostatní tři síly popsat pomocí výměny, schématicky znázorněné na obr. 2, zprostředkujících částic, **intermediálních vektorových bosonů** (IVB), jež mají spin 1. Tato skutečnost je výchozím bodem při snaze tyto síly sjednotit, tj. chápat je jako tři projevy jedné fundamentální „prasíly“ a to navzdory tomu, že na první pohled mají



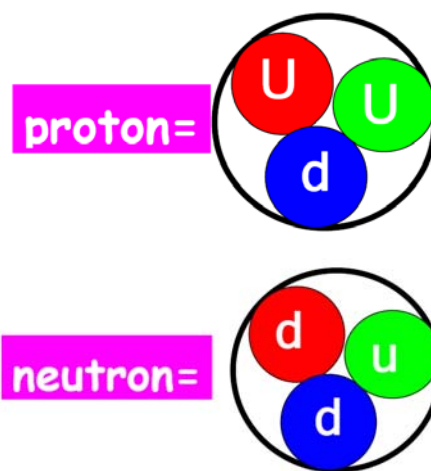
Obr. 2: Diagram znázorňující výměnný mechanismus sil mezi kvarky a leptony.

velmi rozdílné vlastnosti. Důležitou roli při sjednocování těchto sil hraje okolnost, že v kvantové teorii je dosah síly nepřímo úměrný hmotnosti příslušného IVB.

Základní rozdíl mezi kvarky a leptony je v tom, že silné síly působí jen na barevné částice a tedy jen mezi kvarky. Tyto síly zodpovídají za vazbu kvarků uvnitř protonů, neutronů a mezonů a dalších hadronů. Přechod **mezi kvarky a leptony ve SM není možný**. Jak uvidíme, v moderních teoriích mikrosvětla ani tohle nemusí platit. Kromě částic uvedených v tabulce hraje ve ST důležitou roli i tzv. **Higgsův boson**, částice se spinem nula, jejíž interakce s ostatními částicemi je odpovědná za velikosti hmotností kvarků, leptonů a IVB.

Elektromagnetické síly

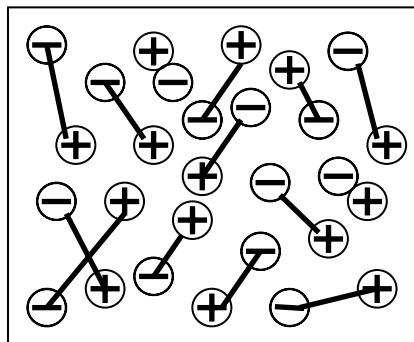
Elektromagnetické síly byly v řadě aspektů vzorem při formulaci teorie sil slabých i silných. Na klasické úrovni jsou elektromagnetické síly známy již od 70. let 19. století, kdy Maxwell formuloval své rovnice. V statické aproximaci je lze popisovat pomocí potenciálu, jenž je nepřímo úměrný vzdálenosti mezi elektrickými náboji a přímo úměrný součinu jejich nábojů. Tento potenciál vystupuje i při popisu elektromagnetických sil v rámci nerelativistická kvantové mechaniky, jež je vhodná pro popis systémů s dobře definovaným počtem částic, které se pohybují pomalu ve srovnání s rychlostí světla. Pro popis relativistických částic navrhl Dirac v roce 1927 rovnici, jež nese jeho jméno a o dva roky později formuloval **kvantovou elektrodynamiku (QED)**, teorii, popisující vzájemné působení elektricky nabitých částic a fotonů. Ta je **invariantní vůči prostorovému zrcadlení i vůči záměně částice – antičástice**.



Obr. 1: kvarkové složení protonu a neutronu. V optické analogii jsou nukleony i všechny hadrony „bezbarvé“.

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

QFT vychází z představy o poli jako základní entitě s níž pracujeme. Všechny částice chápeme jako excitace základního stavu pole, jež se nazývá **vakuum**. Tento název je ovšem zavádějící, protože jde o netriviální stav pole, který není v běžném slova smyslu „prázdný“. Zhruba řečeno, vakuum QED se chová jako moře „virtuálních“ elektron-pozitronových párů, které po svém vzniku „žijí“ jen konečnou – někdy velmi krátkou, jindy delší – dobu a nechovají se stejně jako reálné částice (viz. obr. 3). Přesto za určitých okolností je rozdíl mezi chováním reálných a virtuálních částic malý. Jako celek ale i každý makroskopický objem vakua je elektricky neutrální a vakuum se tedy chová ve všech místech prostoru stejně.



Obr. 3: Grafické znázornění vakua v QED. Virtuální elektron-pozitronové páry „žijí“ po dobu, která je úměrná délce vyznačené spojnice mezi elektronem a pozitronem.

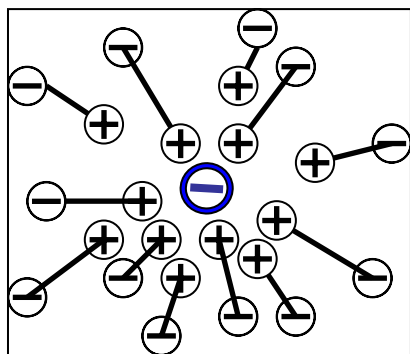
Na rozdíl od kvantové mechaniky, QFT popisuje také procesy v nichž částice vznikají a zanikají. První antičástici – pozitron – předpověděl v roce 1929 Dirac na základě analýzy řešení své rovnice. Ta však vedla bezprostředně i dalšímu důležitému pojmu: **spinu elektronu**. Ten již existoval v rámci kvantové mechaniky, ale teprve v rámci QFT se vyjasnil jeho původ a role, kterou v mikrosvětě hraje.

Zatímco v klasické i kvantové mechanice částice na sebe působí na dálku, v QED je silové působení mezi dvěma elektricky nabitými částicemi přenášeno elektromagnetickým polem a „zprostředkujícími“ částicemi jsou fotony. Ty jsou elektricky neutrální a protože ani jinak nemění identitu částic, znamená to, že v diagramu na obr. 2 je $f_1=f_3$ a $f_2=f_4$. Protože foton je nehmotný, mají elektromagnetické síly **nekonečný dosah**.

Zatímco v klasické i kvantové mechanice částice na sebe působí na dálku, v QED je silové působení mezi dvěma elektricky nabitými částicemi přenášeno elektromagnetickým polem a „zprostředkujícími“ částicemi jsou fotony. Ty jsou elektricky neutrální a protože ani jinak nemění identitu částic, znamená to, že v diagramu na obr. 2 je $f_1=f_3$ a $f_2=f_4$. Protože foton je nehmotný, mají elektromagnetické síly **nekonečný dosah**.

Efektivní elektrický náboj

Moderní směry rozvoje kvantové teorie pole se opírají o pojem „**efektivního náboje**“. V klasické fyzice je elektrický náboj částice číslo a stejně je tomu i v kvantové mechanice. V QED je tomu v důsledku netriviálních vlastností vakua jinak.



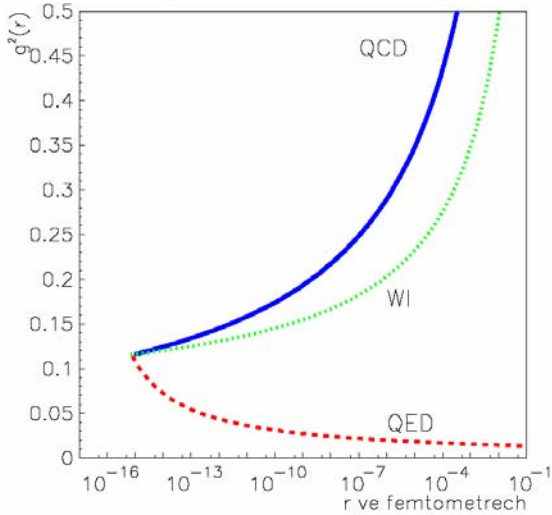
Obr. 4: Polarizace vakua v QED v důsledku vložení

Vložíme-li do vakua elektron s nábojem e_B , kterému budeme říkat „holý“, dojde vlivem jeho působení na virtuální elektrony a pozitrony k „**polarizaci vakua**“: virtuální pozitrony jsou k holému náboji přitahovány, zatímco virtuální elektrony jsou naopak od holého náboje odpuzovány (obr. 4). Prostorová hustota kladných nábojů nesených virtuálními pozitrony je proto v každé konečné vzdálenosti od holého náboje větší než hustota záporných nábojů nesených virtuálními elektrony. Celkový náboj $e(r)$ uzavřený v kouli o poloměru r je tak v absolutní hodnotě menší než vložený holý náboj a navíc **klesá se vzdáleností r** . Protože silové působení na vzdálenosti r od holého náboje je určeno právě veličinou $e(r)$, je zvykem ji nazývat „**efektivní elektrický náboj elektronu**“.

