

# Současné představy o struktuře hmoty

Jiří Chýla  
Fyzikální ústav AV ČR

## Co jsou elementární částice?

Jen těžko bychom v přírodních vědách hledali důležitější pojem než jakým je pojem „elementární částice“ a s tím související pojem „struktury“. Je přitom zajímavé, že právě obsah tohoto pojmu prodělal od starověkého Řecka, kde si lidé snad poprvé položili otázku z čeho se skládá hmota, snad největší proměny.

Z hlediska obsahu byl až donedávna pojem „elementární“ synonymem pro „nedělitelný“, řecky „*atómos*“, a proto bychom měli vlastně i dnešní „elementární částice“ částice nazývat atomy. Z výše uvedeného důvodu proměnnosti jeho obsahu to neděláme a „elementárními částicemi“ nazýváme i částice, o jejichž struktuře máme přesvědčivé experimentální svědectví.

Oheň, voda, vzduch a země, Empedoklovy „atomy“ předaly pomyslnou štafetu nedělitelnosti chemickým prvkům Mendělejevovy tabulky. Po objevu elektronu před 100 lety bylo jasné, že ani atomy nejsou těmi nejzákladnějšími částicemi hmoty a že i ony musí mít nějakou vnitřní strukturu. Ta byla objevena v roce 1911 Rutherfordem, jenž se svými spolupracovníky ukázal, že naprostá většina hmotnosti a elektrického náboje atomu je soustředěna v jeho **jádro**, které ovšem zaujímá jen nepatrnou část jeho objemu, kolem něhož „obíhají“ elektrony, podobně jako planety kolem slunce. Přívlastek „podobně“ je ovšem třeba chápat velmi volně, neboť ve světě atomů platí jiné zákony než na jaké jsme zvyklí z makrosvěta. Objev **neutronu** v roce 1932 vedl na představu, že atomové jádro je složeno z protonů a neutronů, a tím umožnil pochopit souvislost mezi atomovou vahou a atomovým číslem.

Přidáme-li k protonům, neutronům a elektronům ještě foton, máme před sebou „elementární“ částice počátku třicátých let. V roce 1932 pak došlo k objevu zásadní důležitosti: byla pozorována **antihmota**, konkrétně antielektron, tedy v dnešní terminologii *pozitron*. Objev pozitronu, jenž byl krátce předtím předpovězen Diracem v rámci jeho nové relativistické **kvantové teorie**, představuje jeden z nejdůležitějších objevů 20. století, jenž zcela zásadním způsobem ovlivnil celý další vývoj nejenom fyziky, ale také astrofyziky a kosmologie. Hypotéza existence antihmoty, jež byla od té doby nade vší pochybnost potvrzena, znamená, že na všech úrovních existuje v přírodě ke každé částici i jejich antičástice. Hovoříme-li dnes o elementárních částicích, máme tím proto obvykle na mysli i jejich antičástice.

Dalším důležitým milníkem na cestě k dnešnímu chápání struktury hmoty byl experimentální důkaz existence **neutrína**, velmi slabě interagující částice, jež byla již ve třicátých letech předpovězena Wolfgangem Pauli, ale která byla poprvé pozorována až v roce 1955. Neutrína, snad nejzáhadnější částice současnosti, patří mezi nejzávažnější kandidáty na tzv. temnou hmotu ve vesmíru a otázka zda jsou či nejsou nehmotná patří mezi nejdůležitější otevřené problémy současné fyziky.

Posledním zásadním krokem k dnešnímu pohledu na strukturu hmoty byla formulace hypotézy **kvarků**. Podle této hypotézy jsou protony, neutrony a řada dalších příbuzných částic (souhrnně nazývaných **hadrony**), jež byly objeveny v padesátých a šedesátých letech ve srážkách protonů na urychlovačích v Evropě a USA, složeny z ještě menších částic, zvaných **kvarky**. Tato hypotéza vycházela z obrovského množství experimentálních dat o

spektrech pozorovaných hadronů a jejich vlastností, jež v mnohém připomínala energetická spektra atomů a jader. Na rozdíl od atomů a jader se však nikdy, přes nesmírné experimentální úsilí, nepodařilo kvarky pozorovat jako volné, izolované částice, tak jako pozorujeme volné elektrony, protony a neutrony. Jinými slovy, proton, neutron a další hadrony nelze „ionizovat“. Tato překvapivá skutečnost zásadním způsobem změnila fyzikální i filosofický obsah pojmů jako jsou „elementární“, „složený“ a „struktura“. K dnešnímu chápání tohoto pozoruhodného jevu a jeho důsledkům se ještě vrátíme.

