

## OBSAH

Obsah .....	1
Vážení čtenáři! .....	3
<b>Hořejší: Historie standardního modelu mikrověta .....</b>	<b>4</b>
Rané období fyziky elementárních částic .....	4
Začátek moderní éry – mion a pion .....	8
Podivné částice .....	11
Eightfold way .....	14
Kvarky a leptony v šedesátých letech .....	18
Kvantová elektrodynamika a Feynmanovy diagramy .....	21
Slabá interakce .....	25
Elektroslabé sjednocení .....	32
Půvabný kvark .....	37
Triumf standardního modelu elektroslabých interakcí .....	39
Silná interakce .....	48
Epilog .....	54
Jmenný rejstřík .....	56
Věcný rejstřík .....	57
Poděkování .....	60
Literatura .....	60
<b>Arons: Cesta k přírodnovědné gramotnosti .....</b>	<b>61</b>
Úvod .....	61
Ilustrace vědeckého způsobu myšlení .....	66
Ilustrace souvislosti vědy s intelektuální historií lidstva .....	70
Výběr témat .....	71
Problémy realizace .....	72
Otázka rozvoje poznání .....	73
Výchova učitelů .....	74
Úloha počítací .....	76
Poučení ze zkušeností .....	77
Literatura .....	79

*číslo*

**3**

**VII.**

*ročník*

**2001**

# ŠKOLSKÁ FYZIKA

**Ročník VII.**

**2001**

Praktický časopis pro výuku fyziky a práci s talentovanými žáky na základních a středních školách

**Vydává:** Katedra obecné fyziky Pedagogické fakulty Západočeské univerzity v Plzni ve spolupráci s ústředním výborem FO, katedrou obecné fyziky Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně, katedrou didaktiky fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze, katedrou fyziky Pedagogické fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích, dalšími fakultami připravujícími učitele fyziky a Českou nukleární společností pod patronací Jednoty českých matematiků a fyziků

**Šéfredaktor:** Václav Havel (email: havelv@kof.zcu.cz)

**Výkonný redaktor:** Miroslav Randa (email: randam@kof.zcu.cz)

**Sekretářka redakce:** Jitka Štychová

**Redakční rada:** Jan Bečvář, Václav Bláha, Josef Blažek, Zdeněk Bochníček, Ivo Čáp, Jiří Erhart, Gerhard Höfer, Jan Hrdý, František Kamenčák, Josef Kepka, Zdeněk Kluiber, Daniel Kluvanec, Václav Kohout, Jana Krsková, Soňa Křížková, Václav Křivohlávý, Vítězslav Kubín, Vladislav Kvapil, Aleš Lacina, Dušan Novotný, Jan Novotný, Jitka Prokšová, Karel Rauner, Milan Rojko, Jan Slavík, Václav Soukup, František Špulák, Rudolf Šup, Josef Trneček, Václav Turek, Josef Veselý, Ivo Volf.

**Adresa redakce:** Školská fyzika, KOF PeF ZČU, Klatovská 51, 313 00 Plzeň,  
tel. 019/7423776, linky 351 nebo 314

**Vychází:** čtyřikrát ročně ve verzi pro ZŠ, verzi pro SŠ a společné verzi pro ZŠ+SŠ

<b>Předplatné:</b>	<b>verze ZŠ</b>	<b>200 Kč ročně (4 čísla po 50,00 Kč)</b>
	<b>verze SŠ</b>	<b>200 Kč ročně (4 čísla po 50,00 Kč)</b>
	<b>verze ZŠ+SŠ</b>	<b>250 Kč ročně (4 čísla po 62,50 Kč)</b>
	<b>studentská sleva verze ZŠ+SŠ</b>	<b>150 Kč ročně (4 čísla po 37,50 Kč)</b>

**Objednávky přijímá:** Jitka Štychová, katedra obecné fyziky FPE ZČU, Klatovská 51,  
313 00 Plzeň

**URL (Internet):** [http://www.pef.zcu.cz/pef/kof/sk\\_fy/](http://www.pef.zcu.cz/pef/kof/sk_fy/)

**ISSN 1211-1511**

**Toto číslo vzniklo 12. 11. 2001**

## Vážení čtenáři,

číslo časopisu *Školská fyzika*, které právě otevíráte, se již na první pohled výrazně liší od všech jeho předcházejících osmadvaceti sešitů. Každý z nich byl totiž souborem nejvýše několikastránkových sdělení věnovaných dílčím fyzikálním, fyzikálně-historickým či fyzikálně-didaktickým tématům, případně doplněným informacemi o fyzikálních soutěžích, odborné literatuře apod. Číslo, jež nyní držíte v ruce, naproti tomu obsahuje jenom dva značně rozsáhlé, sice víceméně monottenhamické články, které však pokrývají vždy velmi širokou oblast. Jeho vydání ovšem v žádném případě neznamená definitivní odklon od zavedeného tradičního členění časopisu, ani nějaký zásadní přelom v redakční politice tohoto periodika. Základním krédem a ctižádostí redakce *Školské fyziky* totiž je, a také do budoucna trvale bude, přinášet jejím čtenářům – především učitelům fyziky na základních a středních školách – inspirativní příspěvky co nejvyšší kvality, zajímavosti a samozřejmě i bezprostřední praktické užitečnosti pro jejich práci. A právě tyto nejpodstatnější požadavky obě nezvykle dlouhá pojednání, podle názoru redakce, vrchovatou měrou splňují.

Fyzika elementárních částic, jejímž dosavadním vrcholem je tzv. standardní model mikrověta, je jednou z nejbohatších se rozvíjejících částí současné fyziky. A přestože objevy na tomto poli zcela přirozeně vzbuzují obecný zájem, jejich vysvětlení nespecialistům je nadmíru obtížné. Hlavní důvod spočívá v neobvyčejně technické, matematické i pojmové náročnosti tohoto živého, velice rozsáhlého oboru. Odborníci, navykli na vysoko specializovanou vzájemnou komunikaci, nebývají většinou ochotni (a mnohdy ani schopní) informovat o předmětu své práce méně kompetentní přemýšlivé zájemce způsobem, který by pro ně byl stravitelný. Na druhé straně však poznatky této značně exkluzivní disciplíny může kvalifikovaně tlumočit autor, jenž se o nich sám dozvídá jen z druhé ruky. V důsledku toho jsou nejen představy běžného vzdělánce o fyzice částic, ale začasté rovněž příslušné učebnické formulace (o encyklopédických, populárních či dokonce magazínových pramenech ani nemluvě) jen fragmentární a zpravidla velmi zkreslené. Redakci *Školské fyziky* se podařilo získat srovhaně erudované, pečlivé, přehledné shrnutí dosavadní historie, dnešního stavu a očekávaných perspektiv fyziky částic, které je přitom napsáno s nevšední vstřícností ke čtenáři, u něhož se předpokládá jen solidní základní fyzikální rozhled. Poněvadž jde o zcela mimofádný text, jenž nemá v české literatuře obdobky, neváhala mu také věnovat zcela mimofádné místo na stránkách tohoto časopisu.

Druhým avizovaným příspěvkem je již téměř dvacet let stará, stále však aktuální – a v současných českých poměrech nepochyběně čím dál potřebnejší – obecná úvaha o základních otázkách přírodovědného vzdělávání. V našem prostředí, tolik náchyněm na nekritické přebírání a následné nekompromisní prosazování cizích vzorů – jednou odtud, podruhé odjinud – je snad užitečné upozornit na to, že i v momentálně adorovaném západním světě existují také jiné názory na problematiku vzdělávání než u nás dnes hlučně nastolované podproblemy *společenské objednávky, standardizace, nových vyučovacích cílů pro nové tisíciletí* nebo *pokročilých didaktických technologií*. Není jistě žádným zvláštním objevem, že nejsázá se kopírují věci povrchní, nejméně pracné, ale také nejméně hodnotné a že při takovém přístupu, pro nějž jsou typické neustálé reformy všeho, co ve školství vůbec existuje, lze snadno více pokazit než napravit.

Sestavovatel tohoto výjimečného čísla je chápou i jako určitý pokus. Pokus, jehož smyslem je jednak nabídnout čtenářské obci *Školské fyziky* obsáhlejší stupeň zpracovávající důkladně, přehledně a srozumitelně širší obecně zajímavou nejvýš současnou fyzikální problematiku, jednak jí předložit k zamýšlení a k eventuální diskusi neběžný pečlivě zformulovaný názor na trvale aktuální téma způsobu fyzikálního vzdělávání či přírodovědného vzdělávání vůbec. Případné zopakování podobného redakčního počinu, který by snad bylo možno, vzhledem k datu vydání, označit za vánoční, bude záviset na vaši – tedy čtenářské – odezvě.

V Plzni a Brně 8. 11. 2001

redakce časopisu  
*Školská fyzika*

## Historie standardního modelu mikrosvěta

Jiří Hořejší, Ústav čárticové a jaderné fyziky MFF UK, Praha

### RANÉ OBDOBÍ FYZIKY ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC



J. J. Thomson  
1856–1940

Za počátek historie fyziky částic v dnešním slova smyslu lze považovat objev elektronu (Joseph J. Thomson, 1897), který podstatně změnil starou (poněkud vágní) představu o atomech jako nedělitelných stavebních kamenech hmoty. Za skutečně elementární částici se tak na přelomu 19. a 20. století začal považovat elektron a libovolný elektricky neutrální atom nebo nabité iont bylo možno si představit jako složený systém konečného počtu záporně nabitéch elektronů pohybujících se v silovém poli buzeném kladným nábojem. Velikost náboje elektronu byla přitom přirozeně nazvána elementárním nábojem. Záhy bylo také zřejmé, že elektrony nesou jen velmi malou část hmotnosti atomu, neboť například nejjednoduší (jednoelektronový) atom – atom vodíku – je o tři růží těžší než elektron. Sám Thomson původně předpokládal, že kladný náboj je v atomu rozložen v celém jeho objemu (tj. že elektrony jsou v oblaku kladného náboje umístěny jako „rozinky v pudingu“). Tato modelová představa

byla podstatně korigována zhruba o deset let později fundamentálním objevem atomového jádra (Ernest Rutherford, 1911), kdy se ukázalo, že kladný náboj je v atomu ve skutečnosti lokalizován ve velmi malé oblasti (jádru) s rozměrem zhruba o pět řádů menším, než je rozměr celého atomu (pro poměr těchto veličin se tedy nabízí oblíbené srovnání poloměru Země se vzdáleností Měsíce od Země). Připomeňme v této souvislosti, že poloměr atomu je typicky  $10^{-10}$  m, zatímco poloměr jádra je zhruba  $10^{-15}$  m. V katalogu elementárních částic své doby tak zaujal místo také proton (jakožto jádro atomu vodíku) – částice nesoucí kladný elementární náboj, avšak 1836krát těžší než elektron.



Ernest Rutherford  
1871–1937

Bouřlivý rozvoj atomistiky na konci vedl k revoluční změně celého pojmového rámce fyziky. V letech 1924–1927 byla formulována kvantová teorie, která na základě řešení fundamentální Schrödingerovy rovnice přirozeně objasnila celou řadu v té době známých poloempirických zákonitostí atomové spektroskopie, umožnila vysvětlit některé další klasicky nepochopitelné efekty a kromě toho přinesla nové předpovědi, jež byly postupně experimentálně ověřovány. V neposlední řadě kvantová mechanika jednoduše vysvětila také velikost atomu: typický atomový rozměr řádově od-

povídá Bohrovu poloměru  $a = \frac{\hbar^2}{m \cdot e^2}$ , kde  $\hbar$  je redukovaná



Niels Bohr  
1885–1962

\* horejsi@ipnp.troja.mff.cuni.cz

Planckova konstanta,  $m$  je hmotnost elektronu a  $\tilde{e}^2 = \frac{e^2}{4\pi \cdot \epsilon_0}$ , přičemž  $e$  značí elementární

náboj a  $\epsilon_0$  je permitivita vakua<sup>1</sup> (veličina  $a$  nese svůj název z historických důvodů, neboť Niels Bohr uhodl tuto kombinaci fundamentálních konstant – na základě čistě rozměrových argumentů – ještě před vznikem kvantově-mechanické teorie atomu). Díky svým úspěšným aplikacím v atomové a molekulární fyzice se tak kvantová teorie stala – spolu s Einsteinovou teorií relativity – jedním ze dvou základních pilířů moderní fyziky 20. století.

Než postoupíme dále, připomeňme ještě jeden dobré známý fakt, k němuž se budeme v tomto článku opakovat vracet. Z kvantové teorie plyne, že částice v mikrosvětě se dělí do dvou hlavních skupin podle velikosti spinu (což je „vnitní moment hybnosti“ – tj. moment hybnosti, který částice má, i když nevykonává žádný orbitální prostorový pohyb). Tato veličina může být jen celočíselným nebo polocelým násobkem  $\hbar$  (kvantování momentu hybnosti poprvé obecně dokázali Max Born, Werner Heisenberg a Pascual Jordan v roce 1926) a částice s celočíselným, resp. polocelým spinem se nazývají **bosony**, resp. **fermiony**; názvy souvisí se jmény dalších dvou vynikajících fyziků – jedním byl Satyendra Bose a druhým Enrico Fermi<sup>2</sup>. Pokud jde o částice známé už v počátcích rozvoje kvantové teorie atomu, vyjasnilo se celkem brzy, že elektron i proton jsou fermiony a oba mají spin 1/2, zatímco např. jádro atому hélia  ${}^4\text{He}$  (tzv. částice alfa) je boson a má spin 0.

Nazvzdory pokroku v atomové fyzice (která se postupně etablovala jako samostatná obsáhlá disciplína) zůstávala struktura atomového jádra poměrně dlouho nejasná. Rutherford sice již okolo roku 1920 navrhl – pro vysvětlení existence různých izotopů téhož chemického prvku –, že by mohl existovat **neutron** jako elektricky neutrální partner protonu, ale až do jeho přímého experimentálního objevu v roce 1932 se udržovala spíše představa jádra složeného z protonů a elektronů ( jádro s hmotnostním číslem  $A$  a atomovým číslem  $Z$  bylo podle tohoto modelu složeno z  $A$  protonů a  $A-Z$  elektronů). Stojí snad za zmínu, že nezávisle na pozdější přímé identifikaci neutronu byl elektron-protonový model atomového jádra vyvrácen mj. proto, že předpovídal nesprávnou hodnotu spinu jádra dusíku  ${}^{14}\text{N}$ . Na základě měření rotačního spektra molekulárního iontu  $\text{N}_2^+$  bylo totiž možno určit, že jádro  ${}^{14}\text{N}$  má spin 1 (a je tedy bosonem). Pokud by však obsahovalo 14 protonů a 7 elektronů, skládalo by se z lichého celkového počtu fermionů a muselo by pak mít polocelý spin. Naproti tomu, obsahuje-li toto jádro 7 protonů a 7 neutronů (a předpokládáme-li přitom, že neutron má rovněž spin 1/2), musí být nutně bosonem. Zmíněná epizoda je z dnešního hlediska spíše historickou kuriozitou, ale dává cenné poučení o tom, že řadu fyzikálních skutečností považovaných dnes za téměř samozřejmé bylo kdysi třeba dokazovat velmi netriviálními argumenty.



James Chadwick  
1891–1974

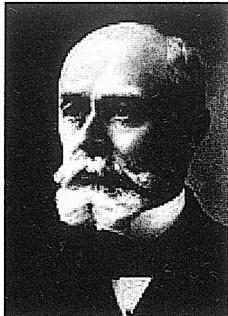
<sup>1</sup> Užíváme zde soustavy jednotek SI, v níž  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $m = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  a  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ . V dalším textu udáváme klidové hmotnosti častic pomocí odpovídajících klidových energií na základě Einsteinova vztahu  $E = m \cdot c^2$ , kde  $c$  je rychlosť světla,  $c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; vhodnou jednotkou energie je přitom elektronvolt ( $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ). Tak např. klidová energie elektronu čini přibližně 0,51 MeV, klidová energie protonu je asi 938,27 MeV (tj. zhruba 1 GeV) apod.

<sup>2</sup> Bosony a fermiony se podstatně liší svým chováním v mnohočásticových systémech: zatímco dva identické fermiony nemohou být ve stejném kvantovém stavu („Fermi-Diracova statistika“), identických bosonů může být ve stejném stavu libovolně mnoho („Bose-Einsteinova statistika“). Uvedená souvislost spinu a statistiky je jedním z hlubokých obecných výsledků relativistické kvantové teorie a je skvěle potvrzena experimentálními daty.

Neutron byl nakonec objeven jako produkt jaderné reakce, v níž při bombardování berylia  $^9\text{Be}$  částicemi alfa vzniká jádro uhlíku  $^{12}\text{C}$  a „pronikavé záření“.

Tuto reakci studovali poprvé Walter Bothe a Herbert Becker a po nich Irène Curie a Frédéric Joliot, ale teprve James Chadwick v roce 1932 prokázal, že se přitom skutečně produkuje „neutrální varianta protonu“ (za svůj objev získal Nobelovu cenu v roce 1935). Moderní obraz atomu tak byl na světě.

Objev neutronu také vedl k hlubšemu pochopení jevu **beta-rozpadu**, tj. spontánní emise elektronu z atomového jádra. Tento efekt pozoroval poprvé – šťastnou náhodou – již Henri Becquerel v roce 1896 při svém systematickém studiu luminiscence. To, že „Becquerelovo záření“ jsou skutečně elektrony, odhalili o několik let později Marie a Pierre Curieovi a spolu s Becquerelem získali za objev přirozené radioaktivnosti Nobelovu cenu v roce 1903. V rámci moderní teorie atomového jádra se pak nabízelo jednoduché vysvětlení tohoto pozoruhodného jevu: původcem beta-radioaktivity je rozpad neutronu na proton a elektron (rozdíl mezi klidovou energií neutronu a protonu činí zhruba



Henri Becquerel  
1852–1908



Pierre Curie  
1859–1906



Marie Curie  
1867–1934

1,3 MeV a je tedy dostatečně velký na to, aby takový rozpad byl kinematicky možný – jak už jsme uvedli, klidová energie elektronu je totiž jen asi 0,5 MeV). Podrobnější zkoumání beta-rozpadu však odhalilo zdánlivý paradox. Spektrum energií produkovaných elektronů je totiž spojité, což vede k flagrantnímu rozporu s představou, že se jedná o dvoučásticový rozpad (v takovém případě by elektron měl vždy jen jednu možnou energii, striktně určenou obvyklými zákony zachování). Na záchrana zákona zachování energie proto Wolfgang Pauli postuloval existenci nové částice, kte-

rá při beta-rozpadu vzniká spolu s protonem a elektronem. Takova částice musí zjevně být elektricky neutrální a z jednoduchých kinematických výpočtů bylo celkem brzy jasné, že je také velmi lehká – mnohem lehčí než elektron. Enrico Fermi ji proto následně nazval **neutrino**. Neutrinová hypotéza se během třicátých let úspěšně ujala, ačkoli k první přímé detekci této záhadné částice došlo až mnohem později, v polovině padesátých let. Je třeba zdůraznit, že proces beta-rozpadu a s ním spojené neutrino nakonec sehrály klíčovou roli v rozvoji fyzikálních představ o povaze sil působících v mikrosvětě; o tomto tématu podrobně pojednáme později.