Vliv vakua tedy v QED vede **ke stínění** holého náboje a vakuum QED se chová jako dielektrikum. Výpočty efektivního elektrického náboje v rámci poruchové QED ovšem ukazují, že příspěvky virtuálních elektron-pozitronových párů divergují v limitě, kdy „doba života“ párů jde k nule. Protože v této limitě jsou elektron-pozitronové páry „malé“, lze tuto divergenci regularizovat tím, že elektronům i pozitronům přiřadíme konečný poloměr r_B . Protože fyzikální elektron konečný poloměr nemá, je třeba na konci procedury položit $r_B=0$. Výpočet závislosti efektivního elektrického náboje $e(r, r_B)$ vede na výraz

$$e^2(r, r_B) = \frac{e_B^2(r_B)}{1 + \beta e_B^2(r_B) \ln(r/r_B)} \Rightarrow e_B^2(r_B) = \frac{e^2(r, r_B)}{1 - \beta e^2(r, r_B) \ln(r/r_B)} \quad (1)$$

kde $\beta = 2/\pi$ a holý náboj elektronu jsme nechali záviset na jeho poloměru. Vidíme, že **pro pevné r a e_B jde efektivní náboj $e(r, r_B)$ s klesajícím r_B k nule**. Pokud by byl elektrický náboj holého elektronu nezávislý na jeho poloměru, dostali bychom v limitě bodového elektronu teorii, v níž na sebe elektrony a pozitrony nepůsobí, neboť efekty polarizace vakua holé náboje odstíní. To není nesmyslné, jen to není fyzikálně zajímavé. Chceme-li dostat pro každé r konečnou, na holém náboji e_B nezávislou hodnotu efektivního elektrického náboje $e(r)$, **musí e_B záviset na jeho poloměru** tak jak udává druhý vztah v (1). Z něj plyne, že pro konečnou hodnotu r_B , rovnou tzv. **Landauovu poloměru r_L** , bude holý elektrický náboj $e(r, r_B)$ **divergovat**. Holý elektron tedy nelze stáhnout až na bod, jak bychom chtěli a QED tedy není na malých vzdálenostech definována.



Obr. 5: závislost efektivních nábojů silných (plná čára), slabých (tečkovaná) a elektromagnetických sil (čárkovaná) na vzdálenosti.

Jak je pak ovšem možné, že ve všech učebnicích kvantové teorie pole je QED považována za nejlepší teorii, jakou pro popis mikrosvětla máme? Důvod spočívá v tom, že hodnota Landauova poloměru r_L je tak malá, že problém, který jsme právě zmínili, je sice principiální, **ale v praxi se nikdy neprojeví**. Konkrétně, pro případ, že uvažujeme ve vakuu jen elektron-pozitronové páry, je $r_L \approx 10^{-291}$ cm! To je tak nepředstavitelně malé číslo, že pragmatický přístup ke QED má své oprávnění. To, co standardně nazýváme elektrický náboj elektronu je hodnota efektivního elektrického náboje na vzdálenostech větších než Comptonova vlnová délka elektronu, tj. 400 femtometrů. Tam výše uvedený vztah pro $e(r, r_B)$ přestává platit a efektivní elektrický náboj jde ke konstantě, rovné klasickému elektrickému náboji. Výsledná závislost efektivního elektrického náboje na vzdálenosti je znázorněna na obr. 5.

Vyšší princip mravní: lokální kalibrační invariance

QED byla vzorem pro teorie ostatních sil působících v mikrosvětě i pokud jde o princip, na němž je ve SM založena dynamika všech sil. V roce 1929 ukázal Hermann Weyl, že QED plyne z principu **lokální kalibrační invariance (LKI)**, tj. požadavku, aby rovnice, které splňuje pole $\psi(x)$ elektronu byly invariantní vůči **lokálním fázovým transformacím**

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = \exp(i\alpha(x))\psi(x) \quad (2)$$

kde $\alpha(x)$ je libovolná diferencovatelná funkce souřadnic. Na rozdíl od případu, kdy $\alpha(x)$ je konstanta, rovnice volného Diracova pole vůči (2) invariantní nejsou a proto v teorii musí existovat vektorové pole A_μ , které s Diracovým pole elektronů interaguje a při transformaci (3) se transformuje podle předpisu

$$A_\mu \rightarrow A'_\mu = A_\mu - \partial\alpha(x)/\partial x^\mu \quad (3)$$

Požadavek invariance rovnic teorie vůči (2-3) také znamená, že kvantum pole A_μ , náš dobře známý foton, musí mít **nulovou klidovou hmotnost**.

Neabelovské kalibrační teorie

Když v říjnu 1954 dva mladí teoretici, Chen Ning Yang a Robert Mills, formulovali třídu QFT, které se dnes nazývají **neabelovské kalibrační teorie**, nebo také **Yangovy-Millsy teorie**, nikdo, ani sami autoři, netušil, že tím položili základní rámec pro popis sil v mikrosvětě.

Yang a Mills se ve své práci budovali teorii sil, které jsou zodpovědné za vazbu protonů a neutronů v jádrech. Z hlediska těchto sil **jsou proton a neutron dva různé stavy jedné částice**, nukleonu, které se liší hodnotou vnitřního kvantového čísla, jež se nazývá **izospin**. Průkopnický význam práce Yanga a Millse spočíval v tom, že svou teorii jaderných sil budovali v těsné analogii s QED na základě již zmíněného **principu lokální kalibrační invariance**. Technicky to znamenalo zaměnit grupu U(1) lokálních fázových transformací (2) grupou SU(2) lokálních transformací izospinového dubletu (proton,neutron).

$$\psi(x) \equiv \begin{pmatrix} \psi_p(x) \\ \psi_n(x) \end{pmatrix} \rightarrow \psi'(x) \equiv \begin{pmatrix} \psi'_p(x) \\ \psi'_n(x) \end{pmatrix} = \exp(i\alpha_k(x)\sigma_k) \begin{pmatrix} \psi_p(x) \\ \psi_n(x) \end{pmatrix} \quad (4)$$

kde σ_k jsou tři Pauliho matice, generátory grupy SU(2), a $\alpha_k(x)$ jsou tři libovolné funkce souřadnic. Ke každému generátoru grupy SU(2) existuje jeden kalibrační boson, který hraje analogickou roli jako foton v QED, a tak v jejich teorii byly síly mezi dvěma nukleony zprostředkovány výměnou tří IVB: kladně nabitého V^+ , záporně nabitého V^- a neutrálního V^0 . Nejdůležitější rozdíl od fotonů, které jsou neutrální a proto sami na sebe nepůsobí, je v tom, že částice V^+ , V^- a V^0 na sebe vzájemně působí stejnými silami, jaké samy zprostředkují. Právě tato vlastnost teorií Yanga a Millse, nazývaná „**samointerakce IVB**“, má za důsledek, že neabelovské kalibrační teorie za určitých okolností netrpí neduhy, které sužují kvantovou elektrodynamiku. Stejně jako v QED je důsledkem požadavku invariance teorie vůči transformacím (4) nulovost klidové hmotnosti příslušných kalibračních bosonů.

Slabé síly

Slabé síly se od elektromagnetických liší dramaticky a ve všech ohledech. Jejich dosah je jen asi tisícina femtometru a díky tomu neexistuje žádná „klasická“ teorie slabých sil a jediným vhodným nástrojem pro jejich popis je QFT. V důsledku velmi krátkého dosahu neexistují žádné částice, které by „držely“ pohromadě slabými silami. Procesy, jež jsou důsledkem slabých sil, jako je například β -rozpad neutronu a jader, nebo proces fúze jader vodíku na jádro hélia v nitru Slunce, jsou tedy bytostně kvantové povahy.