## **Kvantová povaha zákonů mikrosvětla**

Experimenty jež přispěly k objevům nových částic vedly také k formulaci zákonů, jimiž se řídí mikrosvět. Tyto zákony mají výrazně kvantovou povahu, která se projevuje mimo jiné tím, že v mikrosvětě probíhají procesy, jež nemají v klasické fyzice vůbec analogii. Snad nejdůležitějším výlučně kvantovým jevem, jenž hraje v mikrosvětě naprosto zásadní roli, je **kreace a anihilace** částice a antičástic z „čiré“ energie. Tento proces hrál rozhodující roli při vzniku vesmíru a v počátečním stadiu jeho vývoje a i v dnešní době je důležitý v procesech probíhajících ve hvězdách.

Druhým principem, na němž jsou zákony mikrosvětla postaveny, je speciální teorie relativity. Mikrosvět, resp. interakce elementárních částic a jejich rozpady, je laboratoří kde je tato teorii dennodenně ověřována do velkých podrobností. Princip ekvivalence hmotnosti a energie je přímo klíčem k pochopení přeměny identity částic při jejich srážkách.

Vedle těchto základních pilířů hrají v mikrosvětě velmi důležitou roli i různé symetrie, a to jak prostoročasové, tak tzv. **vnitřní symetrie**, související s různými vnitřními kvantovými čísly, jako je např. izospin, hypernáboj apod., jež charakterizují identitu částic. Zcela výjimečnou roli pak hrají tzv. **kalibrační symetrie**, které představují obecný výchozí princip při formulaci základních pohybových zákonů mikrosvětla.

## **Jak se díváme do mikrosvětla?**

Fyzika je v zásadě experimentální věda a proto vše, co víme o mikrosvětě, je výsledkem pokusů v nichž se pozorují rozpady částic a jejich srážky. Nezbytným „mikroskopem“ s nímž se do mikrosvětla díváme, jsou urychlovače, v praxi pak především urychlovače protonů a elektronů. Základní metoda studia struktury hmoty je přitom prostá a v podstatě stejná, jakou použil již Rutherford při svém objevu atomového jádra. Částici, která nás zajímá, srazíme s jinou, nejlépe takovou, již dobře známe, a z výsledků těchto srážek usuzujeme na to, zda zkoumaná částice je či není složená z ještě menších částíček a tedy zda má či nemá nějakou strukturu. Čím hlouběji se chceme do podívat do nitra částic, tím „tvrdší“ musí přitom být jejich srážka a tedy tím vyšší energii musí mít potřebný urychlovač. S rostoucí energií jdou ruku v ruce i větší rozměry, takže v současné době největší urychlovač elektronů na světě, nacházející se v **Evropském středisku fyziky částic CERN** u Ženevy má obvod zhruba 27 kilometrů a jeho tunel svými rozměry velmi připomíná tunel metra.

Při vysokoenergetických srážkách protonů, elektronů a dalších částic se často rodí i částice, které nikde jinde v dnešním vesmíru neexistují, ale které pravděpodobně hrály důležitou roli v počáteční fázi vývoje vesmíru. Čím hlouběji se díváme do nitra hmoty tím se v jistém smyslu díváme i dále do minulosti našeho vesmíru. Toto spojení mikrosvětla s makrosvětlem je jedním z nejpozoruhodnějších aspektů dnešní fyziky.

## Kvarky a leptony: atomy současnosti

Výsledkem experimentálního a teoretického úsilí posledních zhruba padesáti let je tzv. **Standardní model** mikrosvětla, v němž jsou základními stavební kameny hmoty následující dvě třídy částic se spinem 1/2