Rozvoj kvantové teorie přinesl na konci dvacátých let ještě jeden pozoruhodnou předpověď, jež významně doplnila obraz světa elementárních čistic. V roce 1928 formuloval Paul Dirac svou proslulou rovnici, která v sobě zahrnuje principy kvantové mechaniky i speciální teorie relativity a automaticky z ní plyne popis spinu elektronu (velmi přirozeně dává rovněž správnou hodnotu



Wolfgang Pauli  
1900–1958



Paul Dirac  
1902–1984

jeho vlastního magnetického momentu a objasňuje některé jemné detaily atomových spekter, které jednoduchá nerelativistická Schrödingerova rovnice nepostihuje). Diracova rovnice však zároveň vede k určitým koncepcioním těžkostem, neboť připouští také řešení s libovolně velkou negativní energií. Taková řešení lze sice v některých situacích prakticky ignorovat, ale zcela zbavit se jich nelze; obecně vzato, jejich možná existence přirozeně vyvolá pochybnosti o stabilitě hmoty (Diracův elektron by se mohl „propadnout“ na libovolně hlubokou hladinu). Jako východisko z tohoto problému Dirac navrhl postulovat, že základní stav vesmíru (vakuum) odpovídá úplně zaplněnému „moři“ stavů s negativní energií. Excitace fyzikálního elektronu do nějakého stavu s kladnou energií pak ovšem také odpovídá vzniku „dýry“, která má vůči původnímu vakuovému stavu

kladnou energii a kladný náboj. Tato „dira v Diracově moři“ by se tedy měla efektivně projevit jako fyzikální částice se stejnou hmotností jako elektron, ale s opačným nábojem! Tak se zrodila jedna z nejslavnějších předpovědí fyziky mikrosvěta – předpověď antičastic. Pro antičástici elektronu se poměrně brzy ustálil název pozitron a v roce 1932 jej poprvé pozoroval Carl Anderson v kosmickém záření (Anderson dostal za tento objev Nobelovu cenu v roce 1936). Je nutno poznамenat, že původní Diracova argumentace – ač vedla ke správné předpovědi – byla o něco později překonána důslednější verzí relativistické kvantové teorie. Tou je **kvantová teorie pole**, která nejen že předpověď antičastic dále zobecnila a dala jí solidnější základ, ale celkově se stala fundamentálním teoretickým nástrojem fyziky mikrosvěta.

Shrneme-li tedy stručně ranou historii fyziky častic (kterou by také bylo možno nazvat prehistorií dnešního standardního modelu), lze říci, že v polovině třicátých let 20. století se za elementární částice považovaly elektron, proton a neutron, z nichž lze vybudovat okolní svět – atomy, molekuly, atd. Fyzikové již v té době nepochyběně brali vážně také neutrino, které hraje důležitou roli v některých jaderných reakcích. Kromě toho, široce respektovanou částicí byl již přinejmenším od dvacátých let rovněž foton, jako kvantum energie elektromagnetického záření („světelné kvantum“). Připomeňme, že tato částice hrála podstatnou roli už při objasnění zákonitosti fotoelektrického jevu (Albert Einstein, 1905) a později při popisu tzv. Comptonova jevu v rozptýlu tvrdého elektromagnetického (např. rentgenovského) záření na elektronech (Arthur Compton, 1922); samotný termín foton se však začal používat až po roce 1926 (zavedl jej chemik Gilbert Lewis). Kromě toho, každá z častic měla mít svou antičástici; tak např. kromě již zmíněného pozitronu se všeobecně věřilo v existenci antiprotonu – záporně nabitého dvojnáku protona.

Na závěr této rekapitulace je třeba ještě dodat, že během tříctáých let se rovněž vytvořila představa o čtyřech typech fundamentálních sil působících mezi částicemi, nebo, obecněji řečeno, o typech jejich interakcí. Kromě elektromagnetických a gravitačních sil, dobře známých už z klasické fyziky, se na scéně objevila **silná jaderná interakce**, která drží pohromadě



**Carl Anderson  
1905–1991**



# Arthur Compton 1892–1962

dě nukleony (tj. protony a neutrony) v atomových jádřech a nakonec také „slabá jaderná síla“ nebo prostě slabá interakce, jež způsobuje radioaktivní beta-rozpad a vůbec reakce s účastí neutrina. V kvantové teorii elektromagnetismu (kvantové elektrodynamice) formulované už na konci dvacátých let má foton – jakožto kvantum elektromagnetického silového pole – roli „prostředníka“ nebo „nositele“ interakce nabitych častic (často se užívá populární rčení, že interakce nabitych častic je způsobena „výměnou fotonu“). Analogická představa dnes platí i pro jiné typy interakcí (které jsou ovšem zprostředkovány jinými nositeli). O interakcích elementárních častic a o vývoji relevantních teoretických představ podrobnejše pojednáme později.

### ZAČÁTEK MODERNÍ ÉRY – MION A PION

Idylický obraz mikrosvěta, v němž bychom vystačili s tak malým počtem základních častic, však neměl dlouhého trvání. V roce 1937 pozorovali Carl Anderson a Seth Neddermayer v kosmickém záření částici, které dnes říkáme **mion** a označujeme jako  $\mu$ . Detekčním zařízením experimentátorů byla Wilsonova mlžná komora a měřili energetické ztráty častic při průchodu centimetrovou platinovou deskou vloženou do komory. Mion se projevil jako „pronikavá složka“ kosmického záření, jež při průchodu deskou neztrácela téměř žádnou energii. Na základě standardních představ o elektromagnetické interakci nabitych častic s atomy daného prostředí pak bylo možno vyloučit, že se jedná o elektron či proton: tak lehké částice jako elektrony či pozitrony (které se přitom ovšem také pozorovaly) ztrácí za daných okolností mnohem více energie a velmi těžký proton by při stejné



Charles Wilson  
1869–1959



Isidor Rabi  
1898–1988

hybnosti byl mnohem pomalejší a způsobil by větší ionizaci v mlžné komoře. Anderson a Neddermayer tak došli k závěru, že existuje nová částice s jednotkovým nábojem (kladným i záporným), zřetelně těžší než elektron a přitom mnohem lehčí než proton. Další experimenty určily základní parametry této částice; dnes víme, že mion je asi 200krát těžší než elektron (jeho klidová energie je zhruba 105 MeV) a je nestabilní, se střední dobou života rádiově  $10^{-6}$  s. Poměrně brzy (jestě před koncem čtyřicátých let) se také vyjasnilo, že mion se prakticky vždy rozpadá na elektron a dvě neutrální, velmi lehké a slabě interagující částice (neutrina). Vůbec se ale nerozpadá na elektron a foton nebo na elektron a elektron-pozitronový pár (což by z čisté kinematického hlediska byly jinak naprosto přijatelné procesy). Z toho lze např. usoudit, že mion nese nějaký další specifický náboj, který jej (kromě hmotnosti) odlišuje od elektronu a v interakcích se zachovává – pragmaticky jej lze označit jako „mionové číslo“. Jinak ale mion vypadá ve všech ohledech prostě jen jako jakási těžší replika elektronu (mimo jiné, má také spin 1/2). Ve stavbě okolního světa (tj. ve struktuře atomů atd.) ovšem evidentně nehráje žádnou roli a není tedy divu, že mnozí fyzikové upadli nad touto částicí do rozpaku. Nejlépe to asi vyjádřil Isidor Rabi (mimořádny laureát Nobelovy ceny za objev jaderné magnetické rezonance), který v této souvislosti položil často citovanou řečnickou otázku: „*Kdo si to objednal?*“ (*Who ordered that?*). Je třeba říci, že dodnes vlastně neznáme solidní odpověď na Rabovo otázku a navíc – jak uvidíme později – v současném standardním modelu mikrosvěta figuruje takových „nadbytečných“ častic hned několik.

Vraťme se však zpět do třicátých let. V roce 1935 navrhl Hideki Yukawa teorii jaderných sil, v níž prostředníkem silné interakce mezi nukleony byla částice, kterou dnes nazýváme **pion**, respektive **pí-meson** (a označujeme  $\pi$ ). Yukawou předpověděný mezon hrál tedy v silné interakci analogickou roli jako foton v kvantové elektrodynamice. Kvantová teorie sil působících v mikrosvětu vede obecně k závěru, že dosah určité interakce je řádově roven tzv. **Comptonově vlnové délce částice**, která ji zprostředkuje. Ta je dána vztahem  $\lambda = \frac{\hbar}{m \cdot c}$ , kde  $m$  je příslušná hmotnost a  $\hbar$ ,  $c$  jsou dobře známé univerzální konstanty (Planckova konstanta a rychlosť světla). Jelikož dosah jaderných sil je řádově  $10^{-15}$  m, lze z uvedeného vztahu odhadnout, že Yukawova částice by měla mít klidovou energii zhruba 200 MeV – v každém případě by měla být výrazně těžší než elektron a přitom asi o řád lehčí než proton (odtud právě název „mezon“). Vzhledem k tomu, že jede pouze o přibližné řádové odhady, není příliš divu, že pronikavé kosmické záření, objevené Andersonem a Neddermayerem nedlouho po formulaci mezonové teorie jaderných sil, bylo nejprve mylně ztotožňováno právě s Yukarovými částicemi. Podrobnější analýza chování pronikavých kosmických částic však ukázala, že tyto nevykazují všechny typické vlastnosti, jež se očekávaly u Yukarových mezonů. Ty by měly především silně interagovat s nukleony – např. záporně nabité mezon zachycený v atomu by se měl rychle absorbovat v jádře, dříve než se samovolně rozpadne. Tento typ chování byl u častic Anderson-Neddermayerova typu (tj. mionů) skutečně vyloučen v případě jejich interakce s lehkými jádry.



Hideki Yukawa  
1907–1981

Druhá světová válka na čas poněkud zbrzdila základní výzkum v této oblasti, ale už začátkem roku 1947 došlo k významnému pokroku. Donald Perkins použil k záznamu interakcí kosmického záření fotografickou emulzi a pozoroval případ, kdy dopadající záporně nabité pomalá částice zachycená atomem emulze rozbila jeho jádro na několik fragmentů (tři z nich zanechaly pozorovatelnu stopu). Definitivní vyjasnění situace pak přinesly ještě v témeř roce práce skupiny, kterou vedl Cecil Powell. Tito experimentátoři prokázali (rovněž s využitím techniky fotoemulzí), že v kosmickém záření lze identifikovat dvě různé částice s klidovými energiami řádově 100 MeV, přičemž jedna vzniká při rozpadu druhé z nich. Lehčí „mezon“ (objevený původně Andersonem a Neddermayerem) označili celkem logicky jako  $\mu$  a těžší (což byla Yukawova částice, kterou zřejmě poprvé pozoroval Perkins) jako  $\pi$ . Kinematika rozpadu  $\pi$ -mezonu zřetelně ukazovala na to, že v koncovém stavu jsou jen dvě částice, přičemž druhý (nevیدitelný) rozpadový produkt je neutrální a mnohem lehčí než elektron (jak se vyjasnilo o něco později). Z toho tedy vyplynul závěr, že  $\pi$  se rozpadá na  $\mu$  a neutrino. Tento závěr byl významně doplněn o patnáct let později, kdy se ukázalo, že toto neutrino není identické s „Pauliho neutrinem“ produkovaným v jaderném beta-rozpadu. Objev pionu a jeho hlavního rozpadového módu lze bez nadázkou označit za počátek moderní éry ve fyzice častic. Za svůj fundamentální příspěvek dostal Powell v roce 1950 Nobelovu cenu (Yukawa ji získal již rok předtím). Poznamenejme ještě, že ze nejjednodušší verze teorie Yukawova typu přirozeně plynulo, že mezon  $\pi$  musí mít nulový spin; tato předpověď byla experimentálně potvrzena v roce 1951.



Cecil Powell  
1903–1969

**Školská fyzika 3/2001**

Pokud jde o původní terminologii, je třeba zdůraznit, že název „ $\mu$ -mezon“ (který se občas vyskytne i v některých současných textech) je dnes již zastaralý a nevhodný. Důvod spočívá v zavedené klasifikaci hadronů – to jsou částice, na něž kromě slabých a elektromagnetických sil působí také silná jaderná interakce. Hadrony se dělí na **baryony** (částice s polocelým spinem jako např. nukleony) a **mezony** (částice s celočíselným spinem). Označení mezon je tedy vyhrazeno pouze pro hadrony bosonového typu (pro pion je proto původní název  $\pi$ -mezon v pořádku), zatímco mion  $\mu$  je fermion a patří do skupiny častic, které necítí silnou interakci – ty se nazývají **leptony** (sem patří také elektron a neutrino).

Původní Yukawova teorie předpokládala, že existují pouze elektricky nabité mezony  $\pi^-$  a  $\pi^+$  (které tvoří páru částice-antičástice a mají stejnou hmotnost). V roce 1938 navrhl Nicholas Kemmer, že nabité piony  $\pi^\pm$  by měly mít neutrálního partnera  $\pi^0$ . Jeho předpověď byla založena na tzv. **izospinové invarianci** silných interakcí – symetrii, která spojuje proton a neutron jako dva stavby nukleonu s odlišnými náboji (kdyby byla tato symetrie v reálném světě

přesná, hmotnosti protonu a neutronu by se nelišily a podobně by tomu bylo i v případě nábojového tripletu pionů). Poznamejme, že izospin je příkladem kvantového čísla spojeného s určitou **vnitřní symetrií** (tj. nikoli symetrií prostoročasu). Do jaderné fyziky byl zaveden Wernerem Heisenbergem v roce 1932 a postupně nalezl obecnější uplatnění i ve fyzice častic. Tento koncept dále rozvinul ještě ve třicátých letech zejména Eugene Wigner – o řadě dalších aplikací ideje vnitřní symetrie bude řeč později. Existence neutrálního pionu byla potvrzena na přelomu čtyřicátých a padesátých let v experimentech na jednom z prvních částicových urychlovačů modernho typu (v daném případě šlo o elektronový synchrotron postavený v kalifornském Berkeley).

Pomocí primárního svazku elektro-

nů zde bylo možno vytvořit svazek



Werner Heisenberg  
1901–1976

fotonů s energiemi až do několika stovek MeV a v produktech srážek fotonů s atomovými jádry terčíku pak byly identifikovány korelované páry fotonů (pomocí koincidencí ve dvou detektorech). Data souhlasila s předpokládanými dvoufotonovými rozpady  $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$  – takový proces se všeobecně očekával jako dominantní rozpadowý mód neutrálního mezonu. Četnost produkce  $\pi^0$  ve srážkách fotonů s nukleony byla přitom podobná hodnotě známé pro nabité piony. Z kvantové teorie plyne, že částice rozpada jící se na dva fotony nemůže mít spin 1. Bylo tedy víceméně přirozené očekávat, že neutrální pion má nulový spin, což se během padesátých let skutečně experimentálně potvrdilo. Na začátku padesátých let byly také poměrně přesně určeny hmotnosti  $\pi$ -mezonů. Dnes víme, že klidové energie  $\pi^\pm$  a  $\pi^0$  jsou přibližně 140 MeV a 135 MeV. Jejich relativní diference tedy činí méně než 5 %, což dobře koresponduje s (přibližnou) izospinovou symetrií (pro srovnání, klidové energie protonu a neutronu jsou zhruba 938,3 MeV a 939,6 MeV). Je však užitečné si uvědomit, že navzdory blízké příbuznosti  $\pi^\pm$  a  $\pi^0$  se jejich doby života liší o osm rádů: zatímco nabité piony mají střední dobu života přibližně  $10^{-8}$  s, neutrální pion žije v průměru zhruba jen  $10^{-16}$  s. Tento drastický rozdíl je ovšem způsoben odlišným charakterem interakcí, jež zde vstupují do hry; za-



Eugene Wigner  
1902–1995

tímco rozpad  $\pi^\pm$  je způsoben slabou interakcí (produkuje se při něm neutrino!), v rozpadu  $\pi^0$  na dva fotony je podstatná mnohem silnější elektromagnetická interakce.

Lze tedy říci, že v roce 1951 byl již bezpečně identifikován izospinový triplet (izotriplet) pionů  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^+$ , který připomínal dávno známý dublet nukleonů. Po nějakou dobu se mohlo zdát, že piony jsou „srozumitelné“ částice, jejichž úlohou v přírodě je držet atomová jádra pohromadě (jako nositelé silné interakce nukleonů) a jedinou „nepochopitelnou“ částicí byl mion. Ukázalo se však, že objev pionu jakoby zároveň předznamenal otevření jakési záhadné „Pandořiny skříňky“: během paděstých let totiž v katalogu známých častic začalo povážlivě přibývat dalších příbuzných pionů či nukleonů (tj. nových mezonů a baryonů), přičemž jejich role ve stavbě okolního světa byla stejně obskurní jako role mionu.

## PODIVNÉ ČÁSTICE

Historie objevu nových mezonů a baryonů je poněkud spletitá a omezíme se proto jen na její stručnou rekapitulaci. První novou částicí, jež v tabulkách následovala za piony, byl – použijeme-li dnešní terminologie – nabité **kaon** neboli mezon  $K^+$  (jeho klidová energie je přibližně 494 MeV). Je pozoruhodné, že tento mezon byl s největší pravděpodobností poprvé zaznamenán v kosmickém záření ještě dříve než pion (Louis Leprince-Ringuet a Michel L'héritier, 1943), ale „tabulkový“ status získal až začátkem paděstých let – tomu předcházela zejména identifikace jeho rozpadu na piony<sup>3</sup>. Studium kosmického záření během čtyřicátých a začátku paděstých let ve skutečnosti přineslo celou řadu pozorovaných případů, jež se daly interpretovat jako rozpady nových nestabilních častic. V roce 1953 byla existující data různých experimentálních skupin sumarizována a kromě již zmíněného mezonu  $K^+$  se v tabulkách objevil také neutrální kaon  $K^0$  a dále dva nové baryony, které se nyní nazývají  $\Lambda$  a  $\Sigma^+$  (pro metastabilní baryony těžší než nukleony se dosud často užívá tradičního označení **hyperony**). Částice  $\Lambda$  i  $\Sigma^+$  se prakticky vždy rozpadají na nukleon a pion. Krátce nato následoval hyperon  $\Xi^-$  (tzw. „kaskádní hyperon“), který se rozpadal na  $\Lambda$  a  $\pi^-$ .