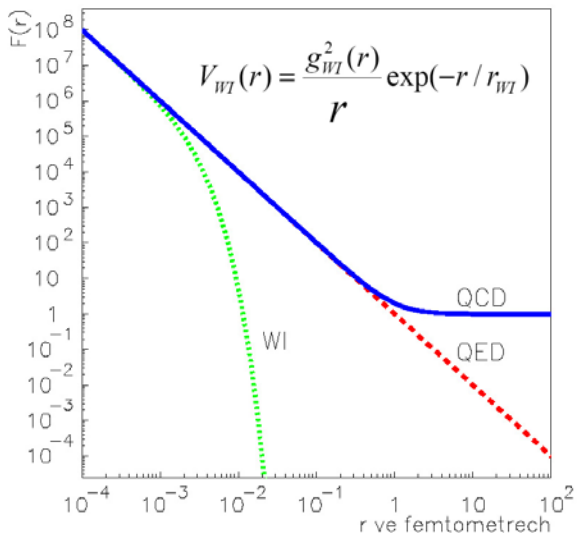
Ačkoliv jsou na vzdálenostech řádu průměru protonu ve srovnání s elektromagnetickými silami skutečně „slabé“, mají jednu důležitou vlastnost: **nejsou invariantní vůči prostorové (P) a nábojové (C) inverzi** (tj. záměně pojmů "vpravo" a "vlevo", resp. "částice" a "antičástice"), ba **ani vůči kombinované prostorové a nábojové inverzi** (CP). Přitom právě jemný (na relativní úrovni 0.001) efekt narušení CP invariance je zřejmě klíčem k pochopení skutečnosti, proč je ve vesmíru více hmoty než antihmoty a proč tedy vůbec existujeme. Shodou okolností k objevu narušení CP invariance v rozpadech částic, jimž se říká neutrální K-mezony, došlo v roce 1964 téměř současně s objevem reliktního mikrovlnného záření. V obou případech šlo o skutečně neočekávané objevy, jež ovšem zásadně ovlivnily vývoj kosmologie i fyziky elementárních částic a byly počátkem sblížení těchto zdánlivě tak odlišných oborů.

Slabé síly jsou na druhé straně **nejuniverzálnější**, neboť působí na všechny kvarky a leptony. Ze tří zprostředkujících částic slabých sil je jedna, označovaná Z, neutrální a dvě, označované W^+ a W^- , elektricky nabité. Při výměně bosonu Z v procesu na obr. 2, se identita rozptylujících částic nemění, podobně jako při výměně fotonu. Při výměně nabitých bosonů W^+ a W^- se mění elektrický náboj kvarků a leptonů o jednotku. Barva kvarků se přitom nemění.

Kvantitativně lze slabé síly mezi například dvěma kvarky popsat pomocí Yukawova potenciálu (viz vzorec v obr. 6), v němž $g_{WT}^2(r)$ je čtverec efektivního slabého náboje kvarku a $r_{WT} \cong 10^{-18}$ m je dosah slabých sil. Tomu odpovídají klidové hmotnosti IVB W^+ , W^- a Z, jež jsou zhruba 100krát větší než je hmot-

nost protonu. Exponenciálně potlačující člen v potenciálu je účinný na vzdálenostech mnohem větších než dosah slabých sil, zatímco na vzdálenostech $r \ll r_{WI}$ přechází potenciál slabých sil na coulombický tvar, charakteristický pro elektromagnetické síly. Na obr. 6 je srovnána závislost slabé síly (WI) mezi kvarky se silou elektromagnetickou (QED) za předpokladu, že efektivní elektrické a slabé náboje kvarků jsou stejné. To sice není přesně pravda, ale jak dále uvidíme, rozdíl není velký a pro srovnání na obr. 6 nepodstatný. Na vzdálenostech menších než asi tisícina femtometru není mezi slabými a elektromagnetickými silami co do velikosti žádný podstatný rozdíl. Obrázek 6 ilustruje skutečnost, že za „slabost“ slabých sil na vzdálenostech řádově femtometr může primárně velká hmotnost IVB W^+ , W^- a Z .

Pochopit jak IVB W^+ , W^- a Z získávají velkou hmotnost a foton přitom zůstává nehmotný, bylo netriviální a trvalo zhruba 10 let než se Sheldonu Glashowovi, Abdusovi Salamovi a Stevenu Weinbergovi koncem 60. let podařilo formulovat teorii, jež se dnes nazývá teorie GWS. Tato teorie se opírá o princip LKI aplikovaný na dublet proton-neutron, ale na rozdíl od práce Yanga a Millse popisuje slabé síly. IVB W^+ , W^- a Z hrají roli kalibračních bosonů, které však na rozdíl od fotonu získávají velkou klidovou hmotnost mechanismem, který navrhl počátkem 60. let Petr Higgs a který využívá myšlenku **spontánního narušení symetrie**. Na podrobnější diskuzi tohoto mechanismu zde není místo, jen poznamenejme, že jde o mechanismus známý i z jiných oborů jako je magnetismus apod. Hledání tzv. Higgsova bosonu, částice se spinem 0, jež by měla jako důsledek Higgsova mechanismu v přírodě existovat, je jedním z hlavních úkolů experimentální fyziky částic.



Obr. 6: srovnání závislostí elektromagnetických (čárkovaně), slabých (tečkovaně) a silných (plná čára) sil mezi dvěma kvarky či na vzdálenosti.

Teorie GWS do určité míry „sjednocuje“ **elektromagnetické a slabé síly**, ale toto sjednocení má spíše charakter mírumilovné koexistence, než skutečného sjednocení. K tomuto bodu se ještě vrátíme.

Silné síly

Cesta k dnešnímu chápání silných sil mezi protony, neutrony a dalšími hadrony trvala zhruba 20 let, od počátku 50. let až do roku 1973, kdy byla formulována **kvantová chromodynamika (QCD)**. Nemáme zde prostor k podrobnější diskuzi experimentálních objevů a teoretických myšlenek, jež vedly až ke QCD, připomeneme proto jen klíčové kroky.

Počátkem roku 1964 přišli **George Zweig a Murray Gell-Mann** s hypotézou, že pozorované vlastnosti kolem stovky baryonů (částic podobných nukleonu) a mezonů (částic podobných mezonu π), jež byly od konce 40. let objeveny, jsou projevem skutečnosti, že všechny tyto částice jsou složeny ze třech ještě elementárnějších objektů, které Zweig nazval „**esa**“ a Gell-Mann „**kvarky**“. Ujal se druhý název, což je dobře, neboť dnes těch vůní kvarků známe šest. Pro popis vlastností hadronů bylo třeba, aby kvarky **měly spin $\frac{1}{2}$** a nesly **neceločíselné** (v jednotkách náboje pozitronu) **elektrické náboje**. Baryony jsou podle kvarkového modelu tvořeny trojicemi kvarků, zatímco mezony páry kvark-antikvark.

Kvarkový model poskytoval jednoduché vysvětlení pozorovaných hadronů, ale narážel na dva vážné problémy. Prvním byla skutečnost, že všechny známé částice měly celočíselné elektrické náboje. 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 problém se týkal kvantitativního popisu některých částic, jako byl například hyperon Ω^- . Potíž byla v tom, že tato částice se spinem $3/2$ se skládá ze tří s-kvarků, které jsou v přesně stejném spinovém stavu, což je v příkrém rozporu s Pauliho principem. Tento problém byl odstraněn zavedením nového kvantového čísla kvarků, které dostalo název „**barva**“ a které nabývalo tří 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 sil mezi kvarky učinil **Yoichiro Nambu**, který jako první pochopil, že barva neslouží jen pro uspokojení Pauliho principu, ale že hraje dynamickou roli. Nambu předpokládal, že síly mezi kvarky jsou zprostředkovány výměnou **8 vektorových bosonů**, jež se dnes nazývají gluony. Jeho model poskytoval kvalitativní vysvětlení, proč v přírodě neexistují nejen kvarky, ale všechny takové kombinace kvarků a antikvarků, které jsou „barevné“. Nambuův model měl všechny základní rysy kvantové chromodynamiky. Nebyla to ovšem plnokrevná kvantová teorie pole, ale „jen“ model.