- **Kvarky:** existují v 6 druzích zvaných **vůně**, každá z nich dále ve třech různých **barvách**. Slova „vůně“ a „barva“ zde pochopitelně nemají běžný význam, ale pouze označují jisté vnitřní stupně volnosti. Jednotlivé vůně nesou více či méně poetické názvy: **u** (z anglického „up“), **d** („down“), **s** („strange“), **c** („charm“), **b** („bottom“) a **t** („top“). Téměř veškerá hmotnost dostupného vesmíru je složena z těchto kvarků a jejich antičástic, antikvarků. Tak například proton je vázaným stavem dvou kvarků *u* a jednoho kvarku *d*, zatímco neutron obráceně dvou kvarků *d* a jednoho kvarku *u* a podobně. Proton a neutron patří ke třídě částic, které se nazývají **baryony** a které spojuje právě skutečnost, že jsou složeny ze tří kvarků, resp. antikvarků u antibaryonů. Existují ovšem i částice, zvané **mezony**, které jsou vázanými stavy dvojice kvark a antikvark. Zdá se ovšem, že ve přírodě neexistují žádné částice, které by byly složeny ze jiných kombinací kvarků a antikvarků než právě tyto. Co je ovšem nejdůležitější a co bylo dlouho považováno za největší záhadu a nedostatek hypotézy kvarků, je skutečnost, že samy kvarky v přírodě neexistují jako volné, izolované objekty! Díky rozvoji teoretického bádání během posledních zhruba 25 let dnes tomuto pozoruhodné jevu rozumíme.
- **Leptony:** existují rovněž v šesti druzích, ale na rozdíl od kvarků nenesou žádnou barvu. Patří mezi ně všem dobře známý elektron, dvě jemu velmi podobné částice mion  $\mu$  a taunon  $\tau$  a dále tři jim odpovídající neutrina  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  a  $\nu_\tau$ .

Přesto, že se kvarky a leptony v řadě charakteristik, jako je hmotnost, elektrický náboj a schopnost vzájemně na sebe působit, výrazně liší, je jejich společná příslušnost k třídě částic se spinem 1/2 daleko podstatnější, neboť představuje východisko při budování tzv. **jednotné teorie všech sil**, snu snad všech teoretických fyziků Einsteinem počínaje.

Zmíněných 24 fundamentálních částic se spinem 1/2 se na základě příbuzných vlastností dělí do tří tzv. **generací** podle schématu, jež je moderním analogem periodické soustavy prvků.

	1. generace	2. generace	3. generace
Q= 2/3	$u_c \ u_m \ u_z$	$c_c \ c_m \ c_z$	$t_c \ t_m \ t_z$
Q= -1/3	$d_c \ d_m \ d_z$	$s_c \ s_m \ s_z$	$b_c \ b_m \ b_z$
Q= 0	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
Q= -1	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$

Částice v jednom řádku mají ve všech třech generacích stejný elektrický náboj Q, jehož hodnoty v jednotkách elektrického náboje pozitronu je uvedena v prvním sloupci. Na první pohled zarazí, že na rozdíl od leptonů není hodnota elektrického náboje kvarků celočíselná a to přesto, že elektrické náboje všech v přírodě pozorovaných částic celočíselné jsou. Tato skutečnost, stejně jako další vlastnosti kvarků, jsou ovšem přímým důsledkem vlastností pozorovaných baryonů a mezonů. Jinými slovy, abychom vysvětlili elektrické náboje a další vlastnosti pozorovaných částic, musí mít kvarky právě takové vlastnosti, jaké jsou uvedeny v naší tabulce. Všimněme si dále dvou skutečností

- Každá generace je tvořena jedním dubletem vůči kvarků  $((u,d), (c,s), (t,b))$  ve třech „barvách“ (označených dolním indexem) a jedním dubletem leptonů, přičemž rozdíl elektrických nábojů mezi horními a dolními elementy všech těchto dubletů je roven 1.
- Součet elektrických nábojů všech částic dané generace, (v případě kvarků se započtením jejich třech barevných stavů) je nula.

Obě tyto vlastnosti jsou projevy symetrie mezi kvarky a leptony uvnitř každé generace a představují jeden z klíčů k pochopení zákonů mikrosvětla.