Další podstatný pokrok přinesly experimenty na urychlovačích, které umožnily systematicky studovat procesy produkce nových častic. Koncem roku 1953 byl (na zařízení Cosmotron v americkém Brookhavenu) k bombardování jader terčíku poprvé použit svazek pionů. Tento experiment během krátké doby potvrdil dřívější výsledky známé z kosmického záření a dále je rozšířil. Byla tak např. potvrzena existence  $\Sigma^+$  a objeven hyperon označovaný dnes  $\Sigma^-$  (který ovšem není antičásticí  $\Sigma^+$ !). Obzvláště důležitá byla produkce páru nestabilních častic. Četnost této procesu naznačovala, že zde vchází do hry silná interakce, ale rozpady nových mezonů a baryonů byly relativně pomalé – jejich střední doby života byly delší než  $10^{-10}$  s a odpovídaly tedy spíše slabé interakci; v rozpadech přitom obvykle vznikaly nukleony a/nebo piony. To vypadalo téměř jako paradox: nové částice se produkovaly v silných interakcích a rozpadaly se na silně interagující částice, ale kdyby silná interakce způsobovala jejich rozpad, jejich střední doby života by byly alespoň o deset řádů menší než ty, které se pozorovaly.

Tuto záhadu úspěšně vyřešil Murray Gell-Mann. Podstatou jeho návrhu bylo, že pro hadrony (tj. mezony a baryony) zavedl nové *additivní* kvantové číslo, které se zachovává v silných a elektromagnetických interakcích, ale ve slabých interakcích se může měnit. Toto nové kvantové číslo Gell-Mann nazval **podivnost** (v anglickém originálu je to „strangeness“ a znází se proto  $S$ ). „Obyčejně“ hadrony (piony a nukleony) mají podivnost nula, pro mezon  $K^+$  je

<sup>3</sup> Zde mají prvenství George Rochester a Clifford Butler, jejichž pozorování z roku 1947 byla o něco později nezávisle potvrzena dalšími experimentátorými.



Murray Gell-Mann  
1929–

$S=+1$  a hyperony  $\Lambda$  a  $\Sigma$  mají  $S=-1$ . Antičástici se přírádí opačná podivnost než částici, takže mezon  $K^-$  (který má stejnou hmotnost jako  $K^+$ ) nese podivnost  $-1$ . Tato pravidla pak jednoduše vysvětlovala pozorované zákonitosti produkce mezonů a baryonů a jejich rozpadů – bylo např. zřejmé, že ve srážkách obyčejných hadronů se „podivné“ částice mohou rodit jen v párech a jen v určitých kombinacích. Dále, kromě podivnosti se v silných interakcích zachovává izospin (který se ale může měnit v elektromagnetických a slabých interakcích). Gell-Mann rovněž správně uhodl, že ve slabé interakci se podivnost může měnit nejvýše o jednotku.

Stojí za zmínku, že ještě před Gell-Maninem formuloval alternativní model Abraham Pais, který postuloval, že mezonu a baryony nesou *multiplikativní* kvantové číslo, které má hodnotu  $+1$  pro piony a nukleony a  $-1$  pro nové částice jako  $K^+$ ,  $\Lambda$  atd.; předpokládal přitom, že součin těchto čísel pro jednotlivé hadrony se zachovává v silných interakcích (ale ve slabých interakcích obecně nikoli). Paisova teorie sice vysvětlovala všechna tehdy známá pozorování, ale vedla také k některým předpovědím, jež byly později vyvráceny. Nejjednodušší je asi případ procesu  $\pi^- p \rightarrow K^- \Sigma^+$ , který byl v rámci Paisova modelu dovolen, ale podle Gell-Mannovy teorie je striktně zakázán (naproti tomu podobný proces  $\pi^- p \rightarrow K^+ \Sigma^-$  je dovolen v obou schématech!). Tuto pozoruhodnou historickou kuriozitu zde uvádíme proto, aby bylo zřejmé, že dnešní standardní učebnicová teorie měla kdysi svou vědeckou – a tudíž experimentálně vyvratitelnou – alternativu. Pro úplnost ještě dodejme, že ke schématu navrženému Gell-Maninem dospěl nezávisle a prakticky současně také Kazuhiko Nishijima.

Klasifikaci mezonů i baryonů podle podivnosti a izospinu kvantitativně vystihuje slavná Gell-Mann-Nishijimova formule

$$Q = T_3 + \frac{1}{2} \cdot (B + S), \quad (1)$$

kde  $Q$  značí elektrický náboj (v jednotkách kladného elementárního náboje),  $T_3$  je „třetí složka izospinu“,  $B$  je tzv. **baryonové číslo** ( $B$  má hodnotu  $+1$  pro baryony,  $-1$  pro antibaryony a  $0$  pro mezonu) a  $S$  je podivnost. Jen pro ilustraci hodnot izospinu uvedeme, že například  $T_3 = -1, 0, 1$  pro triplet  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^+$ ,  $T_3 = -1/2, +1/2$  pro dublet  $n$ ,  $p$  apod. Teorie podivných hadronů vyjádřená formulí (1) dávala některé předpovědi, jež byly na svou dobu poněkud neobvyklé.  $K^-$  mezonu tvoří dva izospinové dublety  $K^0$ ,  $K^+$  a  $K^-$ ,  $\bar{K}^0$ , přičemž elektricky neutrální  $K^0$  není totožný se svou antičásticí  $\bar{K}^0$ . Dále, baryony  $\Sigma^-$  a  $\Sigma^+$  jsou umístěny do izotripletu, analogického tripletu  $\pi$ -mezonů. Jako neutrální partner  $\Sigma^\pm$  by se na první pohled nabízel hyperon  $\Lambda$ , avšak jeho klidová energie 1 115 MeV je poněkud malá (pro srovnání, klidové energie  $\Sigma^+$ , resp.  $\Sigma^-$  jsou 1 189 MeV, resp. 1 197 MeV). Tak byl předpovězen hyperon  $\Sigma^0$ , který by se měl rozpadat (elektromagnetickou interakcí) na  $\Lambda$  a foton.  $\Sigma^0$  s očekávanými vlastnostmi byl skutečně objeven v roce 1955 (jeho klidová energie je 1 192 MeV). Konečně, hyperon  $\Xi^-$  musí mít podivnost  $-2$  (neboť se slabě rozpadá na  $\Lambda$  a  $\pi^-$ ) a potřebuje k sobě neutrálního partnera do izospinového dubletu. Ten byl nalezen až v roce 1959 pomocí bublinové komory a s využitím svažku mezonů  $K^-$  produkováných na zařízení Bevatron v kalifornském Berkeley; relevantní proces byl  $K^- p \rightarrow K^0 \Xi^0$ . (Poznamenejme, že bublinovou komoru vynalezl v roce 1952 Donald Glaser.) Klidové energie jsou 1 321 MeV pro  $\Xi^-$  a

1 315 MeV pro  $\Xi^0$ . Nesporný fenomenologický úspěch Gell-Mannovy teorie vedl během padesátých let k jejímu všeobecnému uznání a byl tak definitivně akceptován i termín „podivnost“, který z počátku budil odpor komunity čisticových fyziků.

Podivné částice, o nichž byla zatím řeč, však zdáleka nejsou jedinými novými mezony a baryony, jež se objevily na scéně během padesátých a začátku šedesátých let. V experimentech na urychlovačích totiž postupně přibývalo také tzv. **rezonanční**, které se vyznačují extrémně krátkou dobou života – typicky  $10^{-22}$ – $10^{-23}$  s. Pro bližší osvětlení podstaty těchto hadronových stavů je třeba nejprve připomenout jeden velmi důležitý pojem, který budeme nadále často užívat i v jiných souvislostech. Jedná se o **účinný průřez** reakce vyvolané srážkou dvou častic (může přitom jít jak o pružný rozptyl, tak o produkci dalších častic). Tato veličina představuje vhodně normovanou pravděpodobnost uvažovaného fyzikálního procesu (tj. pravděpodobnost toho, že za daných podmínek dojde k určité reakci) a je tedy zároveň určitou mírou intenzity (síly) příslušné interakce. Jak sám název napovídá, účinný průřez má rozměr plochy a udává se tedy v násobcích  $m^2$ ; v jaderné a čisticové fyzice se obvykle užívá jednotka barn (angl. stodola!), což je  $10^{-28} m^2$ . Kvantová teorie dává matematické metody pro výpočet účinných průřezů různých procesů v rámci modelů interakcí častic v mikrosvětě; na druhé straně, pro jejich experimentální měření je podstatný vztah

$$N = \sigma \cdot L, \quad (2)$$

v němž  $N$  je zaznamenaný počet případů uvažované reakce za jednotku času,  $\sigma$  je účinný průřez a  $L$  je tzv. **luminosita**, která závisí na hustotě toku dopadajících častic a na vlastnostech terčíku; udává se obvykle v  $cm^{-2} \cdot s^{-1}$ .

Účinný průřez konkrétní reakce vždy závisí na celkové energii častic před srážkou a měření této závislosti přináší podstatnou informaci o charakteru interakce. Z kvantové teorie je známo, že pokud při určité energii srážky může vzniknout nějaká částice (s odpovídající kladovou hmotností), která se rozpadá na pozorovaný koncový stav, pak v této oblasti se účinný průřez daného procesu výrazně zvýší: pozoruje se „rezonanční pik“, jehož šířka je nepřímo úměrná době života takové částice v mezistavu. Přesně řečeno, označíme-li šířku rezonance jako  $\Gamma$ , pak její střední doba života je  $\tau = \frac{\hbar}{\Gamma}$ ; jelikož redukovaná Planckova konstanta  $\hbar$  má hodnotu přibližně  $6,6 \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot s$ , znamená to, že šířka 6,6 MeV odpovídá době života  $10^{-22}$  s. Rezonanční chování účinných průřezů bylo známo z fyziky atomového jádra přinejmenším od čtyřicátých let a kanonický tvar této energetické závislosti je spojen se jmény Gregory Breita a Eugene Wignera.

První rezonance ve fyzice elementárních častic byla objevena v roce 1952 skupinou experimentátorů, kteří pracovali pod vedením E. Fermiho na cyklotronu v Chicagu. Vyšetřovali srážky nabitych pionů s protony (tj. s vodíkovým terčem), v nichž se opět produkovaly páry pion–nukleon. Pozorovali nápadný růst účinného průřezu pro určitou hodnotu kinetické energie dopadajících častic a data se dala interpretovat jako první polovina Breit-Wignerovy rezonanční křivky. Vzhledem k tomu, že toto chování se projevovalo jak ve srážkách  $\pi^- p$ , tak  $\pi^+ p$ , bylo možno usoudit, že pozorovaná rezonance má izospin  $3/2$  a úhlové rozdělení produktů reakce naznačovalo, že její spin je rovněž  $3/2$ . Trvalo několik dalších let, než se situace



Donald Glaser  
1926–

úplně vyjasnila, ale kolem poloviny padesátých let už byla baryonová rezonance  $\Delta(1232)$ , jak se dnes označuje, bezpečně identifikována. Má klidovou energii 1 232 MeV a šířku přibližně 120 MeV, což znamená, že její střední doba života je zhruba  $10^{-23}$  s. Představuje čtverci stavů  $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^-$ , lišících se nábojem – jinak řečeno, je to izospinový kvartet (připomeňme, že pro izospin velikosti  $T$  má příslušný multiplet  $2 \cdot T + 1$  členů). Podivnost  $\Delta(1232)$  je ovšem rovna nule, neboť vzniká silnou interakcí pionu a protonu a neprodukuje se přitom v páru s jinou částicí. Velmi krátká doba života takové hadronové rezonance přirozeně souvisí s tím, že i její rozpad je způsoben silnou interakcí.

Na začátku šedesátých let pak byla objevena celá řada dalších hadronových stavů tohoto typu. Hned v roce 1960 byla pozorována rezonance ve srážkách mezonu  $K^-$  s protonem, která má sice spin 3/2 stejně jako  $\Delta$ , ale jinak je příbuzná hyperonům  $\Sigma$  (má podivnost -1 a izospin 1); dnes se proto označuje jako  $\Sigma^*$ , nebo přesněji  $\Sigma(1385)$  (číslo v závorce u symbolu rezonance vždy udává klidovou energii v MeV). Brzo potom následovaly objevy prvních mezonových rezonancí; mezi nimi je velmi důležitý  $\rho$ -mezon se spinem 1, plným označením  $\rho(770)$ , který je blízkým příbuzným pionu (má nulovou podivnost a izospin 1). V roce 1962 pak byla nalezena baryonová rezonance příbuzná hyperonu  $\Xi$ , která se dnes označuje  $\Xi^*$ , resp.  $\Xi(1530)$  (spin 3/2, izospin 1/2 a podivnost -2). Kromě toho byla také objevena celá řada rezonancí, které mají izospin 1/2 a vypadají jako excitované stavy nukleonů (k dnešnímu dni je jich známo více než tucet a nejlehčí z nich v tabulkách figuruje pod označením  $N(1440)$ ). Skupiny takových excitovaných stavů jsou dnes identifikovány prakticky pro každý základní mezon či baryon a celkový počet známých rezonancí tak v současnosti dosahuje několika stovek.

Zde je na místo terminologická poznámka. Pro větší přehlednost jsme v naší diskusi hadronů zatím rozlišovali „částice“ (jako  $\pi$ ,  $K$ ,  $\Lambda$ ,  $\Sigma$  atd.) a „rezonance“ ( $\Delta$ ,  $\Sigma^*$  atd.). Je třeba zdůraznit, že takové dělení je ve skutečnosti poněkud umělé, ačkoli se v literatuře poměrně často užívá. Rozdíl mezi hadrony prvního a druhého typu je totiž pouze v tom, že „částice“ se rozpadá relativně pomalu (pod vlivem slabé nebo elektromagnetické interakce), zatímco „rezonance“ žije velmi krátce – její rozpad je způsoben silnou interakcí. Prakticky to znamená, že částice může při dostatečně velké rychlosti zanechat stopu pozorovatelné délky například v bublinové komoře (připomeňme, že světlo urazí za  $10^{-10}$  s vzdálenost 3 cm), zatímco pro rezonance je tento způsob detekce vyloučen. Fyzikální povaha všech hadronů je však v podstatě stejná: jsou to subjaderné objekty, jež cítí silnou interakci a není přitom důvod se domnívat, že např. nukleon je „elementárnější“ než rezonance  $\Delta$  (prostě proto, že podle žádného přirozeného fyzikálního kritéria nelze takovou hierarchii ve světě hadronů identifikovat).<sup>4</sup>

## EIGHTFOLD WAY

Kolem roku 1962 bylo známo již zhruba třetí hadronů a dále jich přibývalo. Hlubší pochopení jejich systematicky tedy zřejmě vyžadovalo silnější organizační princip, než byla jednoduchá Gell-Mann-Nishijimova formule. Ve spektru hmotností pozorovaných hadronů bylo skutečně možno pozorovat určité pravidelnosti, jež přesahovaly rámec izospinových multipletů.

<sup>4</sup> Stojí snad také za zmínku, že fenomenologická „hadronová demokracie“ byla základem tzv. teorie „bootstrap“, kterou na začátku šedesátých let navrhl Geoffrey Chew. Kvarkový model, o němž bude řeč dále, tuto teorii nakonec zcela vytlačil na okraj zájmu částicových fyziků. Zdá se však, že její idea čas od času oslovuje některé filozofy přírodních věd.

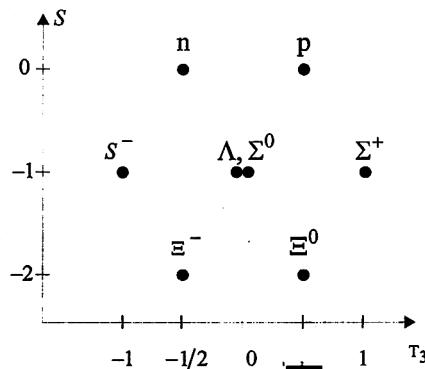
Příkladem může být oktet p, n,  $\Lambda$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Xi^-$ ,  $\Xi^0$  (viz obr. 1), v němž rozdíly hmotností baryonů s odlišnou podivností jsou sice zřetelně větší než hmotnostní diference uvnitř izomultipletů, ale lze je stále ještě považovat za dostatečně malé, neboť činí maximálně jen asi 35 % typické klidové hmotnosti baryonu. Podobná situace nastává také v případě skupiny baryonových rezonancí  $\Delta$ ,  $\Sigma^*$  a  $\Xi^*$ . Jako hlubší organizační princip hadronového světa tedy byla žádoucí nějaká (přibližná) vnitřní symetrie, která by v sobě zahrnovala izospin i podivnost. Takovou symetrii navrhli už v roce 1961 nezávisle na sobě Murray Gell-Mann a Yuval Ne'eman; formálně se označuje jako  $SU(3)$  a zejména dříve se často nazývala prostě „unitární symetrie“, neboť se realizuje pomocí speciálních unitárních matic  $3 \times 3$  (poznamenejme, že izospin podobně odpovídá symetrie  $SU(2)$ ). Diskuse přesného matematického obsahu těchto pojmu a označení vychází za rámec našeho populárního přehledu, a proto od ní upouštíme; v dalším se soustředíme spíše na praktické důsledky a předpovědi Gell-Mann–Ne'emanovy teorie.

Symetrie  $SU(3)$  byla zajímavá právě proto, že automaticky vedla k existenci oktetů ve spektru hadronů. Pozorované hmotnostní diference pro reálné baryony ovšem jasně ukazovaly, že tato symetrie nemůže být v přírodě úplně přesná (podobně jako není zcela přesná izospinová symetrie), a bylo tedy třeba formulovat nějaký realistický model jejího narušení. Gell-Mann a Ne'eman tak učinili pomocí specifických algebraických pravidel pro dodatečné (nesymetrické) příspěvky k silné interakci a jejich teorie přibližné unitární symetrie pak umožňovala odvodit např. některé jednoduché vztahy mezi hmotnostmi částic v multipletech. Jedním z nejznámějších příkladů je tzv. Gell-Mann–Okubova relace

$$\frac{1}{2} \cdot (m_N + m_{\Xi}) = \frac{1}{4} \cdot (3m_{\Lambda} + m_{\Sigma}), \quad (3)$$

která – jak se čtenář může přesvědčit – skutečně platí s přesností lepší než 1 % (ve formuli (3) figuruje střední hmotnost baryonových izomultipletů; např.  $m_N$  je střední hmotnost nukleonu  $m_N = \frac{m_p + m_n}{2}$  atd.). K ji-

ně mimořádně významné předpovědi takového typu se vrátíme později. V roce 1962 byl také objeven poslední chybějící člen oktetu mezonů se spinem 0 (viz obr. 2) – elektricky neutrální částice označovaná dnes jako  $\eta$ . Teorie unitární symetrie tak získala další bod. Tento mezon má klidovou energii 547 MeV a podobně jako neutrální pion má poměrně krátkou dobu života, rádově  $10^{-19}$  s (jeho rozpad způsobuje



Obr. 1 Základní oktet baryonů s spinem 1/2.

prevážně elektromagnetická interakce). Má izospin 0 (tj. je to „izosinglet“) a je tedy v jistém smyslu protějškem hyperonu  $\Lambda$  z baryonového oktetu; jeho podivnost je ovšem rovna nule, ve shodě s Gell-Mann–Nishijimovou formulí (1). Rozdíly hmotností v mezonovém oktetu jsou evidentně daleko výraznější, než je tomu v případě baryonů; fyzika mezonů je v tomto ohledu skutečně dost komplikovaná, ale i zde je možno za jistých dodatečných předpokladů odvodit formulí typu (3). Ta má tvar

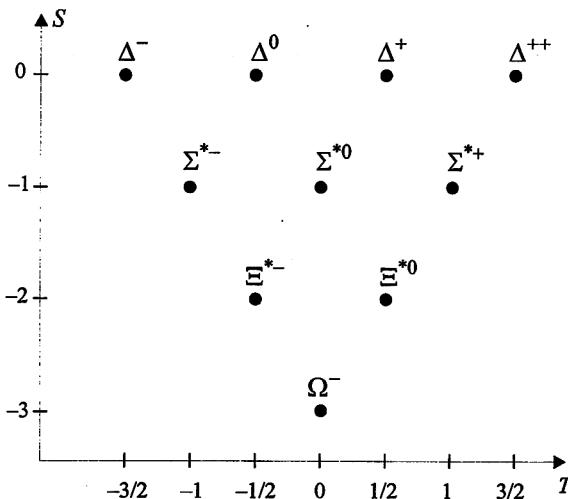
$$3 \cdot m_\eta^2 = 4 \cdot m_K^2 - m_\pi^2 \quad (4)$$

(čtenář se opět může přesvědčit, že skutečně platí s přesností několika procent).