Ani model barevných kvarků však nebyl v druhé polovině 60. let minulého století všeobecně přijat, neboť teoretické předsudky 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 části o kvantové elektrodynamice a skutečnost a že při snahách popsat srážky hadronů pomocí poruchové teorie selhávala nejen principu, ale i v praxi. Řada fyziků odmítala samotnou představu, že nějaké částice by měly být elementárnější, než jiné a přijala doktrínu „jaderné demokracie“, jež hlásala, že všechny mezony a baryony jsou stejně „dobré“. Na počátku 70. let se dokonce zdálo, že i kvarkový model je v posledním tažení, neboť se objevily nové experimentální údaje, které naznačovaly vnitřní rozporuplnost jeho samotných základů.

Asymptotická volnost

Dramatická změna v pohledu na užitečnost neabelovských kalibračních teorií nastala, když na jaře 1973 Gross, Wilczek a Politzer ukázali, že v této třídě QFT se příslušný efektivní náboj, analogický efektivnímu elektrickému náboji QED, chová (za určitých okolností) zcela opačně než v QED a **na malých vzdálenostech klesá až na nulu**. Tato tzv. **asymptotická volnost**, je přitom přímým důsledkem **samointerakce příslušných kalibračních bosonů**. Při konstrukci teorie popisující interagující kvarky a gluony je třeba holý náboj se zmenšováním jeho poloměru zmenšovat a to podle vztahu podobného (1), kde je ovšem tentokrát $\beta < 0$. V těchto teoriích tedy **vakuum holý náboj nestíní, ale naopak, antistíní!** Stačí do vakua vložit infinitezimálně malý holý barevný náboj a to z něj udělá na konečných vzdálenostech konečný efektivní náboj. Tento pozoruhodný efekt je způsoben tím, že ve vakuu „žijí“ nejen virtuální kvark-antikvarkové páry, ale v důsledku samointerakce gluonů i páry virtuálních gluonů.

Kvantová chromodynamika

Teorii silných sil mezi kvarky a gluony, jež se o tento objev opírala, formulovali okamžitě po objevu asymptotické volnosti Grosse, Wilczek, Politzer a Georgi. Její název **kvantová chromodynamika** (QCD) odráží skutečnost, že tato síla působí jen na částice nesoucí barvu. Poznání, že QCD netrpí problémy, kvůli nimž v polovině 50.let ochladla důvěra v kvantovou teorie pole, znamenalo dramatický přelom a návrat ke QFT jako základnímu teoretickému nástroji při popisu sil v mikrosvětě. V QCD je požadavek LKI aplikován na triplet barevných kvarků jedné vůně, jenž se transformuje podle reprezentací grupy $SU(3)$, jež má 8 generátorů. Těm odpovídá 8 nehmotných barevných kalibračních bosonů, nazývaných gluony. Gluony samy nesou barvu proto spolu interagují, podobně jako W^+ , W^- a Z .

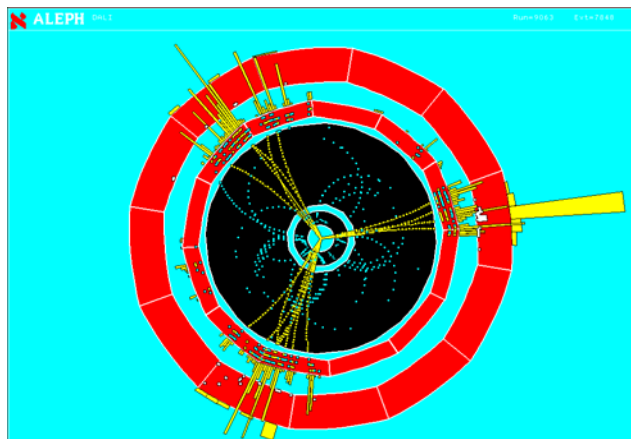
V důsledku této samointerakce závisí efektivní barevný náboj v QCD na vzdálenosti způsobem naznačeným na obr. 5. Pokud by QCD existovala sama o sobě, pokračoval by jeho pokles s klesající vzdáleností až do nuly. Jak dále uvidíme, je ale možné, že na vzdálenostech cca 10^{-16} femtometru, nebo i větších, se silné síly „spojí“ s elektromagnetickými a slabými silami.

QCD také dokáže vysvětlit, proč v přírodě neexistují volné kvarky a další systémy kvarků a gluonů, které nejsou „bezbarvé“. Charakter silných sil mezi kvarky, znázorněný na obr. 6, je totiž takový, že na vzdálenostech větších než asi 1 femtometr přestanou klesat a jsou dále zhruba konstantní. I tato vlastnost je – i když velmi netriviálním – důsledkem samointerakce gluonů. Síly mezi pozorovatelnými hadrony, jež se obvykle nazývají jaderné, jsou v rámci QCD zbytkovými silami sil mezi kvarky a gluony, podobně jako síly mezi molekulami jsou zbytkovými silami elektromagnetických sil mezi elektrony a jádry

Skutečnost, že kvarky na rozdíl od leptonů neexistují v přírodě jako volné částice, ale jenom jako součást složitějších systémů, a že má přesto smysl o nich mluvit jako o základních stavebních kamenech hmoty, může vyvolávat oprávněné námitky. Jak může „existovat“ něco, co nemůžeme, ani v principu, „vzít do ruky“? Tato námitka byla příčinou pochybností mnoha fyziků o „fyzikální realitě“ kvarků a vedla řadu

z nich k přesvědčení, že kvarky jsou jen užitečnou mnemotechnickou pomůckou či matematickým pojmem, který nám usnadňuje některé úvahy.

Dnes je jasné, že kvarky je třeba brát vážně a pracovat s nimi téměř jako s leptony. Tento přístup se opírá o důležité experimentální zjištění. Ačkoliv izolované kvarky z protonu či neutronu vyrazit nelze, pozorujeme, že je-li energie vyráženého kvarku či gluonu dostatečně velká, vylétají ve směru kvarků či gluonů úhlově kolimované svazky částic, nazývané „jety“. Konkrétní případ jedné takové srážky na urychlovači LEP v CERN je na obr. 7. Z měření úhlů, energií a dalších vlastností jetů usuzujeme na dynamiku samotných kvarků a gluonů. **Jety dnes hrají při hledání zákonů mikrosvětla klíčovou roli, kterou v minulosti hrály jen částice samotné.**



Obr. 7: Počítačová rekonstrukce výsledku srážky elektronu s pozitronem na urychlovači LEP v CERN, při níž vznikly tři jety. Energie jednotlivých částic v jetech je úměrná výšce žlutých věžiček. Obrázek je v rovině kolmé na směr srážejících se částic.

Jak dál?

Standardní model, jehož základy jsme v předchozích částech nastínili, je až na stále otevřenou otázku **existence Higgsova bosonu**, experimentálně prověřen do značných podrobností a poskytuje odpovědi na mnoho otázek týkajících se struktury hmoty a zákonitostí, jež v mikrosvětě platí. Některé zásadní otázky ovšem ponechává nezodpovězeny:

- Jsou kvarky a leptony skutečně **fundamentální**, nebo i ony mají **vnitřní strukturu**?
- Proč existují právě **tři generace** kvarků a leptonů?
- Proč mají takové elektrické **náboje a hmotnosti**, jaké mají?
- Existují i **další síly**, o nichž dosud nic nevíme?
- Mají všechny čtyři známé síly **společný původ**?
- Jak může být **gravitace zahrnuta** do standardního modelu?

Kromě toho má SM i vážnou vadu na kráse. Obsahuje asi **20 volných parametrů** (hmotností kvarků a leptonů, jejich elektrické, slabé a barevné náboje a několik dalších), jejichž hodnoty ze SM neplynou, ale je třeba je vzít z experimentu. To naznačuje, že náš dnešní SM je jen efektivní teorií, relevantní pro popis jevů, které jsme schopni pozorovat a že „pod ním“ existuje hlubší a základnější teorie. To nepřekvapuje, tak tomu ostatně bylo vždy. V minulosti byl ovšem další rozvoj teoretických představ obvykle motivován novými experimentálními poznatky, jež nebylo možné v rámci stávajících teorií vysvětlit. Dnes je situace taková, že **neexistuje žádný jev nebo měření, které by nebylo možno vysvětlit v rámci SM**, a které by rozhodujícím způsobem pomohlo orientovat teoretické úvahy jdoucí za SM. Tato situace je na jedné straně příznivá, neboť ukazuje, že základy dnešní SM jsou pevné, ale na druhé straně v minulosti to byla

vždy experimentální hádanka, co motivovalo teoretický pokrok. V takové situaci je přirozené, že se hna-cím motorem teorie v posledních zhruba 20 letech staly snahy vybudovat teorii, která by byla nejen ma-tematicky konzistentní a v jistém smyslu „krásná“, ale která by také odpověděla aspoň na některé z výše uvedených otázek. V dalším nastíníme několik hlavních směrů, jimiž se současná teorie ubírá. Jak uvi-díme, každý z nich narušuje jeden z pilířů, na nichž je dnešní SM vybudován.