Podobně jako u Mendělejevovi soustavy prvků je základní rysem i výše uvedené tabulky dnešních „elementárních“ její **periodičnost**, tj. skutečnost, že až na rozdíly v hmotnostech (které zde neuvádíme) není mezi jednotlivými generacemi naprosto žádný rozdíl! Důvod, proč v přírodě existují základní stavební kameny hmoty ve třech téměř identických vydáních představuje jednu z největších záhad současné fyziky. Připomeňme, že veškerá hmota na Zemi, živá i neživá, všechny planety i Slunce jsou složena výlučně z kvarků a leptonů první generace a že i ve vzdálenějším vesmíru se vyskytují částice druhé a třetí generace jen zcela výjimečně. Nebylo tomu ovšem tak vždy, neboť v počátcích vývoje vesmíru byly v kosmické „polívce“ zastoupeny všechny generace stejně. I když neznáme žádný důvod proč v přírodě existují právě tři generace, je pravda, že některé jemné, ale mimořádně důležité efekty vyžadují existenci aspoň tří generací. Jeden z nich, tzv. nezachování kombinované prostorové a nábojové invariance je přitom podle dnešní teorie vzniku vesmíru přímo zodpovědný za přebytek hmoty nad antihmotou a tím, i za existenci vesmíru v dnešní podobě.

## Co drží hmotu pohromadě?

Podle Standardního modelu je tedy veškerá hmota ve vesmíru složená z výše uvedených 24 fundamentálních částic a většina dokonce jen z jejich jedné třetiny. Obrovská rozmanitost struktur v přírodě je důsledkem **sil**, které mezi nimi působí. Ty jsou čtyři:

- **Gravitační**, jež působí mezi všemi částicemi, ale v mikrosvětě jsou zanedbatelné.
- **Elektromagnetické**, jež působí pouze mezi elektricky nabitými částicemi, což jsou v případě dnešních fundamentálních částic všechny kromě neutrin. Mají nekonečný dosah.
- **Slabé**, jež působí mezi všemi 24 fundamentálními kvarky a leptony, ale pouze na velmi malých vzdálenostech, nepřevyšujících zhruba tisícinu femtometru, tj.  $10^{-16}$  cm.
- **Silné**, jež působí pouze mezi kvarky. Jejich charakter se od elektromagnetických a slabých sil výrazně liší.

Podobně jako 24 fundamentálních kvarků a leptonů spojuje jejich spin, spojuje silné, slabé a elektromagnetické síly jejich společný „**výměnný**“ charakter. Znamená to, že působení všech těchto tří sil si lze představit jako „výměnu“ jiných částic, tzv. **intermediálních vektorových bosonů** (IVB). IVB jsou částice se spinem 1 a patří k nim

- **Foton**: zodpovědný za zprostředkování elektromagnetických sil. Je nehmotný a právě proto mají elektromagnetické síly „nekonečný“ dosah.
- **$W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$** : zodpovědné za zprostředkování slabých sil. Jsou velmi těžké, zhruba 90 krát těžší než proton a proto mají slabé síly krátký dosah.
- **8 gluonů**: zodpovědné za zprostředkování silné síly. Na malých vzdálenostech se chovají podobně jako nehmotné fotony, ale na velkých vzdálenostech má jimi zprostředkovaná síla zcela jiný charakter, podrobněji popsany níže.

Pro intuitivní pochopení charakteru zmíněných sil i rozdílů mezi jejich vlastnostmi je velmi vhodná analogie s přehazováním míče mezi dvěma loďkami plujícími na řece proti sobě. Hmotnost přehazovaného míče je analogií hmotnosti „vyměřovaného“ IVB a vzdálenost, kam jím dohodíme odpovídá dosahu sil. Čím lehčí míč, tím dále jím dohodíme a tím větší bude dosah sil. Budeme-li házet bumerang, můžeme tímto způsobem modelovat i přitažlivé síly. Podobně jako u kvarků a leptonů nehrají ani případě IVB roli jejich různé hmotnosti, ale skutečnost, že všechny mají spin 1. Právě tato skutečnost totiž umožňuje formulaci **jednotné teorie** všech typů sil.

Při hledání zákonů mikrosvětla hrála důležitou roli skutečnost, že zmíněné tři typy sil působí **hierarchicky**, tj. pro určitý okruh jevů je důležitá jen jedna síla.