Přibližná symetrie  $SU(3)$  sama o sobě předpovídá kromě oktetů celou řadu dalších multipletů, např. s počtem členů 1, 3, 6, 10, 15, 24, 27, atd. Pozoruje se však pouze několik málo z nich – v každém případě, v roce 1962 byla prokázána pouze existence baryonového a mezonového oktetu a devět rezonancí typu  $\Delta$ ,  $\Sigma$  a  $\Xi$  naznačovalo příslušnost k nějakému většímu, zatím neúplnému multipletu. Vzhledem k tomu, že primárním empirickým základem unitární symetrie byl baryonový oktet, Gell-Mann a Ne'eman ve své teorii od začátku předpokládali, že základním „stavebním prvkem“ hadronového spektra je právě oktet, tj. že další multiplety se dostanou pouze kombinací oktetů. Takto lze dostat singlet, další oktet, dále dekuplet a konečně 27-plet (pro matematicky založeného čtenáře poznámenejme, že se zde jedná o rozklad tenzorového součinu dvou oktetových reprezentací  $SU(3)$  na irreducibilní reprezentace). Tento model byl

svými autory později nazván *eightfold way*<sup>5</sup>. Pozorované baryonové rezonance se spinem 3/2 tedy mohly patřit buď do dekupletu nebo do 27-pletu (druhá možnost by podle teorie znamenala také existenci baryonů s kladnou podivností, pro něž ale nebyla žádná experimentální evidence).

Rozhodující podnět přinesla mezinárodní „rochesterská“ konference o fyzice vysokých energií, jež se v roce 1962 konala v Ženevě (v Evropském centru fyziky častic CERN). V poznámce z pléna, v níž reagoval na aktuální experi-



Obr. 3 Dekuplet baryonů se spinem 3/2.

mentální situaci, Gell-Mann vyslovil domněnkou, že pozorované baryonové rezonance patří do dekupletu (viz obr. 3) a okamžitě předpověděl základní vlastnosti jeho desátého člena, včetně

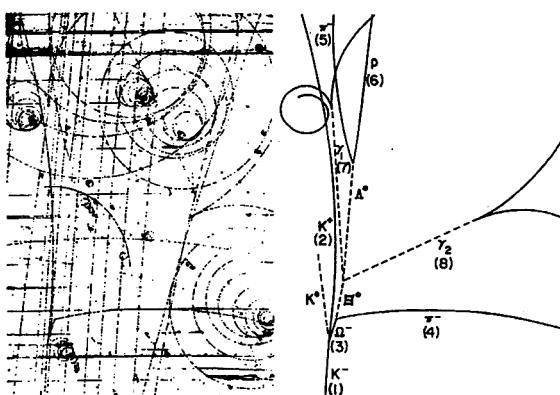
<sup>5</sup> Název parafázuje známé označení jednoho z hlavních principů buddhismu. V českém překladu by to bylo do slova „osminásobná cesta“ nebo „osmidlná cesta“, ale žádný z těchto ekvivalentů není příliš šťastný a v domácí odborné terminologii se neujal; nejpříležitější by asi byl prozaický termín „oktetový model“.

klidové hmotnosti. Teorie přibližné symetrie  $SU(3)$  dává pro hmotnosti v dekupletu obzvláště jednoduchou predikci, totiž že jejich spektrum je „ekvidistantní“ v závislosti na podivnosti: rozdíl hmotností  $\Sigma^*$  a  $\Delta$  je přibližně stejný jako rozdíl mezi  $\Xi^*$  a  $\Sigma^*$  a ten by měl být stejný jako rozdíl hmotností desáté částice a  $\Xi^*$ . Na základě známých rozdílů  $1385 - 1232 = 153$  a  $1530 - 1385 = 145$  (viz data uvedená v předchozí kapitole) bylo tedy možno předpovědět pro klidovou energii posledního člena dekupletu hodnotu zhruba 1 680 MeV. Předpověděná částice, označená jako  $\Omega^-$ , měla mít podivnost  $-3$ , izospin  $0$ , elektrický náboj  $-1$  a spin  $3/2$ . Součástí Gell-Mannovy předpovědi byl také poněkud překvapivý závěr, že  $\Omega^-$  by se měla rozpadat slabou interakcí – nelehčí koncový stav s podivností  $-3$ , který by jinak připadal v úvahu, je totiž  $\Lambda K^0 \bar{K}^-$  s klidovou energií větší než 2 100 MeV (je třeba respektovat zachování baryonového čísla). Znamenalo to tedy, že  $\Omega^-$  by ve skutečnosti měla být „částice“ a nikoli „rezonance“ (v duchu terminologie, kterou jsme vysvětlili v předchozí kapitole). Ke stejným závěrům dospěl (na téže konferenci) nezávisle také Ne'eman.

Po ženevské konferenci měli tedy experimentátoři výraznou motivaci pro hledání nového baryonu, který by se slabě rozpadal na systém s podivností  $-2$ . Pátrání probíhalo nezávisle v několika laboratořích, v Evropě (CERN) i v USA. Začátkem roku 1964 byla částice  $\Omega^-$  s předpověděnými vlastnostmi skutečně nalezena v Brookhavenu týmem, který vedl Nicholas Samios (detekčním zařízením byla vodíková bublinová komora). Produkovala se (v jednom pozorovaném případě) ve srážkách svazku negativních kaonů s protony v procesu



a koncový stav se rozpadal v sekvenci  $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 \pi^-$ ,  $\Xi^0 \rightarrow \Lambda \pi^0$ ,  $\Lambda \rightarrow p \pi^-$ . Neutrální pion byl přitom detekován pomocí rozpadu na dva fotony (viz obr. 4). Signatura procesu byla na tolik jasná, že nebylo třeba čekat na identifikaci dalších případů takového typu – jiná interpretace než produkce  $\Omega^-$  byla prakticky vyloučena. Tento výsledek byl skutečným triumfem pro teorii i pro experiment. Zpráva o objevu doslova obletěla svět a tehdejší snímek z brookhavenské bublinové komory lze dnes najít v řadě učebnic. Podle současných tabulek má  $\Omega^-$  klidovou energii 1 672 MeV a střední dobu života přibližně  $0,8 \cdot 10^{-10}$  s. Je zajímavé, že ač-



Obr. 4 Případ produkce a následného rozpadu baryonu  $\Omega^-$ : snímek z bublinové komory a odpovídající schéma.

koli má tento baryon „čtyřhvězdičkový status“ (tj. nejvyšší možný), jeho spin se dosud nepodařilo přímo experimentálně určit. Jelikož však  $\Omega^-$  jinak dokonale zapadá do dnes už všeobecně přijaté klasifikace hadronů, předpověděná hodnota  $3/2$  se bere jako platná mimo jakoukoli rozumnou pochybnost.

## KVARKY A LEPTONY V ŠEDESÁTÝCH LETECH

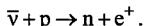
Téměř současně s experimentálním objevem  $\Omega^-$  byla teorie přibližně unitární symetrie reformulována způsobem, který dal pozorovaným mezonovým a baryonovým multipletům mnohem názornější základ než původní „eightfold way“. Gell-Mann a nezávisle na něm George Zweig postulovali, že hadrony jsou tvořeny jednoduchými kombinacemi elementárních konstituentů, které odpovídají tripletu (resp. anti-tripletu)  $SU(3)$ , přičemž z nějakých důvodů se tyto fundamentální objekty nepozorují jako volné částice – jsou prostě uvnitř mezonů a baryonů trvale „uvězněny“. Gell-Mann dal těmto hypotetickým konstituentům bizarní název **kvarky** (v anglickém originále „quarks“ podle knihy Jamese Joyce *Finnegans Wake*, v níž se vyskytuje záhadná věta „Three quarks for Muster Mark“) a Zweig je nazval „esa“ (v angličtině „aces“). Zweigova práce nakonec nebyla publikována v časopisecké podobě a jím navrhovaný název se neujal. Gell-Mann svou práci publikoval v evropském časopise Physics Letters (možná z obavy, že poněkud „vznešenější“ americký Physical Review Letters by ji mohl zamítнуть) a jak dnes dobře víme, jeho kvarky, označené  $u$  (up),  $d$  (down) a  $s$  (strange) po nějaké době zdomácnely i v důstojných učebnicích – navzdory tomu, že tento poněkud komický název budil zpočátku pravděpodobně ještě silnější odpor než kdysi v padesátych letech termín podivnost.

V Gell-Mannově modelu jsou baryony vytvořeny ze tří kvarků a mezony z kvarku a anti-kvarku, přičemž každý kvark nese spin 1/2 (pak totiž dostaneme automaticky baryony se spinem 1/2 nebo 3/2 a mezony se spinem 0 nebo 1). Poněkud neobvyklé jsou hodnoty jejich elektrického náboje: pro kvark  $u$  je to +2/3, pro  $d$  a  $s$  shodně -1/3 (vše v jednotkách kladného elementárního náboje). Tato volba ovšem reprodukuje náboje známých hadronů, neboť například proton má kvarkové složení  $uud$ , neutron  $udd$ , hyperon  $\Lambda uds$ , mezon  $K^+ us\bar{s}$ , atd. Kvarky  $u$ ,  $d$  tvoří izospinový dublet (odtud také pochází jejich označení) a mají nulovou podivnost, zatímco  $s$  je izospinový singlet a nese podivnost -1. Podivnost daného hadronu tedy jednoduše vyjadřuje počet  $s$ -kvarků či antikvarků v něm obsažených; speciálně, enigmatický baryon  $\Omega^-$  s podivností -3 má kvarkové složení  $sss$ . Kvarkový model spolu s algebraickými pravidly symetrie  $SU(3)$  také vede k závěru, že baryony (které jsou vytvořeny kombinací tří tripletů) mohou patřit do oktetu, dekupletu nebo singletu, zatímco mezony (jakožto kombinace tripletu a anti-tripletu) se mohou vyskytovat v podobě oktetu nebo singletu. O oktetech a dekupletu už zde byla řeč a pro úplnost je tedy třeba dodat, že singlety  $SU(3)$ , tj. „osamělé“ hadrony, se rovněž pozorují: v případě mezonů je to např. částice se spinem 0 označovaná jako  $\eta'(980)$  a mezi baryony lze za singlet považovat rezonanci se spinem 1/2 označovanou jako  $\Lambda(1405)$ .

Jak už bylo řečeno, Gell-Mann-Zweigův model prostě předpokládal, že volné kvarky se v přírodě nevyskytují – skutečně, navzdory úsilí experimentátorů nebyla nikdy pozorována částice nesoucí zlomek elementárního náboje. Sám Gell-Mann ve své původní práci charakterizoval kvarky jako „matematické částice“, takže mnozí je zpočátku chápali spíše jako určitou mnemotechnickou pomůcku pro klasifikaci baryonů a mezonů než jako reálné fyzikální objekty. V této retrospektivě lze skutečně konstatovat, že kvarky definitivně získaly status fyzikálních čistic zhruba až v polovině sedmdesátých let, v souvislosti s dalším podstatným prohloubením experimentálních poznatků o vlastnostech a chování hadronů. Dynamický princip, který podle současných představ správně určuje síly působící mezi kvarky, byl definitivně formulován v roce 1973 a zmínime se o něm později. Na tomto místě jen poznamenejme, že problému „uvěznění kvarků“ bylo v uplynulých letech věnováno mnoho úsilí a teoretické argumenty objasňující původ tohoto pozoruhodného jevu se dnes všeobecně přijímají s velkou důvěrou; zcela exaktní důkaz však nebyl dosud podán.

V každém případě, formulace kvarkového modelu znamenala od samého začátku radikální „obnovení pořádku“ v systematice subatomových částic. Baryony a mezony, jejichž počet neutrálně rostl, bylo možno interpretovat jako objekty složené z malého počtu jednodušších konstituentů a pojmem „elementární částice“ tak v hadronovém sektoru mikrosvěta získal kvalitativně nový obsah: proton, neutron, atd. ztratily status fundamentálních částic, zatímco kvarky  $u$ ,  $d$  a  $s$  se daly považovat za stejně elementární jako např. elektron. Původní algebraická pravidla přibližné unitární symetrie bylo přitom možno jednoduše přeložit do přirozeného jazyka kvarkového modelu (narušení symetrie odpovídá rozdílným hmotnostem kvarků  $u$ ,  $d$  a  $s$ ) a předchozí správné předpovědi teorie „eightfold way“ se automaticky reprodukovaly. Ve druhé polovině šedesátých byl kvarkový model – jako názorný základ přibližné symetrie  $SU(3)$  – postupně akceptován značnou částí komunity částicových fyziků a Gell-Mann získal za svůj mimořádný přínos k nové systematice hadronů a jejich interakcii Nobelovu cenu v roce 1969.

V padesátých a šedesátých letech došlo také k významnému pokroku ve fyzice leptonů, konkrétně v identifikaci a rozlišení neutrín produkovaných v různých rozpadech procesech. Začneme od neutrina (resp. antineutrina), které podle původní Pauliho hypotézy vzniká při jaderném beta-rozpadu. To bylo od poloviny tricátých let celkem běžně uznáváno jako reálná fyzikální částice (zejména proto, že přirozeně figurovalo ve fenomenologicky úspěšné Fermiho teorii slabé interakce), ale na průměr experimentální potvrzení jeho existence bylo třeba čekat poměrně dlouho. Prokázat existenci neutrina totiž znamená detektovat nějakou reakci vyvolanou jeho srážkou s jinou částicí a takové procesy jsou velmi vzácné; působí zde pouze slabá interakce a příslušné účinné průřezy mají v relevantní oblasti energií nepatrnou velikost (jsou typicky o 10 až 12 rádů menší než v případě silné interakce). Prvenství v řešení tohoto obtížného experimentálního problému dosáhli Clyde Cowan a Frederick Reines, kteří jako vydatný neutrínový zdroj použili jaderný reaktor v Savannah River (stát South Carolina, USA). Uvnitř reaktoru se produkuje velké množství antineutrín v beta-rozpadech štěpných produktů bohatých na neutróny a Cowan a Reines byli schopni pozorovat proces srážky antineutrina s protonem, v němž se produkoval pozitron a neutron, tj. reakci



Ve finální zdokonalené verzi svého experimentu přitom koncové částice detekovali v koincienci (při anihilaci pozitronu vznikal fotonový pár, jenž dával signál v kapalném scintilátoru a neutron se identifikoval prostřednictvím fotonu vyzářeného po jeho záchytu v kadmiu). Výsledky pozorování publikovali v roce 1958 (předběžný signál probíhající reakce měli už o dva roky dříve) a Reines získal za tento důmyslný experiment Nobelovu cenu v roce 1995 (Cowan se jejího udělení nedožil).

Neutrino se ovšem produkuje např. také v rozpadech nabitych pionů a v naprosté většině případů přitom zároveň vzniká mion (relativní četnost produkce elektronu je jen asi 0,01 %). Poznámejme, že potlačení „elektronového módu“ je určeno poměrem  $m_e^2/m_\mu^2$  a má svůj přirozený původ v určitých charakteristických vlastnostech slabé interakce, o nichž bude řeč v kapitole „Slabá interakce“. Na konci padesátých let byla celkem populární hypotéza, že neutrino produkované slabou interakcí spolu s mionem je odlišné od toho, které vzniká v beta-rozpadu. Takové podezření bylo motivováno zejména identifikací dominantního rozpadu mionu (na



Frederick Reines  
1918–1998

elektron a dvě neutrina) a nápadnou absencí některých dalších – jinak zcela přijatelných – rozpadových módů: jak jsme již naznačili dříve, jedno možné schéma, které tyto empirické poznatky přirozeně vysvětlovalo, předpokládalo separátní zachování leptonového náboje elektrového a mionového typu a v důsledku toho odlišení „elektronového neutrina“  $\nu_e$  a „mionového neutrina“  $\nu_\mu$  (aby nevzniklo nedorozumění, zdůrazněme, že leptonový náboj se v takovém schématu zachovává i v rozpadech pionu, ale výše zmíněná dominance „mionového módu“ s tímto zákonem zachování samozřejmě nijak nesouvisí.)

Experimentální test odlišnosti  $\nu_e$  a  $\nu_\mu$  vyžaduje podrobné studium srážek neutrín, pocházejících z rozpadu pionů (nebo kaonů), s nukleony – konkrétně jde o přesnou identifikaci nabitéch leptonů produkovaných v takových reakcích. Pokud počáteční neutrino skutečně nese leptonový náboj mionového typu a ten se v interakci zachovává, budou se produkovat pouze miony. Kdyby ovšem existoval jen jeden typ neutrina, vznikal by při jeho srážce s nukleonem zhruba se stejnou pravděpodobností elektron i mion (účinné průrezy těchto reakcí totiž jen slabě závisí na hmotnostech leptonů). Tento myšlenkový experiment, který nezávisle na sobě navrhli Bruno Pontecorvo a Melvin Schwartz, je koncepcně jednoduchý, ale jeho praktická realizace je značně obtížná. Problém je opět v tom, že vzhledem k malým účinným průřezům pro slabé interakce je zapotřebí nejen velký detektor, ale především dostatečně intenzívny zdroj vysokoenergetických neutrín. V daném případě jej může poskytnout protonový urychlovač, který produkuje (ve srážkách primárního svazku s terčíkem) hojně množství sekundárních pionů a kaonů a z jejich rozpadu za letu pak vznikají neutrina a antineutrina. Neutrinový svazek s patřičnými parametry umožnil vytvořit až první urychlovače nové generace (založené na principu tzv. silné fokusace), které dávaly protony s energií citelně větší než 10 GeV a byly v letech 1959 a 1960 dokončeny v CERN a v Brookhavenu.