Jsou kvarky a leptony skutečně elementární?

Tuto otázku si začali fyzikové klást koncem 70. let, poté, co byly objeveny první dvě částice z dnešní 3. generace: kvark b a lepton τ . Dvojnásobná replikace základních rysů první generace kvarků a leptonů vedla mnohé teoretiky k myšlence, že kvarky a leptony by mohly být složeny z ještě elementárnějších objektů, kterým se genericky říká *preony*. Tato představa byla dále motivována snahou pochopit vztah mezi elektrickými náboji kvarků a elektronu. Počátkem 80. let se objevila řada modelů, které se snažily tuto myšlenku různými způsoby konkretizovat a dát jí i dynamický obsah.

Jako příklad uveďme model, v němž jsou nejen leptony a kvarky, ale i kalibrační bosony složeny ze dvou fermionů se spinem $1/2$, tzv. *rishonů* (v Hebrejštině primární). Jeden z nich, Y , má elektrický náboj $1/3$ a druhý, V , je elektricky neutrální. K těmto dvěma rishonům existují i dva antirishony (zde označované Y_a, V_a). Kvarky a leptony první generace a kalibrační bosony mají následující skladbu:

- elektron: $Y_a Y_a Y_a$
- kvark u ve třech barevných stavech: YYV, YVY, VYY .
- kvark d ve třech barevných stavech: $Y_a V_a V_a, V_a Y_a V_a, V_a V_a Y_a$
- elektronové neutrino: VVV
- W^+ : $YYYVVV$, W^- : $Y_a Y_a Y_a V_a V_a V_a$
- gluony: $YYVY_a V_a Y_a$ a pod (gluony mění jen pořadí rishonů).

a analogicky pro antičástice. V tomto modelu je zcela přirozený například proces $u + u \rightarrow e^+ + \bar{d}$, který je ve SM absolutně zakázán, neboť se v něm nezachovává baryonové číslo.

Druhá a třetí generace kvarků a leptonů jsou v tomto modelu blíže nespecifikovanými excitacemi fermi-onů první generace. To má za následek řadu vítaných důsledků, například jasný důvod, pro vztah elek-trických nábojů kvarků a nabitých leptonů, ale také některé vážné problémy. Ty souvisí především s tím, že se tento ani podobné modely nepodařilo přeměnit ve skutečnou teorii s dynamickými zákony, které by vysvětlovaly, proč a jak jsou rishony ve kvarkcích a leptonech vázány. Model rishonů uvádíme jen jako příklad, kudy se úvahy o substruktuře kvarků a leptonů ubíraly. I když se nepodařilo na myšlence substrukturny kvarků a případně leptonů vybudovat skutečnou matematiky konzistentní a fyzikálně rele-vantní teorii, má jistě stále smysl tuto možnost zkoumat experimentálně. Zatím ovšem *neexistují žádné experimentální příznaky, že kvarky a leptony nějakou substrukturu skutečně mají*.

Teorie velkého sjednocení

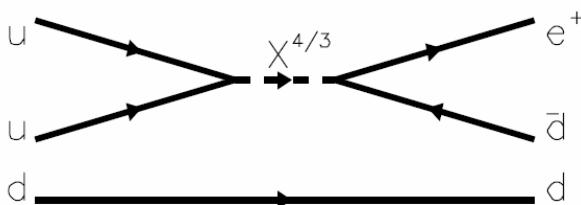
Jedná se o třídu teorií, které se snaží sjednotit elektromagnetické, slabé a silné síly v rámci jedné kalib-rační grupy. První krokem v tomto směru byla teorie Glashowa, Weinberga a Salama z konce 60.let, kte-rá sjednotila elektromagnetické a slabé síly do jedné teorie, o níž jsme se již zmínili (teorie GWS). Krát-ce po formulaci QCD přišli v roce 1974 Sheldon Glashow s Howardem Georgi s radikální, přímo kacíř-skou, myšlenkou, jež spočívala v tom, že **všechny kvarky a leptony jedné generace i jejich antičástice jsou jen různé stavy jednoho fundamentálního fermionu** a elektromagnetické, slabé a silné síly jsou jen různé projevy téže „prasíly“.

Tato myšlenka byla motivována chováním efektivních nábojů elektromagnetických, slabých a silných sil, znázorněných na obr. 5. Tvar křivek je dán teorií, ale jejich vertikální umístění odráží experimentální hodnoty efektivního elektrického, slabého a silného (barevného) náboje. Vidíme, že na vzdálenostech cca

10^{-15} fm jsou všechny tři efektivní náboje stejné. Poznamenejme, že tato tzv. **škála velkého sjednocení**, je jen asi tisíckrát delší než Planckova škála 10^{-33} cm, charakterizující gravitační síly.

Na vzdálenostech 10^{-30} cm podle teorií velkého sjednocení (GUT z anglického Grand Unified Theories) působí vedle elektromagnetických, slabých a silných sil i síly, zodpovědné za přechody **kvark** \leftrightarrow **lepton** a **kvark** \leftrightarrow **antikvark**. Tyto síly, jež jsou ve SM striktně zakázány, jsou zprostředkovány výměnou kalibračních bosonů, označovaných X. Protože působí jen na vzdálenostech menších než 10^{-15} femtometru, musí být velmi těžké, zhruba 10^{15} GeV, a nesou i exotické elektrické náboje: $\pm 5/3, \pm 4/3, \pm 1/3$. Konkrétní počet těchto těžkých kalibračních bosonů závisí na tom, kterou konkrétní grupu symetrie vezmeme. V současné době jsou nejjednodušší varianty GUT vyloučeny experimentem, ale přesto většina teoretiků je přesvědčena, že jejich základní myšlenka je správná. Mimo jiné i proto, že **procesy narušující baryonového čísla jsou vedle narušení CP invariance druhým nezbytným předpokladem** pro pochopení vzniku převahy hmoty nad antihmotou v našem vesmíru.

Sjednocení elektromagnetických, slabých a silných sil v rámci GUT hraje podle dnešních představ klíčovou roli i v teorii velkého třesku. Proces, při němž se z jedné „prasíly“ vydělily elektroslabé a silné síly, byl zřejmě i hnacím motorem éry tzv. **inflace**, při níž v době, kdy bylo vesmíru asi 10^{-35} s, došlo k exponenciálnímu nárůstu jeho velikosti. Tento dramatický jev poskytuje základní rámec pro vyřešení několika závažných problémů standardního kosmologického modelu, jako jsou problém horizontu, plochosti současného vesmíru a další. Pro moderní kosmologii jsou teorie velkého sjednocení nepostradatelné.



Obr. 8: Rozpad protonu v teoriích velkého sjednocení. Dvojice kvarků uu anihiluje na těžký kalibrační boson s nábojem $4/3$, jenž se poté přemění na pozitron a mezonu π^0 .

Generickým a dramatickým důsledkem GUT, je předpověď, že **proton není stabilní!** Nejjednodušší proces, jenž k vede k rozpadu protonu, je znázorněn na obr. 8: dva kvarky u, které spolu s kvarkem d tvoří proton, se přemění na pár pozitron a antikvark d, jenž se následně spojí s kvarkem d z původního protonu a vytvoří neutrální mezon π^0 . Všimněme si, že jde o stejný proces, jako ve výše popsaném modelu substruktury kvarků a leptonů. Na rozdíl od modelu rishonů však zde je dynamický důvod, proč tyto procesy jsou silně potlačeny. Rozpad protonu na π^0 a pozitron je jenom

jeden z možných módů, ale mód velmi charakteristický, při němž se přemění asi 85% klidové hmotnosti protonu na kinetickou energii jeho rozpadových produktů. Kdyby tohle šlo dělat ve velkém, bylo by o zdroj energie postaráno.