## Úžasná jednoduchost

Elektromagnetické síly určují strukturu a většinu vlastností nejen atomů, ale také chemických sloučenin a tím vlastně všech látek s nimiž se setkáváme v každodenním životě. **Kvantová elektrodynamika**, kvantová teorie popisující elektromagnetické působení elektronů a fotonů v mikrosvětě, souhlasí s experimentálními daty s neuvěřitelnou platností relativních  $10^{-10}$  a je snad nejlépe prověřenou fyzikální teorií vůbec. Z hlediska základních zákonů není celá chemie (vyhneme-li se otázce původu a popisu živých organismů) nic jiného než aplikovaná kvantová elektrodynamika. Při většině výpočtů dokonce vystačíme s jednoduchým Coulombovým zákonem, doplněným případně o vzájemné působení magnetických momentů (orbitálních a vnitřních) a jedinými parametry na nichž závisí výsledky jsou hmotnosti elektronu a protonu a hodnota elektrického náboje elektronu. I tzv. Van der Waalovy síly mezi molekulami jsou jen přímým a v principu spočitatelným důsledkem základních rovnic kvantové elektrodynamiky. Na příkladu světa atomů a molekul názorně vidíme, že i velmi jednoduché základní zákony mohou vést na nesmírně komplikované a rozmanité struktury. Lze proto očekávat, že tedy i naopak složité struktury mohou být důsledkem jednoduchých základních **principů**.

Základním kvantitativním rysem elektromagnetických sil, vyjádřeným v Coulombově zákoně, je skutečnost, že při zadaných elektrických nábojích klesají síly mezi dvěma částicemi se čtvercem jejich vzdálenosti. Jinými slovy, čím dál jsou od sebe nabitě částice, tím slaběji na sebe působí, přičemž k jejich úplnému odtržení stačí konečná energie. Všimněme si také, že kvanta elektromagnetického pole, fotony, jsou samy o sobě elektricky neutrální a proto na sebe nemohou přímo působit.

## Silné až moc

Sestoupíme-li na žebříčku struktury ještě o patro níž o patro níže, setkáme se s novým typem sil: tzv. **jadernými silami**, jež působí mezi protony a neutrony a jsou zodpovědné za existenci jejich vázaných stavů, atomových jader. Pojen silné síly se ve fyzice objevil ve 30. letech po objevu neutronu jako součást hypotézy o proton-neutronové struktuře jader. Podobně jako Van der Waalovy síly mají i jaderné síly krátký dosah a stihl je i stejný osud: z dnešního pohledu jsou jen zbytkovými projevy fundamentálnější síly působící mezi kvarky. Tato síla, jež se v češtině trochu nešikovně nazývá **silná síla**, je zodpovědná za existenci a vlastnosti protonů, neutronů a dalších hadronů, které jsou jejich vázanými stavy.

Teorie, která silnou sílu kvantitativně popisuje byla formulována počátkem 70.let a nazývá se **kvantová chromodynamika**. Podobně jako elektromagnetické síly působí jen mezi elektricky nabitými částicemi, působí silné síly jen mezi barevnými částicemi. V řadě aspektů

se podobají elektromagnetickým silám, ale v jednom se zásadně liší: zprostředkující částice silných sil, již výše zmíněné **gluony**, jsou samy o sobě barevné a proto i na ně silná síla přímo působí! Tato skutečnost má několik zásadních důsledků, které nám umožňují pochopit, proč izolované kvarky v přírodě neexistují.

Naprostě zásadním způsobem se samointerakce gluonů projeví na charakteru závislosti síly mezi dvěma částicemi na jejich vzdálenosti: zatímco síla mezi elektricky nabitými částicemi s rostoucí vzdáleností klesá, mezi určitými konfiguracemi barevných částic naopak roste! Přesněji řečeno dokud je tato vzdálenost menší než zhruba 1 femtometr, klesá síla mezi dvěma barevnými objekty podobně jako v elektrodynamice, ale na větších vzdálenostech se tento pokles zastaví a síla je pak dále konstantní. Na velkých vzdálenostech se tak síla mezi dvěma barevnými objekty chová podobně jako síla mezi konci napínající se struny. Tato vlastnost je klíčem k pochopení „uvěznění“ kvarků, neboť s pomocí konečné energie pak zjevně nelze kvarky (například v protonu či pionu) od sebe oddělit. Tato vlastnost ovšem ještě nestačí k vysvětlení, proč v přírodě neexistují stavy odpovídající dvěma či obecně sudému počtu kvarkům a proč neexistují ani kvarky samotné. I to ovšem lze v rámci kvantové chromodynamiky pochopit, neboť výše popsany charakter sil mezi barevnými objekty platí jen v určitých barevných stavech, zatímco v jiných je charakter sil podobný jako mezi elektricky nabitými částicemi. Použijeme-li analogii s běžným významem slova „barva“ i pro ně, nazvali bychom tyto stavy **bezbarvé**. Jenom tyto stavy mohou podle kvantové chromodynamiky v přírodě existovat, neboť jen ony mají konečnou energii. Izolované kvarky, dikvarky a jiné barevné kombinace kvarků a antikvarků mají nekonečnou energii (hmotnost) a v přírodě proto samostatně existovat nemohou.