Melvin Schwartz  
1932–



Leon Lederman  
1922–



Jack Steinberger  
1921–

Tým z Brookhavenu, který pracoval na urychlovači AGS (Alternating Gradient Synchrotron) s primárním svazkem protonů s energií 15 GeV, oznámil první pozorování neutrinových interakcí v roce 1962. Vzhledem k jejich předpokládané nepatrné četnosti bylo velmi důležité docílit maximální redukce pozadí k hledaným případům v detektoru. Pro představu o měřítku takového experimentu snad stojí za zmínu, že součástí odstínění byla také železná stěna o tloušťce 13,5 m (materiál na její stavbu pocházel z vyřazených kříženků amerického válečného námořnictva) a

jako detektor sloužila desetitunová jiskrová komora. Eliminace pozadí a výběr relevantních případů představovaly komplikovanou záležitost, ale čistým výsledkem analýzy získaných dat byl závěr, že nabité leptony produkované v neutrinových interakcích jsou prakticky pouze mioni. To byl tedy přímý důkaz existence dvou různých neutrín  $\nu_e$  a  $\nu_\mu$ . Tři členové brookhavenského týmu – Leon Lederman, Melvin Schwartz a Jack Steinberger – získali za tento

fundamentální výsledek Nobelovu cenu v roce 1988. Dodejme jen, že zmíněný experiment svým významem ve skutečnosti daleko přesáhl rámec řešení původního problému identity neutrina. Otevřel totiž celý nový směr ve fyzice vysokých energií, neboť svazky mionových neutrín produkované výkonnými urychlovači se v následujících letech staly jedním z klíčových prostředků výzkumu v této oblasti a studium neutrinových interakcí mělo rozhodující význam pro další rozvoj částicové fyziky.

Shrneme-li všechny předchozí úvahy, můžeme říci, že ve druhé polovině šedesátých let se obnovil poměrně jednoduchý obraz mikrosvěta. Za elementární částice se daly považovat tři kvarky  $u$ ,  $d$ ,  $s$ , čtyři leptony  $e$ ,  $\nu_e$ ,  $\mu$ ,  $\nu_\mu$  a ovšem také foton  $\gamma$ . Obecným rysem systému byla předpokládaná (přesněji řečeno předpověděná) existence odpovídajících antičastic. Stojí



Emilio Segrè  
1905–1989



Owen Chamberlain  
1920–

za to připomenout, že tato univerzální předpověď skutečně byla – po průkopnickém objevu pozitronu ve třicátých letech – dále brilantně potvrzena v paděsátých a šedesátých letech pozorováním **antibaryonů** (o antičasticích ve spektru mezonů jsme se již zmínili dříve). Mimořádně důležitý byl v tomto ohledu objev **antiprotonu** v roce 1955 na urychlovači Bevatron v kalifornském Berkeley (Emilio Segrè a Owen Chamberlain za něj dostali Nobelovu cenu v roce 1959) a brzy po něm následovaly další. V této souvislosti je třeba poznamenat, že baryony sice nejsou z hlediska kvarkového mo-

du elementární částice, ale existenci antibaryonů – objektů složených ze tří antikvarků – je přirozeně očekávat (totéž ovšem platí také o celých antiatomech a dalších objektech „antihmoty“).

Představa o spektru elementárních fermionů (kvarků a leptonů) byla tedy už v šedesátých letech koncepčně blízká současnému standardnímu modelu. Foton hrál roli „prostředníka“ elektromagnetické interakce v rámci jejího kvantového popisu stejně jako dnes. V kvantové teorii slabých a silných interakcí elementárních čistic však došlo na konci šedesátých let a během sedmdesátých let k dramatickému vývoji, který vedl především k rozšíření spektra „nositelů“ fundamentálních sil – bosonů s jednotkovým spinem, které jsou blízkými příbuznými fotonu. Poněkud nečekaně přitom přibylo i fundamentálních fermionů, z nichž některé byly předpovězeny na základě teoretických úvah. Ve zbytku tohoto přehledu popíšeme historii odhalování podstaty fundamentálních interakcí a s ní související postupné rozšíření katalogu elementárních čestic až do podoby známé dnes. Uvidíme přitom, že vznik a „konsolidace“ současného standardního modelu mikrosvěta (v období od konce šedesátých let až po samotný konec 20. století) je fascinujícím příkladem souhry a vzájemného ovlivňování teorie a experimentu.

## KVANTOVÁ ELEKTRODYNAMIKA A FEYNMANOVY DIAGRAMY

---

Chceme-li objasnit základní principy dnešního standardního modelu, musíme začít stručnou rekapitulací kvantové teorie elektromagnetických sil – **kvantové elektrodynamiky** –, která v mnoha ohledech sloužila jako vzor při formulaci moderních teorií slabých a silných interakcí. Kvantová elektrodynamika (v dalším budeme často užívat všeobecně rozšířené anglické zkrat-

ky QED) vznikla už na přelomu dvacátých a třicátých let 20. století, brzy po kvantové mechanice, ale svou moderní podobu dostala až asi o dvacet let později. Poněkud formálně řečeno, QED je teorie kvantovaného elektromagnetického pole (jemuž odpovídají fotony), interagujícího s nabitémi částicemi – např. s elektrony a pozitrony. Nabité částice se přitom také interpretují jako kvanta určitého pole; to však nemá klasickou fyzikální analogii jako pole elektromagnetické. Rovnice QED nelze řešit přesně a je třeba se uchýlit k přibližným metodám. Nejznámější takovou metodou, ostatně běžně užívanou ve všech modelech kvantové teorie, je tzv. **poruchový rozvoj**. Ten je založen na představě, že příslušná interakce je dostatečně slabá a její efekt lze přibližně započítat jako relativně malou korekci k volnému pohybu částic. Vyjádřeno matematicky to znamená, že síla interakce (chápané jako „porucha“ ve volném pohybu) je charakterizována nějakým malým parametrem a přibližně hodnoty fyzikálně zajímavých veličin – jako je třeba účinný průřez rozptylu nebo rozpadová pravděpodobnost – se vyjadřují pomocí systematického rozvoje v mocninách takového parametru. Jednotlivé členy mocninné řady lze přitom v rámci kvantové teorie pole spočítat v zásadě vždy, pomocí více či méně technicky komplikovaného algoritmu. V kvantové elektrodynamice je charakteristickým (bezrozměrným) malým parametrem tzv. konstanta jemné struktury,  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar \cdot c}$  (název má původ v atomové spektroskopii), jejíž numerická hodnota je blízká 1/137. Samotná síla elektromagnetické interakce kvantovaných polí je úměrná elementárnímu náboji  $e$  a poruchový rozvoj je proto přirozeně uspořádán v mocninách  $\sqrt{\alpha}$ .

Moderní verze QED je neodmyslitelně spojena s univerzálním „obrázkovým písmem“ kvantové teorie pole – **Feynmanovými diagramy** (grafy), které, jak sám název napovídá, vynalezl jeden z nejpopulárnějších fyziků dvacátého století Richard Feynman.

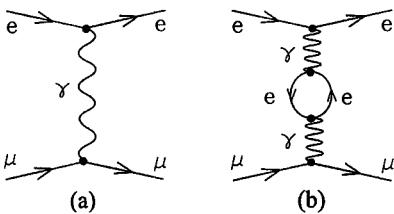


Richard Feynman  
1918–1988

Tato technika spočívá v grafické reprezentaci matematických výrazů, které vznikají při výpočtech v rámci poruchového rozvoje. Přesněji řečeno – použijeme-li formálního jazyka kvantové teorie – konkrétní Feynmanův diagram pro určitý proces (například rozptyl nebo rozpad) představuje dílký příspěvek k „elementu  $S$ -matice“, který obecně dává „amplitudu pravděpodobnosti“ toho, že k uvažovanému procesu dojde (označení  $S$  pochází od anglického, resp. německého výrazu pro rozptyl: „scattering“, resp. „Streuung“). Kvadrát absolutní hodnoty elementu  $S$ -matice pak podle standardního pravidla kvantové teorie vyjadřuje pravděpodobnost daného procesu a z ní lze poměrně jednoduše dostat relevantní experimentálně měřitelnou veličinu, jako je např. účinný průřez. Konkrétní Feynmanův graf vždy odpovídá určitému rádu poruchového rozvoje (tj. určité mocnině příslušného malého parametru) a úplný element  $S$ -matice odpovídající uvažovanému procesu je formálně

součtem všech relevantních diagramů (rozumí se ve všech řádech). Sečít všechny diagramy pro daný proces je ovšem nadlidský úkol, protože jich zpravidla přispívá nekonečně mnoho (s rostoucím řádem poruchového rozvoje přitom jejich počet dramaticky roste). Pro přibližný výpočet však naštěstí obvykle stačí omezit se na několik prvních řádů nebo dokonce jen na nejnižší z nich – technika Feynmanových diagramů se pak stává skutečně praktickým a efektivním nástrojem kvantové teorie pole.

Příklady Feynmanových diagramů kvantové elektrodynamiky jsou uvedeny na obr. 5. Oba odpovídají procesu pružného rozptylu elektronu a mionu (připomeňme, že termínem „pružný rozptyl“ obecně označujeme proces, kde v počátečním i koncovém stavu figurují stejné částice). Venější linie znázorňují počáteční a koncové částice – zde tedy elektron a mion před srázkou a po srážce. Vlastní elektromagnetické interakci odpovídá vrchol (tj. uzlový bod diagra-



Obr. 5 Příklady Feynmanových diagramů v kvantové elektrodynamice:

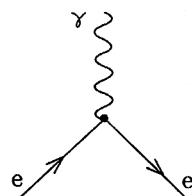
- (a) stromový diagram 2. řádu
- (b) diagram 4. řádu s jednou uzavřenou smyčkou.

popsat jako vyzáření virtuálního fotonu počátečním elektronem a jeho následnou absorpcí mionem. Foton přitom nese čtyřhybnost (tj. energii a hybnost), která je dána zákony zachování ve vrcholech diagramu; energie a hybnosti nabitéch častic se tedy v důsledku interakce změní odpovídajícím způsobem. Tento graf také představuje nejjednodušší ilustraci často užívaného tvrzení (o němž jsme se již zmínili dříve), že v kvantové teorii je elektromagnetická interakce popsána „výměnou fotonu“. Diagram (b) znázorňuje komplikovanější „virtuální průběh“ stejného fyzikálního procesu, kdy mezi emisí a absorpcí vyměňovaného fotonu ještě dojde ke vzniku a následnému zániku elektron-pozitronového páru. Je zřejmé, že analogicky lze nakreslit dalších několik diagramů čtvrtého řádu a libovolný počet diagramů reprezentujících vyšší řády poruchového rozvoje – v zásadě jde pouze o přidávání dalších vrcholů a vnitřních linii k základnímu grafu na obr. 5(a). Při konstrukci lze ovšem užívat jen základní interakční vrchol QED, který je pro větší přehlednost reprodukován na obr. 6.

Jazyk Feynmanových grafů, který vznikl na konci čtyřicátých let, nepochybň významně stimuloval rozvoj moderní kvantové teorie pole a hlavně zpřístupnil tuto abstraktní a obtížnou disciplínu poměrně širokému okruhu fyziků (včetně experimentátorů). Symbolika diagramů je skutečně velmi přehledná a sugestivní, ale tím spíš je na místě varování před zjednodušujícími laickými interpretacemi. Jde zejména o výše zmíněnou charakterizaci elektromagnetické interakce jako „výměny fotonu“. Taková populární představa samozřejmě pouze reflekтуje strukturu Feynmanových diagramů a není možno brát ji příliš doslova. „Vyměňovaný foton“ je obecně virtuální (tj. nikoli reálný) a jeho energie a hybnost jsou dány pouze zákony zachování ve vrcholech diagramu; spočteme-li formálně (pomocí standardního vztahu relativistické kinematiky) kvadrát jeho hmotnosti, můžeme dostat v podstatě libovolnou (třeba i zápornou) hodnotu. Striktně vzato, vnitřní linie diagramu vždy reprezentuje matematickou veličinu zvanou „propagátor“ (určitého kvantovaného pole); v diagramech na obr. 5 figurují takové linie jak pro elektromagnetické, tak i elektron-pozitronové pole. V běžné řeči se přitom obvykle mluví o propagátoru fotonu, elektronu apod. Dodejme ještě, že vnějším liniím odpovídají, zhruba řečeno, kvantově-mechanické vlnové funkce počátečních a koncových častic. V této souvislosti stojí také za zmínu, že výměna virtuálního fotonu v diagramu na obr. 5(a) je v limitním „kvazistatickém“ případě matematicky ekvivalentní interakci nabitéch častic prostřednictvím dobré známého Coulombova potenciálu (takovou korespondenci lze ovšem očekávat,

mu), v němž se setkávají dvě (plné) linie nabitéch častic a jedna (vlnitá) linie fotonu. V daném případě jde o foton „virtuální“, neboť zde nefiguruje jako fyzikální částice v počátečním nebo koncovém stavu. Diagram (a) má dva vrcholy a odpovídá druhému řádu poruchového rozvoje, zatímco (b) z analogického důvodu reprezentuje příspěvek čtvrtého řádu.

Hlavní původ Feynmanových diagramů spočívá v tom, že na jedné straně formálně reprezentují určité matematické výrazy (které lze např. na základě několika poměrně jednoduchých pravidel), ale zároveň jakoby znázorňují konkrétní mechanismus průběhu uvažovaného procesu. Např. diagram (a) na obr. 5 lze slovně



Obr. 6 Interakční vrchol pro Feynmanovy diagramy v QED

neboť kvantová elektrodynamika by měla obsahovat předchozí jednodušší teorie jako mezní případ.

Podle výpočetní složitosti lze Feynmanovy diagramy rozdělit na dvě základní kategorie. Do první z nich patří ty, jež neobsahují uzavřené smyčky vnitřních linií (jako příklad může sloužit obr. 5(a)); v technickém žargonu se nazývají „stromové diagramy“. Podle standardních pravidel lze jejich příspěvky vyjádřit čistě algebraickými operacemi, obecně řečeno násobením matic. Do druhé kategorie patří diagramy s uzavřenými smyčkami (viz například obr. 5(b)). Při výpočtu příspěvku takového grafu je zapotřebí – kromě jednoduché algebry – také integrace přes čtyřynost virtuální částice ve smyčce (ta může nabývat libovolné hodnoty, neboť zákony zachování ve vrcholech ji neurčují). To je ale v mnoha případech kámen úrazu, neboť i pro nejjednodušší diagramy s jednou uzavřenou smyčkou je takový integrál obvykle divergentní, tj. má formálně nekonečnou hodnotu. Typicky je to způsobeno chováním integrovaného výrazu pro velké hodnoty energií a hybností virtuálních častic ve smyčce a proto se v takovém případě mluví o „ultrafialové divergenci“ (velká hodnota energie odpovídá vysoké ekvivalentní frekvenci). Divergence ve vyšších řádech poruchového rozvoje byly odhaleny již na začátku třicátých let, tj. dávno před vznikem metody Feynmanových diagramů (jedním z prvních teoretiků, kteří na ně při výpočtech narazili, byl Robert Oppenheimer, známý spíše jako pozdější tvůrce americké nukleární bomby). Tyto technické potíže, jež se zpočátku jevily jako fatální nebezpečí pro celý koncept kvantové teorie pole, se naštěstí podařilo úspěšně vyřešit koncem čtyřicátých let, kdy byla formulována procedura známá jako **renormalizace**. Podrobnější diskuse tohoto důležitého pojmu by daleko přesáhla rámec našeho pojednání a omezíme se proto jen na několik stručných poznámek.

Při renormalizaci jde v zásadě o změnu interpretace některých parametrů vcházejících původně do výpočtu, jako je např. hmotnost a náboj elektronu (resp. mionu atd.). Tak například část příspěvku diagramu na obr. 5(b) lze chápat jako opravu k původnímu „holému“ náboji a všechny výsledky pak vyjádřit pomocí fyzikálního náboje, jehož hodnota se měří. V této souvislosti je také přirozeně definovat „efektivní náboj“ závislý na hybnosti virtuálního fotonu, emitovaného při interakci odpovídající podmínkám měření. Poněkud názorněji lze takový efektivní náboj brát jako závislý na vzdálenosti, na níž se provádí jeho měření (obvyklá hod-

nota  $e$ , pro niž  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar \cdot c} = \frac{1}{137}$ , odpovídá velké – tj. matematicky nekonečné – vzdálenosti).

Při takovém postupu jsou tedy ultrafialově divergentní části relevantních Feynmanových grafů vyššího řádu „pohlceny“ v redefinici původních parametrů a takto „renormalizovaná“ hodnota elementu  $S$ -matice dává malou korekci k diagramům nejnižšího řádu, přesně v duchu obecné ideje poruchového rozvoje. Vzhledem k tomu, že takové příspěvky odpovídají – v řeči Feynmanových grafů – emisi a absorpci virtuálních častic, užívá se pro ně obecně termín „radiační korekce“.

Z technického hlediska je důležité, že v QED lze eliminace ultrafialových divergencí dosáhnout *konečným* počtem kroků (tj. renormalizací *konečného* počtu veličin) v libovolně vysokém řádu poruchového rozvoje; tento pozoruhodný fakt byl teoreticky dokázán na přelomu čtyřicátých a padesátých let. V duchu běžně přijaté terminologie se modely kvantové teorie pole s touto vlastností nazývají **renor-**



Sin-itiro Tomonaga  
1906–1979



Julian Schwinger  
1918–1994

**malizovatelné** (přesněji řečeno „renormalizovatelné v rámci poruchového rozvoje“ nebo stručně „poruchově renormalizovatelné“). Striktně vzato, renormalizovatelnost sama o sobě není fundamentálním kritériem „správnosti“ dané teorie, neboť se vztahuje právě k metodě poruchového rozvoje (tj. k Feynmanovým diagramům). Pro praktické výpočty je však tento aspekt velmi důležitý a není proto divu, že se QED zejména v padesátých a šedesátých letech rychle rozvíjela a stala se „učebnicovým“ modelem teorie pole. Na rozvoji metod a aplikací kvantové elektrodynamiky se významně podílela celá řada teoretiků; mezi nejzasloužilejší se v tomto ohledu dají počítat Freeman Dyson, Richard Feynman, Julian Schwinger a Sin-itiro Tomonaga. Poslední tři získali za svůj přínos Nobelovu cenu v roce 1965.