Tento a další módy rozpadu protonu se hledaly již od počátku 80. let v řadě experimentů na exotických místech, jako jsou doly či boční kaverny tunelu pod Mont Blanckem. Přes veškerou snahu zatím žádný rozpad protonu zaznamenán nebyl, což umožnilo stanovit spodní mez asi 10^{33} let na dobu jeho života. Vzhledem ke stáří vesmíru, jež se odhaduje na 13 miliard let a skutečnosti, že v našem těle máme zhruba 10^{29} protonů a neutronů, je jasné, že nám nebezpečí rozpadu nehrozí. Přesto, je-li v myšlence GUT zdravé jádro, proton se rozpadat musí. Kdo to experimentálně prokáže, má Nobelovu cenu jistou.

Supersymetrie

Skutečnost, že systémy identických bosonů a fermionů mají zásadně jiné vlastnosti symetrie, byla dlouho považována za projev principálního rozdílu mezi těmito dvěma třídami částic. V souvislosti s rozvojem GUT a snahami zahrnout do těchto teorií i gravitaci se však situace změnila. Obrovský rozdíl mezi škálou velkého sjednocení, tj. 10^{15} GeV, a škálou elektroslabého sjednocení, 10^3 GeV, nazývaný **problém hierarchie**, vyžadoval velmi jemné „vyladění“ parametrů GUT. Tomu se lze vyhnout za předpokladu, že ke každé částici SM, kvarkům, leptonům i kalibračním bosonům, existuje tzv. „**supersymetrický partner**“, částice, jejíž spin se liší o $1/2$: tedy ke kvarkům a leptonům „skvarky“ a „sleptony“ se spinem 0, ke

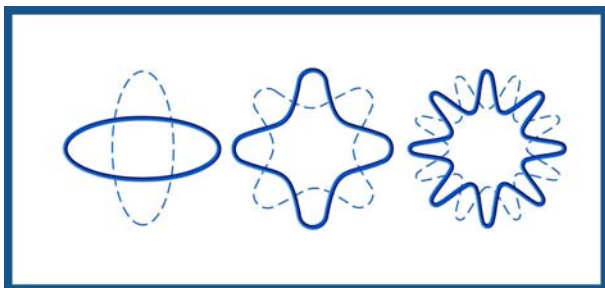
kalibračním bosonům „sbosony“ („wino“, „zino“ a „gluino“) se spinem $\frac{1}{2}$ a k Higgsovu bosonu „higgsino“ rovněž se spinem $\frac{1}{2}$.

Matematický formalismus, na němž je tato myšlenka založena, jsou tzv. gradované algebry, či „superalgebry“. Kvantová teorie pole, která myšlenku supersymetrie zahrnuje, byla v posledních letech intenzivně rozpracována. Její nejjednodušší varianta, která se nazývá „**minimální supersymetrický standardní model**“ (MSSM), představuje přirozené a minimální rozšíření dnešního SM. V této teorii se těžší supersymetrické částice rozpadají na lehčí a částice SM, přičemž nejlehčí supersymetrická částice musí být absolutně stabilní. Podobně jako u částic SM, samotná myšlenka supersymetrie neposkytuje žádnou informaci o tom, jaké mají být klidové hmotnosti supersymetrických partnerů standardních kvarků, leptonů a kalibračních bosonů. Hledání supersymetrických částic bylo a je spolu s hledáním Higgsova bosonu hlavním cílem většiny experimentů na urychlovačích. Přes veškerou snahu se zatím supersymetrické částice najít nepodařilo. Pokud existují, musí být proto těžké, **spodní mez na nejlehčí z nich je asi 50 GeV**. Narušení supersymetrie hmotnostmi částic je tedy značné a vzniká tak přirozená otázka, jaký mechanismus je za tento velký rozdíl zodpovědný.

Pátání po supersymetrických částic a prověřování dynamiky jejich produkce ve srážkách „normálních“ částic bude jedním z hlavních cílů experimentů na urychlovači LHC, jenž se buduje v Evropském středisku fyziky částic CERN v Ženevě a jenž bude uveden do provozu koncem roku 2008. Mezi teoretiky převažuje názor, že pokud je příroda skutečně supersymetrická, musí experimenty na LHC aspoň ty nejlehčí supersymetrické partnery částic SM najít. V každém případě je velká naděje, že do konce desetiletí budeme mít v této otázce jasno. Bude to zajímat i astrofyziky a kosmology, neboť nejlehčí neutrální supersymetrická částice, tzv. **neutralino**, je žhavým kandidátem na vysvětlení podstaty **temné hmoty** ve vesmíru, jednoho z ústředních problémů současné kosmologie. Ale to už bychom se dostali příliš daleko.

(Super)struny

Ve SM jsou základními objekty kvantovaná pole, závisující na prostoročasových souřadnicích. Koncem 60. let se zdálo, že některé vlastnosti protonů, neutronů a mezonů lze jednoduše vysvětlit, předpokládáme-li, že se chovají jako struny ve třírozměrném prostoru o délce řádově femtometr. Brzy se ovšem ukázalo, že takto protony chápat nelze a strunový model hadronů byl opuštěn. Počátkem 80. let se struny do fyziky vrátily, ale nikoliv pro popis hadronů, ale jako základní objekt teorií, které se snažily do GUT zahrnout i gravitaci. Tyto struny měly ovšem rozměry **Planckovy škály, tj. 10^{-33} cm**, a byly tedy zhruba o 20 řádů menší než je rozměr protonu. Superstruny „nežijí“ také v obvyklém 3-rozměrném prostoru, ale ve vícerozměrném prostoru a obvykle zahrnují i supersymetrii. Existují přitom otevřené i uzavřené (super)struny.

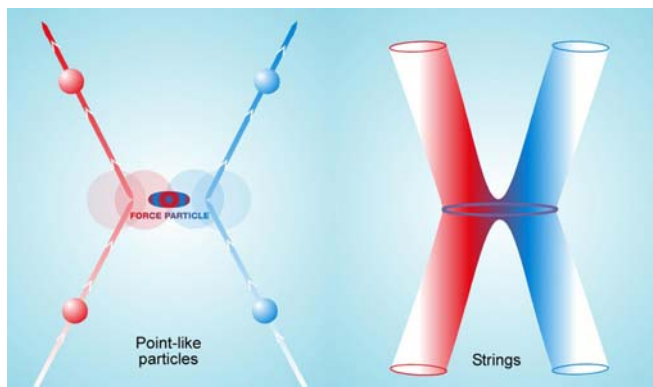


Obr. 9: Vibrační stavy jednorozměrné uzavřené struny v rovině. Vlevo základní stav s nejnižší energií, uprostřed a vpravo první dva excitované stavy.

Protože my jsme schopni vnímat jen 3 prostorové a jednu časovou dimenzi, musí být další dimenze „svinuty“ (odborně „kompaktifikovány“) na velmi malé ruličky, jejichž velikost je typicky 10^{-33} cm. Vibrační excitace takových strun (viz. obr. 9) se při pohledu z dálky, tj. s malou rozlišovací schopností jeví jako bodové částice s různou klidovou hmotností závisující na vibračním módu. Kromě nejnižší mají vyšší excitace hmotnosti řádově 10^{19} GeV a jsou tedy pro nás experimentálně nedostupné. Základní předností těchto teorií je, že mohou poskytnout klíč ke sjednocení teorie gravitace s kvantovou teorií. Klasická teorie gravitace je totiž při-

rozenou limitou kvantových teorií strun na velkých vzdálenostech. O teoriích, v nichž jsou struny a další dimenze velikosti Planckovy škály pojednává kniha Briana Greena *Elegantní vesmír*.

Základní předností teorie strun je v tom, že se v ní **neobjevují nekonečna**, o nichž jsme se zmínili v souvislosti s definicí efektivního elektrického náboje a které jsou důsledkem lokálního charakteru sil mezi bodovými částicemi. Jak ukazuje obr. 10, v teorii strun není žádná interakce bodová prostě proto, že samy základní objekty nejsou bodové.



Obr. 10: Rozptyl dvou uzavřených strun ve třech rozměrech (vpravo). Na obrázku vlevo je analogický proces pro bodové částice.