Za slovními formulacemi předchozího odstavce je schováno čtvrt století intenzivního teoretického výzkumu a množství rozsáhlých numerických výpočtů. I když ještě není vše, co jsem výše popsal, matematicky striktně dokázáno, jen málokdo pochybuje o tom, že kvarky a gluony jsou správnými pojmy pro popis mikrosvěta na vzdálenostech menších než asi 1 femtometr a že kvantová chromodynamika je v zásadě správnou teorií sil mezi nimi působících.

## Bez slabých to nejde

Na rozdíl od elektromagnetických a silných sil, jejichž role při výstavbě mikrosvěta je zřejmá a nezastupitelná, k čemu jsou v přírodě slabé síly? A co by se vlastně změnilo, kdybychom je „vypnuli“? Odpověď je jednoduchá slovy ale složitá obsahem: téměř vše! Přesněji řečeno, kdyby neexistovaly slabé síly vůbec, neexistoval by ani vesmír v té podobě jakou známe. Toto možná překvapující tvrzení se opírá o skutečnost, že v ranném stádiu vývoje vesmíru sehrály slabé díly naprostě zásadní roli při generaci tzv. baryonové asymetrie vesmíru.

Tato role paradoxně souvisí s tím, že slabé síly, na rozdíl od elektromagnetických a silných, narušují nejzákladnějších symetrii prostoročasu, již je invariance pohybových zákonů vůči změně toku času. Ta pak v rámci velmi obecných úvah souvisí s invariancí vůči záměně částic za antičástice, doprovázené současně prostorovým zrcadlení, tj. záměnou pojmů vpravo a vlevo. Narušení této tzv. **CP-invariance** bylo pozorováno poprvé v roce 1962 a byla za něj o 30 let později udělena Nobelova cena. Jedná se o velmi jemný efekt, jenž se navíc projevuje jen ve velmi speciálním typu rozpadu neutrálních mezonů  $K$ . Přesto právě tento jemný efekt je zodpovědný za skutečnost, že v dnešním vesmíru převažuje množství baryonů (tj. především protonů a neutronů) nad antibaryony. Přesněji řečeno nebyly pozorovány žádné příznaky toho, že se v některé části vesmíru nacházejí „ostrov“ antihmoty. Tato asymetrie současného vesmíru, bez níž by neexistovaly atomy a tedy ani život, vznikla z původně CP- symetrického

stavu vesmíru těsně po jeho vzniku právě jen díky tomu, že slabé síly narušují CP-invarianci. Tato vlastnost slabých sil by sice sama o sobě k vytvoření dnešního přebytku hmoty nad antihmotou nestačila, byla ovšem zcela nezbytným předpokladem. Druhou klíčovou součástí mechanismu generace přebytku hmoty na antihmotou je předpoklad, že v určité etapě neprobíhal vývoj vesmíru ve stádiu termodynamické rovnováhy.

Kromě této zásadní role slabé síly ovlivnily také množství deuteria, hélia a dalších lehkých prvků, jejichž syntéza proběhla při „chladnutí“ prvotní vesmírné polévky v počátečním stádiu vývoje vesmíru, ještě předtím, než vznikly hvězdy.

## Odkud se bere hmotnost?

Hmotnost je jednou ze základních charakteristik všech částic a proto je pochopitelné, že si fyzikové kladou otázku odkud hmotnost „pochází“, tj. proč mají kvarky a leptony takové hmotnosti, jaké mají a ne jiné. Ještě důležitější však je otázka, proč je foton nehmotný, zatímco intermediální vektorové bosony  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z$  jsou hmotné a dokonce relativně velmi těžké. Důležitost pochopení tohoto rozdílu vyplývá z toho, že hmotnosti fotonu,  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z$  určují dosah sil, které „zprostředkují“. Pochopíme-li rozdíl jejich hmotností, je naděje, že také pochopíme proč se elektromagnetické a slabé síly na první pohled tak výrazně liší.