Jednou z historicky prvních úspěšných aplikací kvantové elektrodynamiky je výpočet vlastního (spinového) magnetického momentu elektronu. Nejnižší aproximace (v níž se kvantová povaha elektromagnetického pole fakticky neuplatní) vede k výsledku, který dostal již

Dirac v roce 1928, a sice  $\mu_e = \mu_B = \frac{e \cdot \hbar}{2m_e}$ ; připomeďme, že  $\mu_B$  je veličina v atomové fyzice

tradičně nazývaná „Bohrův magneton“<sup>6</sup>. Ve vyšších rádech poruchového rozvoje QED se dostanou radiační korekce k této základní hodnotě, jež představují skutečný efekt dynamiky kvantovaných polí. První takovou korekci (rádu  $\alpha$ ) spočítal v roce 1947 J. Schwinger a s jím zahrnutím lze předpověď pro magnetický moment elektronu psát jako

$$\mu_e = \mu_B \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} + \dots\right), \quad (5)$$

kde „...“ symbolizuje příspěvky vyšších rádů, počínaje mocninou  $\alpha^2$ . Schwingerův výpočet byl vlastně reakcí na nová experimentální data, zveřejněná krátce předtím na konferenci v Shelter Island v USA. Zatímco dřívější měření až do té doby velmi dobře souhlasila (v mezích pozorovacích chyb) s Diracovou hodnotou, nové přesnější výsledky z experimentu, který provedl Isidor Rabi se svými spolupracovníky, dávaly „anomální magnetický moment“ s hodnotou o jedno promile větší. To bylo ovšem v pozoruhodné shodě se Schwingerovým výsledkem (5), který předpovídá numerickou hodnotu korekce 0,00116. Vynikající souhlas teoretických výpočtů a experimentálních dat na úrovni velmi jemných efektů tak jasně naznačil, že radiační korekce kvantové elektrodynamiky nejsou pouhým matematickým artefaktem, nýbrž že opravdu představují fyzikální realitu. Jinými slovy, úspěšná konfrontace teoretických předpovědí ve vyšších rádech poruchového rozvoje QED a přesných experimentálních dat rozptýlila určité počáteční pochybnosti o smyslu procedury renormalizace, což výrazně posílilo postavení kvantové teorie pole jako relevantní metody pro popis interakcí v mikrosvětě. Dodejme ještě, že výpočty i měření magnetického momentu elektronu se v následujících letech dále zpřesňovaly (výpočet je nyní proveden do rádu  $\alpha^4$ ) a v současné době je jeho „anomální část“ (tj. odchylka od Diracovy hodnoty) jednou z nejlépe určených fyzikálních veličin vůbec – teorie a experiment spolu souhlasí na 9 platných cifer! Podobně je tomu i v případě magnetického momentu mionu, kde je ovšem přesnost měření asi o dva rády nižší. Dalších úspěšných (tj. experimentálně potvrzených) teoretických předpovědí v rámci QED by bylo možno uvést celou řadu.

## SLABÁ INTERAKCE

Kvantová elektrodynamika byla od samého začátku ideálním modelem pro testování idejí a technik kvantové teorie pole, neboť tvar elektromagnetické interakce byl dobře znám na základě klasické analogie. V případě slabých a silných interakcí je ovšem situace podstatně od-

<sup>6</sup> Dirac učinil tuto předpověď na základě své slavné relativistické kvantově-mechanické rovnice pro elektron, v níž jsou elektromagnetické síly popsány pomocí předem zadанého vnějšího pole, tj. v podstatě klasicky. Právě o tomto výsledku jsme se již letmo zmínili na konci 1. kapitoly.

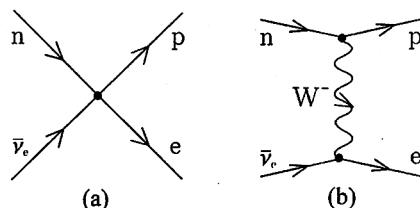
lišná: vzhledem ke svému velmi krátkému dosahu tyto síly nepůsobí v makroskopickém měřítku a pro jejich popis tak neexistuje žádný klasický návod. Jediným zdrojem informace o povaze těchto interakcí jsou proto reakce subatomových částic, tj. rozptylové a rozpadové procesy. V této kapitole popíšeme vývoj představ o slabé interakci, který předchází vzniku současného standardního modelu. Přejdeme také k přirozené soustavě jednotek (obvykle užívané ve fyzice částic), v nichž  $\hbar = c = 1$ .<sup>7</sup>



Enrico Fermi  
1901–1954

Jak jsme se již zmínili v úvodní kapitole, slabá interakce byla původně identifikována jako „slabá jaderná síla“ odpovědná za radioaktivní beta-rozpad některých atomových jader. První kvantitativní teorii beta-radioaktivity jakožto procesu rozpadu neutronu na proton, elektron a (anti)neutrino,  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  formuloval v roce 1934 Enrico Fermi. Předpokládal, že interakce mezi zúčastněnými částicemi je „prímá“, tj. že není zprostředkována výměnou žádné další částice – to odpovídá představě nulového dosahu působící síly (jde přitom ovšem o modelové zjednodušení fyzikálně realistického odhadu, že slabá interakce má dosah mnohem kratší než je např. rozměr atomového jádra). Taková kontaktní interakce je formálně ekvivalentní výměně nekonečně těžké částice (připomeďme, že dosah interakce je obecně dán Comptonovou vlnovou délkou zprostředkující částice, která je nepřímo úměrná její hmotnosti). Lze si tedy také představit, že slabá interakce velmi krátkého dosahu je způsobena výměnou velmi těžké částice a že za určitých okolností bude takový model experimentálně prakticky nerozlišitelný od teorie Fermiho typu. O této alternativě se skutečně začalo uvažovat poměrně brzy, už na konci třicátých let (jako jeden z prvních s takovou myšlenkou přišel Hideki Yukawa a nezávisle na něm také Oskar Klein). Pro příslušnou hypotetickou zprostředkující částici se časem ujalo přirozené označení W (z anglického „weak“). Bylo okamžitě zřejmé, že taková částice – jakožto nositel interakce mezi čtyřmi fermiony – musí být nutně boson. Pro W se proto začalo běžně užívat termínu **intermediální boson**. Jelikož při beta-rozpadu dochází ke změně náboje nukleonu, je také zřejmé, že W musí nést jednotkový elektrický náboj (to znamená, že fakticky je třeba předpokládat existenci dvojice  $W^+$ ,

Jak jsme se již zmínili v úvodní kapitole, slabá interakce byla původně identifikována jako „slabá jaderná síla“ odpovědná za radioaktivní beta-rozpad některých atomových jader. První kvantitativní teorii beta-radioaktivity jakožto procesu rozpadu neutronu na proton, elektron a (anti)neutrino,  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  formuloval v roce 1934 Enrico Fermi. Předpokládal, že interakce mezi zúčastněnými částicemi je „prímá“, tj. že není zprostředkována výměnou žádné další částice – to odpovídá představě nulového dosahu působící síly (jde přitom ovšem o modelové zjednodušení fyzikálně realistického odhadu, že slabá interakce má dosah mnohem kratší než je např. rozměr atomového jádra). Taková kontaktní interakce je formálně ekvivalentní výměně nekonečně těžké částice (připomeďme, že dosah interakce je obecně dán Comptonovou vlnovou délkou zprostředkující částice, která je nepřímo úměrná její hmotnosti). Lze si tedy také představit, že slabá interakce velmi krátkého dosahu je způsobena výměnou velmi těžké částice a že za určitých okolností bude takový model experimentálně prakticky nerozlišitelný od teorie Fermiho typu. O této alternativě se skutečně začalo uvažovat poměrně brzy, už na konci třicátých let (jako jeden z prvních s takovou myšlenkou přišel Hideki Yukawa a nezávisle na něm také Oskar Klein). Pro příslušnou hypotetickou zprostředkující částici se časem ujalo přirozené označení W (z anglického „weak“). Bylo okamžitě zřejmé, že taková částice – jakožto nositel interakce mezi čtyřmi fermiony – musí být nutně boson. Pro W se proto začalo běžně užívat termínu **intermediální boson**. Jelikož při beta-rozpadu dochází ke změně náboje nukleonu, je také zřejmé, že W musí nést jednotkový elektrický náboj (to znamená, že fakticky je třeba předpokládat existenci dvojice  $W^+$ ,



Obr. 7 Feynmanovy diagramy nejnižšího řádu pro proces  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$   
(a) v modelu Fermiho typu  
(b) v modelu s intermediálním bosonem.

Vycházející antičástice (zde  $\bar{\nu}$ ) se obecně znázorňuje vycházející linií.

<sup>7</sup> V této soustavě má hmotnost stejný rozměr jako hybnost a energie, a lze ji proto udávat v násobcích eV. Délka a čas mají stejný rozměr, a sice [energie]<sup>-1</sup>. Převod fyzikálních veličin (např. účinných průřezů apod.) do SI lze snadno provést s využitím „konverzní konstanty“  $\hbar \cdot c \approx 197 \text{ fm} \cdot \text{MeV}$ , kde 1 fm (femtometr, ve světové literatuře často fermi) je  $10^{-15} \text{ m}$ : tak např. délka 1 GeV<sup>-1</sup> v přirozené soustavě jednotek odpovídá přibližně 0,2 fm v obyčejné soustavě. Elektrický náboj je v přirozené soustavě jednotek bezrozměrný a jednoduše souvisejí s elektromagnetickou vazbou konstantou zmíněnou v předešlé kapitole. Nadále budeme užívat označení  $e$  pro veličinu  $\sqrt{4\pi \cdot \alpha}$ , kde  $\alpha$  je konstanta jemné struktury; tato konvence je dnes standardní v naprosté většině literatury o fyzice elementárních částic.

$W^+$  jako částice a antičástice). Přehlednou ilustraci obou modelů slabé interakce poskytuje základní Feynmanovy diagramy pro proces rozpadu neutronu znázorněné na obr. 7.

Sílu interakce Fermiho typu charakterizuje parametr  $G_F$  (**Fermiho konstanta**), který má rozměr  $[\text{energie}]^{-2}$  a numerickou hodnotu zhruba  $10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$  (hodnota  $G_F$  je dnes ve skutečnosti známa s velkou přesností).<sup>8</sup> Příspěvek diagramu 1. řádu na obr. 7(a) je tedy úměrný  $G_F$ . Obecně lze říci, že Fermiho interakce je slabá pro dostatečně malé energie čistic zúčastněných v daném procesu, přesněji řečeno pro energie mnohem menší než  $G_F^{-1/2} \doteq 300 \text{ GeV}$  (máme tím na mysli např. energii srážky dvou častic v jejich těžišťové soustavě). V této souvislosti je na místě následující poznámka: Porovnat např. sílu elektromagnetické a slabé interakce přímo na základě relativní velikosti parametrů  $\alpha$  a  $G_F$  samozřejmě nelze, protože Fermiho konstanta není bezrozumná. Je možné pouze srovnat stejně měřitelné veličiny (jako je účinný průřez nebo rozpádová pravděpodobnost) pro fyzikální procesy charakteristické pro tyto dvě interakce. Pak ovšem vyjde najevo, že typický elektromagnetický proces skutečně má (při dostatečně nízkých energiích) účinný průřez o několik řádů vyšší než např. typická reakce s účastí neutrina. Právě v tomto smyslu je tedy slabá interakce „slabá“.

Síla interakce v modelu s intermediálním bosonem  $W$  je charakterizována bezrozumným parametrem  $g$  (obvykle nazývaným „vazbová konstanta slabé interakce“ nebo prostě „slabá vazbová konstanta“) a příspěvek diagramu 2. řádu na obr. 7(b) je tedy úměrný  $g^2$ . Je zřejmé, že boson  $W$  hraje ve slabé interakci analogickou roli jako foton v kvantové elektrodynamice a  $g^2$  je přirozeným protějškem elektromagneticke konstanty jemné struktury  $\alpha$ . S využitím standardních Feynmanových pravidel se dá snadno ukázat, že v limitě nízkých energií (kdy hybnost virtuálního  $W$  lze zanedbat proti jeho klidové hmotnosti) jsou příspěvky diagramů na obr. 7(a) a 7(b) prakticky stejné, pokud platí vztah

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8m_W^2}. \quad (6)$$

Ten mimo jiné také ukazuje, že potlačení slabých procesů proti elektromagnetickým v oblasti nízkých energií lze přirozeně vysvětlit velkou hmotností intermediálního bosonu  $W$  (předpokládáme-li zároveň, že  $g$  se výrazně neliší od  $e = \sqrt{4\pi \cdot \alpha}$ ).

Moderní éra částicové fyziky přinesla podstatně hlubší chápání významu slabé interakce. Jakmile se totiž na scéně objevil mion, pion a posléze také podivné mezony a baryony (o nichž byla řec v kapitolách „Záčátek moderní éry – mion a pion“ a „Podivné částice“), začalo být zřejmé, že původní „slabá jaderná síla“ je ve skutečnosti jen jedním z projevů *univerzální* interakce, zodpovědné za většinu rozpádů nestabilních subatomových častic. Přívlastek „univerzální“ v tomto kontextu znamená, že síla takové interakce je v podstatě určena jediným základním parametrem – Fermiho konstantou  $G_F$  (v tomto ohledu je tedy slabá interakce podobná elektrodynamice, jejímž rozhodujícím parametrem je vazbová konstanta  $e$ ).

Toto poněkud obecné tvrzení je nyní třeba upřesnit. Ve vývoji představ o univerzální slabé interakci Fermiho typu hrál mimořádně důležitou roli rozpad mionu. Jak jsme se již zmínili dříve,

<sup>8</sup> Je třeba zdůraznit, že slabá interakce není jen „destruktivní“ silou zodpovědnou za rozpady subjaderných častic. Jako příklad slabého procesu, který má mimořádný význam v našem praktickém životě, je možno uvést reakci  $p + p \rightarrow p + n + e^+ + e^-$  (s následným vznikem deuteronu z protonu a neutronu). Tento proces je totiž základem řetězce termojaderných reakcí, jež jsou zdrojem energie produkovánou ve Slunci (z tohoto důvodu je také Slunce vydatným zdrojem neutrín – každou sekundu jich čtvrtěčním metrem zemského povrchu proletí desítky miliar). Na velikosti Fermiho konstanty  $G_F$  tedy podstatně závisí teplota Slunce, a tudíž např. i povaha klimatu na Zemi.

v tomto procesu vzniká elektron a dvě neutrina a jako takový byl v podstatě správně popsán již okolo roku 1949. Ukázalo se, že střední doba života mionu odpovídá zhruba stejně efektivní Fermiho konstantě jako doba života neutronu<sup>9</sup> a toto zjištění se stalo faktickým základem konceptu univerzality slabých interakcí. Během padesátých let se navíc také vyjasnilo, že i rozpad pionu (na mion a neutrino) lze celkem úspěšně parametrisovat pomocí takové univerzální Fermiho konstanty. Pokud jde o podivné mezony a baryony, situace byla poněkud složitější, ačkoli i zde bylo od samého začátku víceméně zřejmé, že jejich doby života typicky odpovídají slabé interakci. Poměrně brzy byla odhalena některá empirická výběrová pravidla pro slabé rozpady hadronů; podle základního z nich (o němž jsme se letmo zmínili již v kapitole „Podivné částice“) se podivnost může měnit nejvýše o jednotku. Začátkem šedesátých let však vyšel najevu další důležitý detail: ukázalo se totiž, že procesy se změnou podivnosti jsou ve skutečnosti mírně (nicméně zřetelně) potlačené proti těm, v nichž se podivnost nemění. Toto potlačení bylo přitom možno charakterizovat efektivní Fermiho konstantou zhruba o řad menší, než je hodnota odpovídající rozpadu mionu. Na první pohled tak byla poněkud zpochybňena základní myšlenka teorie univerzální slabé interakce, tím spíš, že velmi přesná měření beta-rozpadu neutronu posléze také vedla k hodnotě Fermiho konstanty nepatrně odlišné od té, která odpovídala rozpadu mionu.

Koncept univerzality zachránil Nicola Cabibbo, který si v roce 1963 všiml jedné pozoruhodné souvislosti mezi známými slabými procesy. Označme-li totiž jako  $G_F$  Fermiho konstantu určenou z rozpadu mionu, pak pro hadronové procesy bez změny podivnosti (tj. speciálně pro beta-rozpad) má „efektivní“ Fermiho konstanta hodnotu  $G_F \cdot \cos \theta_C$ , zatímco v případě přechodů se změnou podivnosti vychází  $G_F \cdot \sin \theta_C$ ; experimentálním datům přitom odpovídá Cabibbov úhel  $\theta_C$  s hodnotou přibližně  $13^\circ$  ( $\sin 13^\circ \approx 0,22$ ). V rámci kvarkového modelu, který o rok později publikoval M. Gell-Mann, lze „Cabibbovu univerzalitu“ elegantně popsat jako směšování (mixing) kvarků  $d$  a  $s$ : do slabé interakce vchází spolu s kvarkem  $u$  kombinace  $d \cdot \cos \theta_C + s \cdot \cos \theta_C$  a základním interakčním parametrem je  $G_F$ . Pro úplnost ještě uvedeme, že souvislost mezi „univerzální Fermiho konstantou“  $G_F$  a střední dobou života mionu  $\tau_\mu$  je dána (až na malé korekce) vztahem

$$\tau_\mu^{-1} = \frac{G_F^2 \cdot m_\mu^5}{192\pi^3}. \quad (7)$$

Univerzální teorie slabých interakcí leptonů a kvarků lze samozřejmě ekvivalentně formulovat pomocí intermediálního bosonu W – základními parametry pak jsou bezrozměrná vazbová konstanta  $g$  a hmotnost  $m_W$ , jež splňují vztah (6). Jak už bylo řečeno, takový model je koncepčně blízký kvantové elektrodynamice, neboť W hráje ve Feynmanových diagramech slabých procesů podobnou roli jako foton v procesech elektromagnetických. Použijeme-li obvyklého formálního jazyka, lze říci, že pole odpovídající částicím W interaguje se slabým fermionovým proudem (jehož části jsou v diagramu na obr. 7(b) reprezentovány dvojicemi nukleonů a leptonů), podobně jako elektromagnetické pole interaguje s proudem elektromagnetickým. V technickém žargonu částicové fyziky se slabý proud vázaný na W nazývá „nabitý“, neboť odpovídá dvojici fermionů s odlišným nábojem (v duchu této terminologie je tedy elektromagnetický proud „neutrální“).

Zatímco už v počátcích kvantové teorie bylo dobře známo, že foton má jednotkový spin, možná hodnota spinu W jakožto hypotetického prostředníka slabé interakce představovala ve třicátých a čtyřicátých letech zcela otevřený problém. Bez nadsádky lze říci, že nalezení definitivní odpovědi na tuto klíčovou otázkou trvalo téměř 25 let. Abychom předešli nedorozumě-

<sup>9</sup> Neutron přitom ovšem žije mnohem déle než mion, z čistě kinematických důvodů. Diskuse takových detailů by však přesáhla rámec tohoto populárního přehledu.

ní, je třeba zdůraznit, že experimentální určení hodnoty spinu intermediálního bosonu W, které máme na mysli, bylo *nepřímé*, tj. nevyžadovalo jeho přímou detekci. Řešení tohoto problému lze totiž převést na identifikaci některých základních algebraických vlastností slabých nabitých proudů (jež ovšem figurují i v kontaktní interakci Fermiho typu). Ty je skutečně možno testovat experimentálně i při relativně nízkých energích a z charakteru proudů pak lze okamžitě usoudit, jaké jsou algebraické vlastnosti pole popisujícího částice W – konkrétně, zda se jedná o skalár, vektor či tenzor (vůči Lorentzovým transformacím speciální teorie relativity). Skalárnímu poli přitom odpovídá spin 0, vektorovému spin 1 a tenzorovému spin 2. Analýza řady obtížných experimentů (v kombinaci s pozoruhodnou intuicí teoretiků) nakonec vedla k závěru, že pokud boson W existuje, musí mít spin 1, tzn. odpovídá vektorovému poli; od té doby se také začal běžně užívat termín **intermediální vektorový boson**.