Teorie supestrun doznala v posledních letech obrovského rozvoje při zkoumání jejich matematických aspektů. Došlo ovšem také k výraznému posunu pokud jde o prediktivní sílu těchto teorií. Zatímco před dvaceti lety se zdálo, že, zjednodušeně řečeno, konzistentních teorií superstrun je jen několik a že tedy ze samotné myšlenky superstrun dostaneme „**Teorii všeho**“ skoro jednoznačně, dnes je jasné, že je tomu spíše naopak. Teorie superstrun jsou matematicky tak mocné, že jsou v jistém smyslu schopné popsat cokoliv, resp. korelovat teorie tak fyzikálně vzdálené, jako je kalibrační teorie ve čtyřech rozměrech se systémem matic, které s prostoročasem vůbec nepracují! V každém případě najít tu správnou teorii

z kandidátů, jejichž počet se odhaduje na nepředstavitelných 10^{500} , bude chvíli trvat.

Z Greeneovy knížky se čtenář také dozví, že teorie superstrun je velmi ambiciózní i pokud jde o oněch asi 20 volných parametrů SM (hmotností, nábojů a dalších), o nichž jsme se již zmínili. Ty všechny slibuje teorie superstrun spočítat ze svých „prvních principů“. Důležitou roli přitom má hrát geometrie a topologie prostoročasu s dalšími dimenzemi. Tak například počet generací kvarků a leptonů by měl být dán Eulerovým číslem charakterizujícím topologii variety šesti kompakťovaných prostorových dimenzí. To všechno je možné, ale já si to představit neumím. Mimo jiné i proto, že supersymetrie do hry přináší řadu (stovky až tisíce) nových těžkých částic, jejich hmotnosti bude třeba také spočítat. Dosud neexistuje ani náznak, jak z teorie superstrun spočítat aspoň poměr hmotností elektronu a mionu.

Zdůrazněme, že další dimenze nikdy v obvyklém slova smyslu „nevidíme“ a na jejich existenci můžeme usuzovat jedině srovnáním měření v našem třírozměrném prostoru s předpověďmi SM a teorií strun či jinou teorií pracující ve vícerozměrném prostoru.

Teorie s velkými dalšími dimenzemi

Skutečnost, že žijeme a jsme schopni vnímat právě tři prostorové a jednu časovou dimenzi, je tak zjevná, že dlouho nikoho ani nenapadlo formulovat fyzikální teorie v jiném prostoru. Až v roce 1919 přišel s kacířskou myšlenkou, že prostor může být více než třírozměrný³ Theodor Kaluza⁴. Byl veden snahou odvodit Einsteinovu teorie gravitace i Maxwellovu teorie elektromagnetického pole z jednoho rámce. Podařilo se mu ukázat, že obě tyto teorie plynou z Einsteinových rovnic obecné teorie relativity formulovaných v pětirozměrném prostoročase a to dokonce bez přítomnosti hmotového členu. Kaluza ovšem pracoval v rámci klasické teorie pole a čtvrtá prostorová dimenze v jeho teorii byla do značné míry formální, bez hlubšího fyzikálního obsahu, neboť polní veličiny na ní nezávisely.

Na jeho práci navázal v roce 1926 Oskar Klein, který Kaluzovu myšlenku oblékl do kvantového hávu a přidal fyzikální obsah čtvrté prostorové dimenzi. Ta je podle něj svinuta do kruhu o velmi malém poloměru, řádově rovném Planckově délce 10^{-33} cm. Díky tomu jsou energie odpovídající excitacím v této dimenzi kvantovány v násobcích Planckovy hmotnosti, tj. 10^{19} GeV. Výsledná Kaluzova-Kleinova teorie se stala prototypem všech dalších pokusů formulovat zákony mikrosvěta ve vícerozměrném prostoročase,

³ Vícerozměrný je vždy jen prostor, čas je ve všech moderních teoriích jednorozměrný.

⁴ Ještě před Kaluzou a ovšem i před formulací Einsteinovy teorie gravitace, se o to pokusil v roce 1914 Nordström.

včetně teorie (super)strun. Skutečnost, že čtvrtá a další prostorové dimenze mají v těchto teoriích velikost Planckovy škály však prakticky vylučuje přímou detekci jejich projevů.

K důležitému posunu ve snaze sjednotit gravitační síly s ostatními silami SM a vyřešit problém hierarchie došlo v roce 1998. Několik autorů tehdy přišlo s myšlenkou, že kromě tří obvyklých „rozvinutých“ dimenzí, existuje dalších **n svinutých dimenzí**, které mají ve srovnání s Planckovou délkou **velký polo-měr R a jimiž se šíří jen gravitace**. V tomto rámci není Planckova délka **fundamentální škálou**, ale pouhý přelud, který vznikne, pokud gravitaci popisujeme ve třech prostorových rozměrech. Na klasické úrovni je úvaha následující. Uvažujme ve (3+n)-rozměrném prostoru gravitační potenciál mezi dvěma tělesy o hmotnostech m_1 a m_2 , umístěnými na vzdálenosti r . Z Gaussova zákona ve (3+n) prostorových dimenzích, má tento potenciál pro malé vzdálenosti $r \ll R$

$$V(r) = \frac{G_N m_1 m_2}{r^{n+1}} = \frac{m_1 m_2}{M_{Pl(3+n)}^{n+2}} \frac{1}{r^{n+1}} \quad (5)$$

kde $M_{Pl(3+n)}$ je parametr, jenž má význam Planckovy škály ve (3+n) dimenzích. Pro $r \gg R$ platí

$$V(r) \approx \frac{m_1 m_2}{M_{Pl(3+n)}^{n+2} R^n} \frac{1}{r} \quad (6)$$

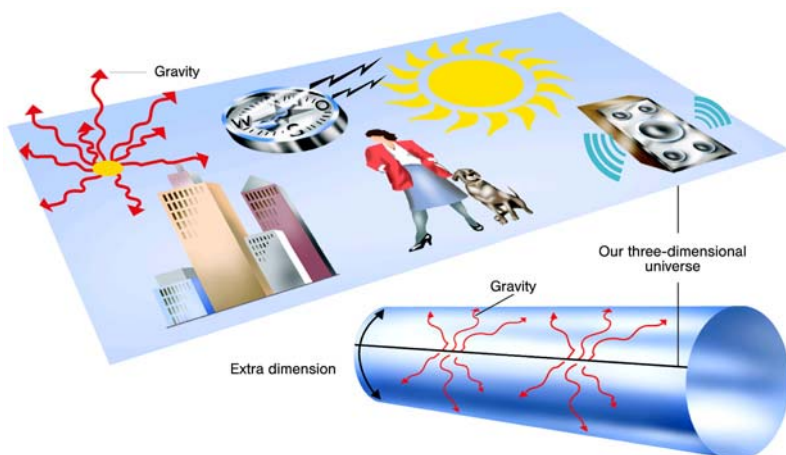
a tedy efektivní Planckova škála v našich 3 prostorových dimenzích, jež je rovna 10^{-33} cm, je dána jako

$$M_{Pl} = M_{Pl(3+n)}^{n/2+1} R^{n/2} \quad (7)$$

Přijmeme-li předpoklad, že škála elektroslabého sjednocení $M_W \approx 10^3$ GeV **je jedinou fundamentální škálou v přírodě** a dosadíme na levé straně 10^{19} GeV a na pravé $M_{Pl(3+n)} = M_W$, dostaneme pro velikost svinutého prostoru extra dimenzí odhad

$$R \approx 10^{32/n-17} \text{ cm} \quad (8)$$

Případ $n=1$, pro nějž $R \approx 10^{13}$ metrů a jenž by znamenal odklon od Newtonova zákona na vzdálenostech charakteristických pro Sluneční systém, je zjevně vyloučen. Ale již $n=2$ dává $R \approx 1$ mm, což byla až do nedávna dolní mez na vzdálenosti, na nichž byl Newtonův zákon experimentálně prověřován. Vyšší hodnoty n dávají vzdálenosti, na nichž gravitační zákon ještě neproověřován nebyl a jsou tedy možné. Čím větší je n , tím menší je rozdíl mezi 10^{-17} cm, škálou elektroslabých sil, a velikostí R dalších dimenzí.



Obr. 11: Zatímco my žijeme a všechny síly kromě gravitace působí ve třírozměrném prostoru, znázorněném vodorovnou čarou na plášti válce, gravitace se šíří i ve velkých svinutých extra dimenzích, na obrázku představovaných pláštěm válce.