Teoretická myšlenka, která se ukázala jako klíč k řešení této otázky se nazývá **spontánní narušení symetrie** a je spojena především se jménem britského teoretika P. Higgse, po němž je pojmenována i částice, tzv. **Higgsův boson**, která hraje v realizaci této myšlenky zásadní roli. Zhruba řečeno foton a intermediální vektorové bosony  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  mají různé hmotnosti proto, že se na Higgsův boson různě silně váží. Teorie využívající tuto hypotézu bohužel nedává pro hmotnost Higgsova bosonu žádnou přesnější předpověď, neboť samotný mechanismus generace hmotností kvarků, leptonů a intermediální vektorové bosonů na konkrétní hodnotě hmotnosti Higgsova bosonu nezáleží. Skutečnost, že tato částice dosud nebyla pozorována znamená, že pokud existuje, musí být velmi těžká, podle posledních experimentů nejméně asi 100 krát těžší než proton. Hledání Higgsova bosonu je bezpochyby nejaktuálnějším úkolem fyziky elementárních částic současnosti.

## Jak se „pozorují“ kvarky?

Jestliže kvarky v přírodě neexistují jako volné, izolované objekty, jaký význam má tvrzení, že „existují“ aspoň uvězněny v hadronech? Jak je můžeme v dnešní „periodické tabulce prvků“ dávat na stejnou úroveň s leptony, které jako samostatné objekty v přírodě existují? Nejsou vlastně kvarky jen matematické objekty, jakési mnemotechnická pomůcky, které nám slouží k názornému vysvětlení spektra a vlastností pozorovaných částic? Odpověď na tyto otázky není jednoduchá, neboť přesahuje rámec přírodních věd a dotýká se základních filosofických kategorií. Přesto by dnes naprostá většina fyziků na poslední otázku odpověděla záporně. Ne ovšem filosofické úvahy, ale experimentální evidence nashromážděná během posledních asi 10 let nás přesvědčila, že kvarky jsou mnohem více než jen matematické pojmy a že i kvarky lze v jistém smyslu „vidět“, přesněji řečeno, že lze vidět „stopu“, kterou po sobě kvarky zanechávají, když se je snažíme z hadronů „vyrazit“.

Tato stopa se v angličtině nazývá **jet** a protože pro tento pojem dosud není v češtině vhodný překlad, používá se i v ní. V experimentu se jetem rozumí skupina částic letících ve velmi malém prostorovém úhlu, která silně připomíná spršky v kosmickém záření. Jety jsou v moderních detektorech vidět velice zřetelně a podobně jako u jednotlivých částic je snadné změřit jejich úhly a energie. Z hlediska teorie, tedy kvantové chromodynamiky, je

rozhodující, že směry a energii jetů bezprostředně a úzce souvisí s dynamikou kvarků a že tedy z měření jetů můžeme usuzovat o vlastnostech kvarků a silách mezi nimi působících. Právě tímto způsobem bylo experimentálně prokázáno, že kvantová chromodynamiky je správnou teorií silných sil.

## Mají i kvarky strukturu?

Vzhledem k tomu, že kvarky jako samostatné objekty v přírodě neexistují, může se tato otázka zdát nesmyslnou. Přesto tomu tak není a možnost, že by se i kvarky „skládaly“ z ještě elementárnějších objektů představuje jeden ze dvou základních směrů dalšího možného vývoje představ o struktuře hmoty a je předmětem seriózního experimentálního výzkumu. Žádné experimentální svědectví pro substrukturu kvarků však dosud nalezeno nebylo.

Druhou a podle řady významných teoretiků pravděpodobnější možností je, že kvarky sice nejsou základní úrovní struktury, ale že při přechodu na skutečně fundamentální úroveň narazíme na objekty nejenom menší, ale principálně naprosto jiné. Jde o to, že pojem částice vychází z **prostorového bodu, resp.** jemu odpovídající **světočáry** jako základních pojmů. Kvantová mechanika i standardní kvantová teorie pole jsou vybudovány na těchto pojmech. Je ovšem možné, že základním pojmem vhodným pro popis mikrosvěta na nejnižší úrovni není jednorozměrná světočára, ale dvourozměrná tzv. **svět plocha**, popisující pohyb jednorozměrné **struny** prostorem. Výzkum v tomto směru prošel v posledních letech obrovským rozmachem, který motivoval mimo jiné i rozvoj některých oborů matematiky.