Tento výsledek byl samozřejmě „nejlepší z možných“, protože podstatně prohloubil analogii mezi slabou a elektromagnetickou interakcí. Samotná cesta k němu však nebyla ani zdalek přímočará a proto je snad na místě její stručná rekapitulace. Jak už bylo řečeno, všechno začalo v polovině třicátých let Fermiho teorii slabé jaderné síly. Z dnešního hlediska je pozoruhodné, že obsahovala vektorové proudy a byla tedy fakticky ekvivalentní určitému modelu intermediálního bosonu s jednotkovým spinem (při formulaci své teorie Fermi zřejmě použil analogii s elektromagnetickým proudem). V první polovině padesátých let naopak převládl názor (podpořený zejména některými tehdejšími výsledky měření úhlových korelací elektronu a antineutrina v beta-rozpadu), že ve slabé interakci jsou relevantní skalární a tenzorové členy (což by odpovídalo intermediálním bosonům se spinem 0 a 2). Situace se však změnila po fundamentálním objevu **nezachování parity**. Ten měl pro čisticovou fyziku skutečně zcela mimořádný význam a proto se u něj na chvíli zastavíme.

Nezachování parity v daném kontextu znamená narušení symetrie rovnic popisujících slabou interakci vůči inverzi prostorových souřadnic (tj. narušení „zrcadlové symetrie“). Až do poloviny padesátých let se všeobecně předpokládalo, že taková symetrie na úrovni základních přírodních zákonů platí, a např. v případě elektromagnetické interakce to bylo prokázáno i experimentálně. V roce 1956 Chen Ning Yang a Tsung-Dao Lee publikovali práci, v níž ukázali, že zrcadlová symetrie slabých interakcí do té doby fakticky nebyla experimentálně ověřena.



Chen Ning Yang  
1922–



Tsung-Dao Lee  
1926–

Předpokládali proto, že narušení parity je obecně možné a navrhli několik zásadních experimentálních testů. Přímou motivací pro ně tehdy byl jeden zdánlivý paradox v pozorovaných rozpadech podivných kaonů (podle dnešní terminologie šlo o mezon  $K^+$ ) a možnost narušení parity představovala jeho radikální řešení. První experimenty testující zrcadlovou symetrii slabých interakcí se týkaly jaderného beta-rozpadu a sekvence rozpadu pionu a mionu. Rozběhly se ještě na podzim roku 1956 a výsledky tří zcela nezávislých týmů byly publikovány v lednu 1957. Všechny zcela přesvědčivě prokázaly, že parita se nezachovává; na-

víc, ukázalo se, že narušení parity je „maximální“ v tom smyslu, že symetrická i nesymetrická část slabé interakce jsou stejně silné. Teoretici Lee a Yang dostali za svou koncepční průkopnickou práci Nobelovu cenu hned v roce 1957.

Pro vysvětlení pozorovaného maximálního narušení parity navrhli R. Feynman a M. Gell-Mann (a nezávisle na nich R. Marshak a E. Sudarshan) jednoduchou a elegantní

teorii, která zároveň vedla ke striktní předpovědi algebraické struktury slabé interakce. Podle ní měly mít slabé nabité proudy vektorový charakter; přesněji řečeno, byly vyjádřeny jako rozdíl vektoru a pseudovektoru. Tato předpověď byla ovšem v naprostém rozporu s tehdy převládající „módou“, která (jak jsme se zmínili výše) preferovala spíše skalární a tenzorovou formu slabé interakce. Feynman a Gell-Mann přesto trvali na svém, neboť z hlediska teoretické intuice byl jejich model velmi atraktivní a navíc, celou řadu experimentálních dat reprodukoval správně. Ve své práci (publikované 1. 1. 1958) dokonce napsali, že předchozí experimentální výsledky pro úhlové korelace v beta-rozpadu, jež ne-souhlasily s jejich teorií, musí být špatně. Nakonec se ukázalo, že tento poněkud arogantní postoj teoretiků (v duchu hesla „nesouhlasí-li data s teorií, tím hůře pro data“) byl oprávněný, neboť všechny další experimenty Feynman–Gell-Mannova teorie potvrdily. Zvláštní zmínku si zaslouží dva z nich, realizované ještě v roce 1957 v rámci „druhé vlny“ testů nezachování parity. V jednom z těchto experimentů se měřil rozdíl počtu pravotočivých a levotočivých elektronů produkovaných v jaderném beta-rozpadu, tj. veličina nazývaná „stupeň polarizace“. (Poznámka: „Pravotočivost“, resp. „levotočivost“, kterou máme na mysli, odpovídá kladné, resp. záporné helicitě; ta je definována jako projekce spinu na směr pohybu.) Měření prokázala, že při vyšších energiích – v oblasti relativistických rychlostí – jsou elektrony prakticky vždy levotočivé (tj. jejich polarizace je úplná), což přesně odpovídá maximálnímu narušení parity. V druhém (dodnes zcela unikátním) experimentu byla nepřímo změřena helicita neutrina v procesu inverzního beta-rozpadu  $e^- p \rightarrow n \bar{\nu}_e$  a ukázalo se, že neutrino je vždy levotočivé. Tyto dva výsledky fakticky stačí na to, aby potvrdily Feynman–Gell-Mannova teorii (alespoň v sektoru leptonů elektronového typu) a zcela vyvrátily alternativu skalární a tenzorové formy interakce, neboť ta předpovídá ne-souhlasné helicity elektronu a neutrina.

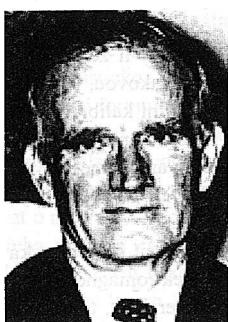
Dá se tedy říci, že v roce 1958 definitivně zvítězila „vektorová“ varianta teorie slabé interakce; jinými slovy, od té doby se dalo považovat za hotovou věc, že pokud existuje intermediální boson  $W$ , musí nutně mít spin 1. Brzy se také objevil další výrazný experimentální argument ve prospěch vektorového charakteru slabé interakce, a sice potlačení elektronového módu v rozpadech nabitého  $\pi$ -mezonu. Jak jsme se už zmínili dříve, pion se prakticky vždy rozpadá na mion a neutrino, zatímco četnost analogického elektronového módu je asi deseti-síkrát menší. To je ve velmi dobrém souhlasu s teorií slabé interakce *vektorového* typu, neboť libovolný takový model automaticky dává potlačující faktor  $m_e^2/m_\mu^2$ , jenž tvoří podstatnou část pozorovaného efektu. Na druhé straně, ve všech modelech skalárního (resp. pseudoskalárního) typu by elektronový mód byl zhruba pětkrát četnější než mionový! Měření relativní četnosti elektronového módu rozpadu nabitého pionu tedy rovněž představuje dramatický test možné hodnoty spinu bosonu  $W$ . Nakonec ještě poznámka k terminologii: Jak už bylo řečeno, proudy figurující ve Feynman–Gell-Mannově teorii jsou rozdílem vektoru a pseudovektoru. Pro pseudovektor se ve fyzikální literatuře obvykle užívá termínu „axiální vektor“, a tak se pro tento model časem vžilo označení  $V - A$  (če se  $V$  minus  $A$ ). Tento technický termín budeme v dalším textu pro stručnost také občas užívat.

Na přelomu padesátých a šedesátých let se tak ustálila teorie slabých interakcí, která měla dvě důležité vlastnosti společné s elektrodynamikou – *univerzalitu* a *vektorový charakter*. Jak jsme se již zmínili dříve, tuto teorii v roce 1963 významně doplnil N. Cabibbo a o rok později bylo možno vyjádřit slabé proudy pomocí kvarkových polí. V rámci kvarkového modelu pak lze např. beta-rozpad neutronu interpretovat jako elementární proces  $d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$  a podobně tomu je i s ostatními slabými reakcemi. V roce 1964 však nečekaně přišel ještě jeden fundamentální objev, který později výrazně ovlivnil vývoj moderní teorie elektroslabých interakcí a

jeho důsledky jsou dodnes předmětem intenzivního experimentálního i teoretického výzkumu. Jedná se o jev, který se často populárně nazývá „asymetrie mezi hmotou a antihmotou“, v technické řeči částicové fyziky pak „narušení  $CP$ -symetrie“ (někdy též „nezachování kombinované parity“). Podrobnější popis tohoto pozoruhodného efektu by poněkud přesáhl rámec našeho pojednání a omezíme se proto jen na několik stručných poznámek.

Jak už víme, Feynman–Gell-Mannova teorie popisuje maximální asymetrii vůči zrcadlovému obrácení prostorových souřadnic (to se označuje jako  $P$ ). Z matematické struktury proudu typu  $V - A$  dále plyne, že je maximálně narušena i symetrie vůči záměně částic za antičástice (označovaná jako  $C$ ). Symetrie vůči kombinaci  $CP$  však v této teorii zůstává zachována a na konci padesátých let bylo již dobře známo, že ji lze experimentálně testovat v rozpadech neutrálních K-mesonů. První signál nezachování kombinované parity byl zaznamenán v roce 1964 v Brookhavenu, v podobě rozpadu tzv. dlouhožijícího neutrálního kaonu  $K^0_L$  na dva piony (bez dalšího komentáře jen poznámení, že v případě přesné  $CP$ -symetrie by byl dovolen pouze mnohem četnější „normální“ rozpad  $K^0_L$  na tři piony). Na rozdíl od (maximálního) narušení parity se jednalo o velmi jemný efekt na úrovni jednoho promile; v dalších experimentech však byl opakován potvrzen a upřesněn, takže byl záhy všeobecně akceptován jako prokázaný empirický fakt – jako nový záhadný projev fundamentálních interakcí.

Narušení  $CP$ -symetrie má ještě jeden pozoruhodný aspekt. Je dobré známo, že v libovolném relativistickém modelu kvantové teorie pole se musí zachovávat kombinace  $CP$  a obrácení času  $T$  – to je obsah slavného „ $CPT$ -teorému“, který formuloval a dokázal W. Pauli v roce 1957. Pokud se tedy při popisu fundamentálních interakcí spolehneme na kvantovou teorii pole a experimentální data přitom ukazují narušení  $CP$ , lze to také interpretovat jako nepřímý důkaz narušení symetrie vůči  $T$ . Odhalení (numericky nepatrného) efektu nezachování kombinované parity v rozpadech neutrálních kaonů tak znamenalo konec představy o symetrii vůči inverzi času jako samozřejmém atributu základních přírodních zákonů.



Val Fitch  
1923–



James Cronin  
1931–

Na kvantové teorii pole a experimentální data přitom ukazují narušení  $CP$ , lze to také interpretovat jako nepřímý důkaz narušení symetrie vůči  $T$ . Odhalení (numericky nepatrného) efektu nezachování kombinované parity v rozpadech neutrálních kaonů tak znamenalo konec představy o symetrii vůči inverzi času jako samozřejmém atributu základních přírodních zákonů.

butu základních přírodních zákonů. Dva protagonisté brookhavenského experimentu z roku 1964, James Cronin a Val Fitch, získali za objev narušení  $CP$ -symetrie Nobelovu cenu v roce 1980.

Theorie slabých interakcí, užívaná v šedesátých letech, uspokojivě popisovala celou řadu tehdy známých procesů při relativně nízkých energiích. Ve srovnání s kvantovou elektrodynamikou však měla jednu zřetelnou technickou vadu: nebyla totiž renormalizovatelná. V modelu Fermiho typu souvisí nerrenormalizovatelnost poruchového rozvoje celkem jednoduše s tím, že relevantní interakční parametr – Fermiho konstanta  $G_F$  – má rozmně negativní mocninu energie (připomeňme, že se udává v  $\text{GeV}^{-2}$ ). V případě teorie s intermediálním bosonem  $W$  je vazbová konstanta  $g$  bezrozměrná a chování ultrafialových divergencí je zde skutečně o něco lepší než v modelu Fermiho typu; poruchový rozvoj však přesto není renormalizovatelný. Problém je poměrně delikátní a podstatné přitom je, že  $W$  má nenulovou hmotnost a zároveň nese elektrický náboj (např. fotonu lze v rámci QED přidat nenulovou hmotnost a renormalizovatelnost se tím nepokazí). V následující kapitole popíšeme, jak se tyto technické problémy vyřešily v rámci jednotné teorie slabých a elektromagnetických interakcí.

## ELEKTROSLABÉ SJEDNOCENÍ

Nápadná podobnost kvantové elektrodynamiky a modelu slabé interakce s intermediálním vektorovým bosonem byla na přelomu padesátých a šedesátých let přirozeným důvodem pro úvahy o možném sjednocení slabých a elektromagnetických sil. Mimořádně příznivou okolností přitom bylo, že tehdy již také existoval velmi atraktivní teoretický rámec pro realizaci takového programu. Byla jím teorie neabelovských kalibračních polí, založená na obecném principu **lokální vnitřní symetrie**, kterou v roce 1954 formulovali Chen Ning Yang a Robert Mills. K tomu je třeba nejprve říci pář slov na vysvělenou.

Jednoduchý a dávno známý příklad takové symetrie dává elektrodynamika, jejíž rovnice jsou invariantní při současných změnách elektromagnetického potenciálu a fáze pole odpovídajícího nabitému částicí. Parametr transformace (tj. příslušná změna fáze) závisí na prostoročasových souřadnicích a v tomto smyslu jde tedy o lokální symetrii. Z historických důvodů se taková symetrie nazývá „kalibrační“ (nebo také „cejchovací“, angl. „gauge symmetry“), ale etymologii tohoto názvu se zde nebudeme zabývat. Z čistě matematického hlediska odpovídají změny fáze abelovským (tj. komutativním) unitárním transformacím a příslušná (jedno-parametrická) grupa se označuje jako  $U(1)$ . Yang a Mills ve své fundamentální práci zobecnili koncept kalibrační symetrie na případ, kdy příslušné transformace polí jsou matematicky vyjádřeny nekomutujícími maticemi, tj. tvoří neabelovskou grupu (nejjednodušším příkladem je izospinová symetrie reprezentovaná grupou  $SU(2)$ ). Ukázali, že vyjdeme-li ze systému neinteragujících častic, resp. „polí matérie“, s určitou globální symetrií (tj. takovou, jejíž parametry jsou konstantní v prostoručase) a požadujeme její rozšíření na lokální kalibrační symetrii, pak musíme zavést interakci s multipletem vektorových polí (jimž ovšem odpovídají částice se spinem 1). Velikost multipletu je dána počtem parametrů uvažované symetrie; například v případě lokální izospinové  $SU(2)$  je zapotřebí trojice vektorových polí (obecněji, pro lokální  $SU(n)$  jich je  $n^2 - 1$ ).

Yang–Millsova vektorová pole se z pochopitelných důvodů obecně nazývají **neabelovská kalibrační pole**. Jejich důležitou vlastností (kterou se podstatně liší od elektromagnetického pole) je, že kromě interakce s poli matérie mají také specifickou „samointerakci“, tj. působí sama na sebe; jinými slovy, příslušné pohybové rovnice jsou nelineární (na rozdíl od Maxwellových rovnic). Je také třeba zdůraznit, že lokální symetrie – ať už abelovská nebo neabelovská – obecně vyžaduje, aby příslušná kalibrační pole byla *nehmotná*. Matematická forma interakce „kalibračních bosonů“ (tj. částic odpovídajících Yang–Millsovým polím) je striktně určena algebraickými vlastnostmi dané symetrie, což značně omezuje libovůli při konstrukci fyzikálních modelů. Musí tak např. platit celá řada vztahů mezi různými vazbovými konstantami a to samozřejmě zvyšuje prediktivní sílu takových teorií. Modely založené na principu lokální kalibrační symetrie se obvykle nazývají prostě „kalibrační teorie“ (angl. „gauge theories“). Yang a Mills měli původně na mysli možné aplikace své metody na teorii silné interakce nukleonů, ale první pokusy v tomto směru nebyly příliš úspěšné. Ve fyzice silných interakcí se idea neabelovské kalibrační symetrie definitivně prosadila až mnohem později, na začátku sedmdesátých let, kdy vznikla kvantová chromodynamika – teorie sil, jež vážou kvarky uvnitř hadronů. O této části současného standardního modelu pojednáme v poslední kapitole; nyní se však vraťme k problému sjednocení slabých a elektromagnetických interakcí.

Z toho, co bylo zatím řečeno, je celkem pochopitelné, že jako základ jednotného popisu těchto dvou sil se nabízela představa Yang–Millsova tripletu  $\gamma$ ,  $W^-$ ,  $W^+$  tvořeného neutrálním fotonem a nabitémi intermediálními bosony slabých interakcí. Záhy však bylo také zřejmé, že formulace realistického modelu není úplně přímočará záležitost, neboť je přitom třeba

překlenout některé zřetelné odlišnosti v charakteru slabé a elektromagnetické interakce. Podstatné rozdíly mezi oběma silami jsou v zásadě dva. Především, elektromagnetická interakce má dlouhý dosah (daný chováním Coulombova potenciálu), zatímco slabá interakce má dosah velmi krátký (menší než je např. rozměr atomového jádra). Jak už jsme viděli dříve, tento rozdíl je dán hmotnostmi nositelů obou sil – zatímco foton je nehmotný, boson W musí být poměrně těžký; kalibrační symetrie však přitom vyžaduje multiplet nehmotných vektorových polí. Za druhé, elektromagnetická interakce zachovává paritu, ale slabá interakce ji narušuje maximálně (neboť ji cítí jen levotočivé elementární fermiony).

Mohlo by se zdát, že první problém lze překonat „triviálně“ – prostým přidáním potřebného hmotnostního členu pro W do rovnice uvažovaného modelu Yang–Millsova typu. To je ale ve skutečnosti kámen úrazu z hlediska technických vlastností teorie slabých i elektromagnetických interakcí. Přítomnost hmotnostního členu (který narušuje kalibrační symetrii) má totiž drastické důsledky pro chování Feynmanových diagramů. Z uzavřených smyček vznikají ultrafialové divergence, které nelze odstranit obvyklou procedurou renormalizace a pokud bychom se chtěli omezit jen na jednoduché stromové grafy, jejich přispěvky zase nepřijatelným způsobem rostou nadef všechny meze v limitě vysokých energií (tyto dva typy chování Feynmanových grafů spolu ve skutečnosti úzce souvisí). Problém hmotnosti kalibračních bosonů je skutečně fundamentální a vrátíme se k němu později.