V rámci této představy hrají gravitační síly důležitou roli již na vzdálenostech 10^{-17} cm, jež budou brzy experimentálně dostupné na urychlovači LHC v CERN. Některé jejich projevy by byly vskutku dramatické a v mnohém by připomínaly okolnosti zrodu hypotézy neutrina počátkem 30. let. Řada fyziků se od roku 1917 trápila s problémem, jak vysvětlit skutečnost, že při rozpadu neutronu na proton a elektron je spektrum energií elektronu spojité a součet energií protonu a elektronu není roven klidové hmotnosti neutronu. Bohr tuto záhadu interpretoval jako svědectví, že v individuálních procesech

mikrosvěta **se energie a hybnost nezachovává**. Tato hypotéza byla zcela nepřijatelná pro Wolfganga Pauliho, jenž proto přišel s jinou, na tehdejší dobu neméně kacířskou myšlenkou: v rozpadu neutronu vzniká ještě jedna, neutrální, částice, jež do té doby unikala detekci. A trvalo dvacet let, než se potvrdilo, že měl pravdu. V případě velkých dalších dimenzí by experimentální situace byla podobná. Při srážkách dvou protonů na LHC bychom například zjistili, že celková energie částic, které jsme schopni detegovat v koncovém stavu, není rovná celkové energii protonů před srážkou. Jinými slovy, **energie by se nezachovávala**. Ale na rozdíl od případu rozpadu neutronu, by tentokrát měli pravdu Bohr, neboť v teoriích s velkými dalšími dimenzemi by chybějící energii a hybnost „odnesl“ graviton do dimenzí, kam „nevidíme“. Existence těchto dimenzí by pozměnila i scénář teorií velkého sjednocení, neboť k němu by docházelo také již na vzdálenostech na vzdálenostech 10^{-17} cm.

První pozdrav z Nového světa?

V roce 2002 získali Nobelovu cenu za fyziku dva starší pánové, **Raymond Davis a Masatoshi Koshiba** za objevy, které se týkají vlastností neutrin a role, kterou neutrina v přírodě hrají. Jejich životní osudy a ságy jejich objevů jsou fascinující a zasloužily by si samostatný článek, my zde ovšem jen připomeneme jejich hlavní důsledek. Tím je poznání, že **neutrina mají nenulové klidové hmotnosti**. Ve SM jsou přitom všechna tři neutrina nehmotná. Hodnoty uvedené v závorkách v tabulce 1, jsou jen horní meze plynoucí z měření energií rozpadových produktů. Připomeňme, že elektronové neutrino ν_e a mionové neutrino ν_μ jsou stavy, které doprovázejí při rozpadech nabitých pionů elektron či mion

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (9)$$

Na rozdíl od fotonu, jehož nulová klidová hmotnost je přímým důsledkem požadavku kalibrační invariance, u neutrin se žádný takový „vyšší princip“ najít nepodařilo. A protože co není zakázáno, je dovoleno, není existence nenulových klidových hmotností neutrin v rozporu s ničím posvátným.

Experimenty Davise a Koshiby ukázaly, že stavy označované ν_e , ν_μ a ν_τ nejsou vlastními stavy Hamiltoniánu, tj. **nemají dobře definovanou klidovou hmotnost**. Tu mají stavy označované ν_1 , ν_2 a ν_3 , jejichž lineárními kombinacemi stavy ν_e , ν_μ a ν_τ jsou (pro jednodušší případ smíšení dvou neutrin).

$$\nu_e \equiv \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta, \quad \nu_\mu \equiv -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta \quad (10)$$

Pokud jsou hmotnosti m_1 , m_2 a m_3 různé, dochází k „**oscilaci neutrin**“, pozoruhodnému kvantovému jevu, při němž se např. stav ν_e , který vznikl při rozpadu pionu na pozitron, během časového vývoje mění na lineární superpozici ν_e a ν_μ (v případě, že uvažujeme jen dvě neutrina). To znamená, že se nezachovává identita neutrin a můžeme proto definovat pravděpodobnosti, že například elektronové neutrino s energií E bude po zdolání vzdálenosti L stále ještě ve stavu ν_e nebo již ve stavu ν_μ . Tyto pravděpodobnosti, jež závisejí na podílu L/E , rozdílu hmotností $\Delta m^2 \equiv m_1^2 - m_2^2$ a tzv. **směšovacím úhlu θ** , jsou

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_e) &= 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \\ P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

Oscilace elektronového neutrina na mionové neutrino poskytuje přirozené vysvětlení skutečnosti, že ze Slunce k nám na Zem dopadá jen asi polovina toku neutrin, který očekáváme na základě dnešních znalostí mechanismu spalování vodíku na hélium v jeho nitru jevu. Tento tzv. **deficit slunečních neutrin** pozoroval Davis již od konce 60. let pomocí metody, která opírala o radiochemický proces vypírání atomů radonu z tetrachloretylenu. Davis, který byl svým založením především chemik, dokázal tímto způsobem neuvěřitelné: v nádrži s 400 tisíci litry tetrachloetylenu našel jednou za zhruba 2 měsíce 10-20 atomů argonu, které vznikly v reakci $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{38}\text{Ar} + e^-$. Jeho pozorování potvrdily a výrazně rozšířily

experimenty Koshihy. Je krásnou ilustrací přísloví „šťěstí přeje připraveným“, že svůj první vodní čerenkovský detektor postavil ze zcela jiných důvodů: šlo mu o hledání rozpadu protonu, o němž jsme se již zmínili. Od spuštění v roce 1983 do roku 1995 Koshihův detektor žádný rozpad protonu nezaznamenal, ale za to zachytil a velmi přesně proměřil tok slunečních neutrin.

V současné době všechny experimenty s neutrinami, slunečními, z urychlovačů i reaktorů ukazují na to, že $\Delta m_s^2 \equiv m_1^2 - m_2^2 \cong 10^{-4}$ eV a $\Delta m_a^2 \equiv m_2^2 - m_3^2 \cong 10^{-3}$ eV. I když zatím neznáme absolutní hodnoty hmotností, z experimentů s β -rozpadem tritia je jasné, že ani jedna z hmotností m_1, m_2, m_3 nemůže být větší než asi 3 eV. To znamená, že ve druhé a třetí generaci jsou hmotnosti neutrálních leptonů o mnoho řádů (osm u druhé a devět u třetí) menší než hmotnosti jejich nabitých partnerů elektronu, mionu a tauonu. Ve srovnání s poměry hmotností kvarků s náboji $2/3$ a $-1/3$ je tento nepoměr zarážející. Existují argumenty, byť ne zcela přesvědčivé, že tato skutečnost je nepřímým důkazem správnosti myšlenek teorií velkého sjednocení a prvním experimentálním náznakem „nové fyziky“.

Závěr

Nových myšlenek a hypotéz o tom, jak je příroda na velmi malých vzdálenostech uspořádána a jakými zákony se tam řídí, je tedy dnes řada. Některé z nich jsou konzervativní, jiné přímo fascinující. ***Fyzika je ovšem empirická věda, a tak o tom, zda kvarky a leptony jsou složeny z ještě menších částic, nebo zda v mikrosvětě vládne supersymetrie, superstruny či dokonce velké další dimenze, rozhodne nakonec experiment.*** Proto je s takovým napětím očekáváno spuštění urychlovače LHC v CERN, jenž bude na dlouhou dobu jediným zařízením, na kterém bude možno projevy „nové fyziky“ pozorovat. Experimentální zařízení, pomocí nichž se budou projevy „nové fyziky“ hledat, jsou ovšem neméně fascinující, než jevy, jež budou hledat. Základní informace najde čtenář například v [4].

Děkuji Pavlu Kolářovi za kritické přečtení článku a řadu užitečných připomínek.

[1] J. Hořejší: Historie standardního modelu

<http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~horejsi/popular/smodel.ps>

[2] J. Chýla: Od barevných kvarků ke kvantové chromodynamice a Nobelově ceně za fyziku v roce 2004
Pokroky matematiky, fyziky a astronomie 50 (2005), 2

[3] J. Chýla a kolektiv: Padesát let fyziky elementárních částic ve Fyzikálním ústavu AV ČR
Čs. čas. fyz. 53 (2003), 215

[4] J. Chýla a kolektiv: Fyzika elementárních částic ve Fyzikálním ústavu dnes a zítra
Čs. čas. fyz. 55 (2005), 293