## Na cestě k teorii všeho?

Teorii strun považuje řada předních teoretiků za nejvážnějšího kandidáta na „teorii všeho“. Má ovšem zatím vážný nedostatek: neexistuje pro ní naprosto žádné experimentální svědectví. Není ani divu, neboť rozměr struny která v těchto teoriích vystupuje je ve srovnání s rozměry do nichž dnes „vidíme“ prostřednictvím nejmohutnějších urychlovačů zhruba biliónkrát (tj.  $10^{12}$  krát) menší!

Existují ovšem i méně ambiciózní, o to však experimentálně podloženější pokusy sjednotit elektromagnetické, slabé a silné síly do jedné **jednotné teorie pole (JTP)** a uskutečnit tak sen celých generací teoretických fyziků. Gravitace součástí těchto jednotných teorií obvykle není neboť se týká a ovlivňuje vlastnosti samotného prostoročasu, který je pro ostatní síly jen „hrací plochou“.

Zahrnout gravitaci je obtížnější i z toho důvodu, že nesdílí s elektromagnetickými, slabými a silnými silami základní vlastnost, na níž je jejich sjednocení postaveno. Tou vlastností je skutečnost, že ve všech těchto teoriích jsou síly „zprostředkovány“ výměnou částice se spinem 1. Toto a nikoliv značné rozdíly mezi hmotnostmi fotonu a intermediálních vektorových bosonů  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  a komplikace související s uvězněním kvarků silnými silami, je pro sjednocení všech tří sil rozhodující! Elektromagnetické a slabé síly již téměř tři desetiletí žijí částečně sjednoceny v teorii elektroslabých sil Glashowa, Weinberga a Salama, kteří za jeho formulaci získali v roce 1979 Nobelovu cenu.

Podstatou sjednocení těchto sil je myšlenka, že přes obrovské rozdíly mezi vlastnostmi elektromagnetických, slabých a silných sil na vzdálenostech, kde provádíme experimenty, jsou na **malých** vzdálenostech, řekněme desettisíckrát menších než je rozměr protonu, tyto síly velmi podobné. Kdybychom žili na tak malých rozměrech, zjistili bychom, že procesy vyvolané elektromagnetickými, slabými s silnými silami probíhají se (zhruba) stejnou pravděpodobností a že nám nevadí ani uvěznění kvarků, neboť jsme hluboko uvnitř vězení.



I když existuje řada kandidátů na jednotnou teorii pole, které se liší v řadě konkrétních bodů, všechny vycházejí ze základního předpokladu, že kvarky a leptony jsou různé stavy jedné částice, podobně jako proton a neutron považujeme přes rozdílnost jejich elektrických nábojů za dva stavy tzv. nukleonu. Tento společný základ má také jeden společný, mimořádně důležitý důsledek: **proton není stabilní**, jak se tvrdí ve všech standardních učebnicích, ale měl by se rozpadat na leptony a mezony s poločasem rozpadu někde v oblasti  $10^{32} - 10^{35}$  let! Tato předpověď je nejen zásadně nová, ale také již dnes experimentálně ověřitelná. Z experimentů provedených během posledních 20 let plyne dnešní dolní hranice na dobu života protonu zhruba  $10^{33}$  let. V současnosti probíhá několik experimentů, které mají zvýšit citlivost až o řád a mají tedy naděli rozpad protonu pozorovat. Kladný výsledek by byl jasným signálem, že jednotné teorie jsou založeny na zdravém základě.

### Co přinese budoucnost?

Fyzika elementárních částic se dnes nachází ve stádiu netrpělivého očekávání. Existuje velmi dobře a dopodrobna rozpracovaná teorie tří základních sil a existují i návrhy jak tyto teorii sjednocovat a dále rozvíjet. Pro potvrzení správnosti základní myšlenky tohoto sjednocení však ještě chybí objevit Higgsův boson a některé další částice, které se v různých jednotných teoriích vyskytují. Další vývoj ovšem bez nových experimentálních informací není možný.

Na řadu dnes otevřených problémů dají pravděpodobně odpověď experimenty na urychlovači LHC, který se v současné době buduje v Evropském středisku fyziky částic u Ženevy a který by měl být uveden do provozu koncem roku 2004. Kromě toho se pracuje na několika dalších projektech velkých urychlovačů, jako jsou lineární urychlovače elektronů a pozitronů, či kruhový urychlovač mionů. Za 10 let budeme jistě o mnoho moudřejší.