Pokud jde o zachování versus nezachování parity v elektromagnetických a slabých interakcích, realistickou kalibrační teorii (která se stala základem moderního standardního modelu) jako první formuloval Sheldon Glashow v roce 1961 (první krok v tomto směru fakticky učinil jeho učitel J. Schwinger v roce 1957). Glashow si uvědomil, že chceme-li dostat v rámci Yang–Millsovy teorie slabý nabitý proud typu  $V - A$  a zároveň čistě vektorový elektromagnetický proud, nevystačíme se základním tripletem  $\gamma$ ,  $W^\pm$  (pokud přitom nechceme uvažovat o nových exotických fermionech typu „těžkého elektronu“ apod.). To znamená, že je pak třeba vyjít ze *čtverečice* kalibračních polí (příslušná symetrie je tedy  $SU(2) \times U(1)$  neboli  $U(2)$ ), kterým nakonec odpovídají fyzikální bosony  $\gamma$ ,  $W^\pm$  a  $Z^0$ . Elektricky neutrální intermediální boson  $Z^0$  je jakýmsi „spojovacím můstekem“ mezi elektromagnetickou a slabou interakcí a je vázán na (slabý) **neutrální proud**. Parametry charakterizující sílu interakce  $Z^0$  (tj. relevantní vazbové konstanty) jsou netriviálními funkcemi  $e$  a  $g$  a v tomto smyslu  $Z^0$  realizuje „sjednocení“ obou fundamentálních sil; kromě toho, interakce slabých neutrálních proudů obecně narušuje paritu. Vektorový boson  $Z^0$  musí mít nenulovou klidovou hmotnost, neboť jinak by se v mikrosvětě musely pozorovat projevy další síly dlouhého dosahu (kromě elektromagnetické). Spojení elektromagnetické a slabé interakce v jednotném rámci kalibrační teorie s lokální symetrií  $SU(2) \times U(1)$  se z pochopitelných důvodů často nazývá **elektro-slabé sjednocení**.<sup>10</sup> Nejjazivější předpověď Glashowovy teorie byla samozřejmě existence slabých neutrálních proudů vázaných na  $Z^0$ . Takové interakce původní Feynman–Gell–Manna teorie vůbec nepředpokládala, neboť pro ně tehdy nebyla žádná empirická motivace. Model elektroslabého sjednocení neutrální proudy nezbytně potřeboval, ovšem z ryze teoretických důvodů. Ani v šedesátých letech se však pro ně nenašel žádný experimentální důkaz a to byl zřejmě jeden z důvodů, proč Glashowova elegantní teorie brzy po svém vzniku více-méně upadla v zapomnění. Kromě toho, jak už jsme naznačili, zůstával zde nedořešený teore-

<sup>10</sup> Je však třeba mít na paměti, že v takovém modelu figurují dvě nezávislé vazbové konstanty  $e$  a g, zatímco v ideální jednotné teorii by bylo žádoucí mít pouze jeden takový univerzální parametr. Z tohoto důvodu některé autoři pojmenují „sjednocení“ v souvislosti s teorií elektroslabých interakcí neužívají a vyhrazují jej pro tzv. „velké sjednocení“ (angl. „grand unification“) elektromagnetických, slabých a silných interakcí. Dodejme ještě, že termín „elektroslabá interakce“ vznikl na konci sedmdesátých let.

tický problém hmotnostních členů pro  $W^\pm$  a  $Z^0$ , které byly k rovnicím s lokální symetrií  $SU(2) \times U(1)$  přidány „ad hoc“ a výsledný model nebyl renormalizovatelný.

Kalibrační teorie fundamentálních interakcí dostaly nový impuls v roce 1964, kdy Peter Higgs přišel na to, že hmotnostní členy vektorových bosonů lze v kalibračních teoriích získat rovněž prostřednictvím důmyslně volených interakcí *skalárních polí* (tj. častic s nulovým spinem); zhruba ve stejně době byl tento „Higgsův mechanismus“ objeven nezávisle několika dalšími teoretiky. Na základě jednoduchých intuitivních argumentů se přitom dalo očekávat, že ultrafialové divergence Feynmanových diagramů v modelu s Higgsovým mechanismem by se měly chovat v zásadě stejně jako v původní lokálně symetrické teorii (která je ovšem renormalizovatelná stejně jako např. stará dobrá kvantová elektrodynamika). Higgsův trik byl původně odhalen spíše jako určitý teoretický artefakt, bez přímé motivace problémy „praktické“ částicové fyziky. Záhy však bylo zřejmé, že skutečně otevírá cestu ke konstrukci renormalizovatelných modelů slabých interakcí, resp. elektroslabého sjednocení.



Steven Weinberg  
1933–

Jako první si tuto možnost zřejmě uvědomil Steven Weinberg, který v roce 1967 použil Higgsův mechanismus ke generování hmotnosti intermediálních vektorových bosonů  $W$  a  $Z$  v rámci Glashowova modelu s lokální symetrií  $SU(2) \times U(1)$ . Pokud jde o elementární fermiony, Weinberg uvažoval pouze leptony a aplikoval Higgsův trik i na elektron (event. mion); neutrino zůstalo nehmotné v souladu s dobovými představami (jednoduchá modifikace původní Weinbergovy teorie však umožňuje „zhmotnit“ i všechna neutrina). Milmožděně pozoruhodný výsledek Weinbergova modelu představují formule pro hmotnosti  $W$  a  $Z$



Sheldon Glashow  
1932–

$m_W = \sqrt{\frac{\pi \cdot \alpha}{G_F \cdot \sqrt{2}}} \cdot \frac{1}{\sin \theta_W}, \quad m_Z = \sqrt{\frac{\pi \cdot \alpha}{G_F \cdot \sqrt{2}}} \cdot \frac{1}{\sin \theta_W \cdot \cos \theta_W}, \quad (8)$

kde  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$  je elektromagnetická konstanta jemné struktury,  $G_F$  je Fermiho konstanta a  $\sin \theta_W = e/g$ , přičemž  $g$  jako obvykle značí slabou vazbovou konstantu (teorie předpovídá relaci  $e < g$ , ale poměr  $e/g$  může jinak nabývat libovolné hodnoty mezi 0 a 1). Parametr  $\theta_W$  se obvykle nazývá „Weinbergův úhel“, resp. „slaby směšovací úhel“ (angl. „weak mixing angle“) a podstatné je, že jej lze nezávisle měřit i při relativně nízkých energiích v interakcích slabých neutrálních proudů. Jinými slovy, hodnotu  $\theta_W$  lze v zásadě určit experimentálně i bez přímého měření hmotnosti  $W$  a formule (8) pak představují skutečnou *předpověď* pro  $m_W$  a  $m_Z$ . K efektům neutrálních proudů se vrátíme za chvíli; zde ještě poznámejme, že i bez znalosti hodnoty  $\theta_W$  dávají formule (8) zajímavé omezení pro hmotnosti  $W$  a  $Z$ . Skutečně, veličina  $\sqrt{\frac{\pi \cdot \alpha}{G_F \cdot \sqrt{2}}}$  má numerickou hodnotu zhruba 37 GeV a pro libovolnou hodnotu  $\theta_W$

má numerickou hodnotu zhruba 37 GeV a pro libovolnou hodnotu  $\theta_W$

je  $\sin \theta_W < 1$ , což dává dolní mez  $m_W > 37 \text{ GeV}$ . Dále,  $\sin \theta_W \cdot \cos \theta_W \leq \frac{1}{2}$ , takže podobně musí být  $m_Z \geq 74 \text{ GeV}$ . Jinak je zřejmé, že obecně  $m_Z > m_W$ , neboť podle (8) platí

$$m_W = m_Z \cdot \cos \theta_W. \quad (9)$$

K tomu, co už bylo řečeno, je třeba dodat ještě jeden podstatný fakt. Aplikace Higgsova triku přinesla rozšíření Glashowova modelu o jeden elektricky neutrální boson se spinem 0, pro který se přirozeně ustálil název **Higgsův boson** a označení H. (Higgsův mechanismus je ovšem možno realizovat i pomocí bohatších multipletů skalárních polí – schéma, jež zvolil Weinberg, je „minimální model“, pokud jde o výsledné spektrum fyzikálních částic s nulovým spinem.) Na rozdíl od případu intermediálních bosonů Weinbergova teorie nepředpověděla konkrétní hodnotu hmotnosti Higgsova bosonu. Dala však celou řadu charakteristických vztahů mezi interakčními konstantami a hmotnostmi částic – formule (8) představují jen jeden prominentní příklad.

Nezávisle na Weinbergovi a prakticky současně formuloval stejný model elektroslabého sjednocení také Abdus Salam (jeho práce však byla publikována až v roce 1968). Weinbergův článek v časopise *Physical Review Letters* (nazvaný poměrně skromně *A model of leptons*) však obsahuje více konkrétních detailů a v podstatě odpovídá dnešní „učebnicové“ podobě standardního modelu. Přestože Glashow–Weinberg–Salamova (GWS) teorie vedla k řadě zajímavých předpovědí a v technickém smyslu byla velmi nadějným kandidátem na renormalizovatelný jednotrny model slabých a elektromagnetických sil, byla v době svého vzniku přijata doslova chladně. Důvodů bylo hned několik.

Především, ve druhé polovině šedesátých let se stále více prosazoval odmítavý postoj ke kvantové teorii pole vůbec, zejména k poruchové metodě Feynmanových diagramů. To se nám dnes může zdát téměř neuvěřitelné, ale tehdy byl určitý pocit frustrace skutečně oprávněný; koncepční problémy vznikaly zejména ve fyzice silných interakcí, kde se nedáilo formulovat dostatečně úspěšný model na základě kvantové teorie pole a hledaly se proto jiné cesty. GWS model sice popisoval elektromagnetické a slabé interakce, ale pro svou vnitřní konzistence nezbytně potřeboval nové částice

$W^\pm$ ,  $Z^0$  a H, po jejichž fyzikálních efektech nebylo v tehdejších experimentálních datech ani stopy. Navíc, od samého začátku bylo zřejmé, že přímočará aplikace lokální symetrie  $SU(2) \times U(1)$  na popis interakcí Gell-Mannových kvarků  $u$ ,  $d$  a  $s$  vektorovými bosony vede ke katastrofálnímu rozporu se známými empirickými poznatky o slabých rozpadech podivných mezonů (k tomuto fundamentálnímu problému se ještě vrátíme). Konečně, navzdory očekávání se obecný důkaz renormalizovatelnosti GWS modelu zpočátku nedářil a ztroskotal na něm i sám Weinberg.

Nezájem fyzikální komunity o GWS teorii na konci šedesátých let celkem dobré vystihuje fakt, že první čtyři roky po publikaci Weinbergovy práce na ni nebyly v literatuře žádné citace. Průlom nastal až v roce 1971, kdy Gerardus 't Hooft a Martinus Veltman z holandského Utrechtu dokázali renormalizovatelnost obecné třídy Yang–Millsových teorií s Higgsovým mechanismem (jejímž

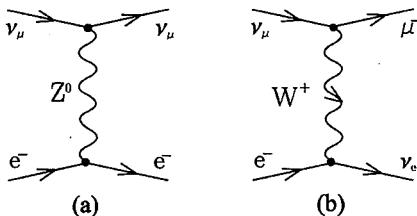


Abdus Salam  
1926–1996



Martinus Veltman  
1931–

speciálním reprezentantem byl rovněž GWS model) a k tomuto cíli vyvinuli také zcela nové metody kvantové teorie pole. To byl sice úspěch spíše matematické povahy, ale vyvolal novou vlnu zájmu o moderní techniky Feynmanových diagramů a v souvislosti s tím také o kalibrační teorie vůbec. Rozhodující fyzikální argument ve prospěch GWS modelu však přišel v roce 1973, kdy byly poprvé pozorovány efekty slabých neutrálních proudů. U tohoto významného momentu se nyní krátce zastavíme.



Obr. 8 Feynmanovy diagramy pro interakce neutrálních a nabitych proudů.

(a) proces  $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$

(b) proces  $\nu_\mu e^- \rightarrow \mu^- \nu_e$ .

poruchového rozvoje) a byl by silně potlačen; v nejnižším řádu bychom dostali pouze reakci s výměnou náboje  $\nu_\mu e^- \rightarrow \mu^- \nu_e$  (viz obr. 8(b)).

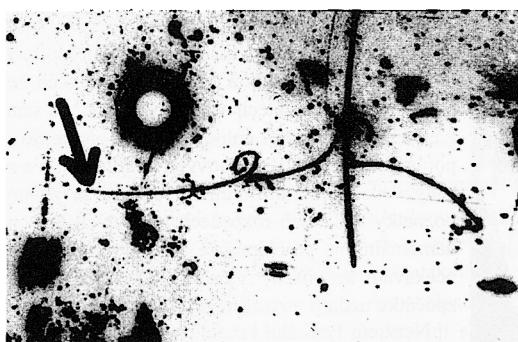
Ačkoliv mají čistě leptónové reakce s účastí neutrín velmi malé účinné průřezy, jsou „čistší“ (jak z teoretického, tak experimentálního hlediska) než interakce s nukleony. Slabé neutrální proudy tak byly nakonec objeveny ve zmíněném roce 1973 právě na základě procesu  $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ , detekovaného v bublinové komoře Gargamelle v CERN (viz obr. 9). Brzy



Gerardus 't Hooft  
1946–

Nejjednodušším příkladem procesu, v němž se uplatňuje interakce neutrálních proudů (zprostředkována výměnou  $Z^0$ ) je pružný rozptýl mionového neutrína na elektro-

nu,  $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$ . V GWS modelu je v nejnižším přiblížení popsán Feynmanovým diagramem znázorněným na obr. 8(a). Podle staré Feynman-Gell-Mannovy teorie, která zahrnovala pouze nabité proudy, by takový proces mohl probíhat až na úrovni diagramů s uzavřenými smyčkami (tj. ve vyšších rádech



Obr. 9 První pozorovaný případ interakce neutrálních proudů v Gargamelle. Dráha rozptýleného elektronu začíná u hrotu šipky a jde zleva doprava. Elektricky neutrální neutrino samozřejmě není v komoře vidět.

nato byly pozorovány také odpovídající reakce  $v_\mu$  s nukleony (takové, v nichž nevzniká mion) jak v CERN, tak ve Fermiho národní laboratoři (FNAL) v USA.

Objev neutrálních proudů byl skutečně mimořádně důležitý, neboť výrazně podpořil myšlenku elektroslabého sjednocení na základě lokální vnitřní symetrie a byl tak jednou z příčin zásadního obratu v orientaci částicové fyziky v sedmdesátých letech – kalibrační teorie se v té době natrvalo staly hlavním proudem tohoto oboru. Experimentální data o interakcích neutrálních proudů se postupně zpřesňovala a tak bylo možno určit také hodnotu Weinbergova úhlu  $\theta_W$ . Řada nezávislých experimentů vedla ve druhé polovině sedmdesátých let k výsledku  $\sin^2 \theta_W \doteq 0,23$ , který s velkou přesností platí i v současné době. Formule (8) pak dávají numerickou předpověď pro hmotnosti intermediálních vektorových bosonů  $m_W \doteq 77,7 \text{ GeV}$  a  $m_Z \doteq 88,8 \text{ GeV}$ . K těmto hodnotám je ovšem třeba přidat ještě kvantové radiační korekce odpovídající renormalizaci základních parametrů. Tyto korekce byly spočteny v roce 1980 nezávisle několika teoretiky (jedním z nich byl M. Veltman); jsou poměrně velké a mění předpověď na  $m_W \doteq 80 \text{ GeV}$  a  $m_Z \doteq 91 \text{ GeV}$ .

## PŮVABNÝ KVARK

Zbývá však ještě říci, jak byl vyřešen nesmiřitelný konflikt GWS teorie a Gell-Mannova modelu tří kvarků. Nejprve stručně objasníme podstatu problému. Od samého vzniku GWS modelu bylo zřejmé, že přímočará aplikace principu lokální symetrie  $SU(2) \times U(1)$  na popis slabých a elektromagnetických sil působících mezi kvarky  $u$ ,  $d$  a  $s$  vždy vede k přímé interakci kvarků  $d$ ,  $s$  a neutrálního vektorového bosonu  $Z$ . Jinými slovy, při spojení Gell-Mannova kvarkového modelu a kalibrační symetrie elektroslabého sjednocení vzniká slabý neutrální proud, v jehož interakcích se mění podivnost. Takový závěr je skutečně nevyhnutelný, pokud chceme dostat elektromagnetický proud se standardními vlastnostmi a slabé nabité proudy, jež vystihují Cabibbův mixing zmíněný v kapitole „Slabá interakce“. Interakce  $dsZ$  přitom vychází srovnatelně silná jako empiricky dobré známá interakce nabitych proudů typu  $usW$ . To má ovšem závažné důsledky pro fenomenologii slabých hadronových procesů, neboť rozpad  $K^- \rightarrow \pi^- e^+ e^-$  (v němž se mění kvark  $s$  na  $d$ ) by pak měl být zhruba stejně četný jako  $K^- \rightarrow \pi^0 e^- \bar{\nu}$  (v němž se mění  $s$  na  $u$ ). Nic takového se však ve skutečnosti nepozoruje. Experimentální data ukazují, že rozpad  $K^- \rightarrow \pi^- e^+ e^-$  je velmi vzácný – přibližně dvěstětisíckrát méně častý než  $K^- \rightarrow \pi^0 e^- \bar{\nu}$  (jehož relativní četnost je zhruba 5 %). Ve světě vystavěném ze tří kvarků není z tohoto fatálního problému žádné východisko a mnozí fyzikové proto ve své době GWS teorii prostě odmítali, resp. považovali ji pouze za akademický příklad renormalizovatelného modelu kvantové teorie pole.

V roce 1970 přišli s elegantním řešením Sheldon Glashow, John Iliopoulos a Luciano Maiani (GIM). Navrhli model se čtyřmi kvarky, z něhož bylo téměř okamžitě patrné, že je kompatibilní s lokální symetrií elektroslabých interakcí. Vtip je v tom, že čtyři kvarky lze uspořádat do dvou doubletů a v důsledku jednoduchých algebraických manipulací pak vzniknou dva příspěvky k interakci typu  $dsZ$ , které se vzájemně vyruší. V modelu GIM se předpokládalo, že čtvrtý kvark nese náboj  $+2/3$  a nové kvantové číslo, jež se v silných interakcích zachovává (podobně jako podivnost), zatímco ve slabých interakcích nabitych proudů se může měnit o jednotku. Pro tuto charakteristiku se ustálil název **půvab** (angl. „charm“) a „půvabný kvark“ se proto začal označovat jako  $c$ . Dodatečnou estetickou předností GIM modelu byla symetrie spektra elementárních fermionů – čtyři kvarky  $u$ ,  $d$ ,  $s$ ,  $c$  odpovídaly čtyřem tehdy známým leptonům  $e$ ,  $\nu_e$ ,  $\mu$ ,  $\nu_\mu$ . V rámci GWS elektroslabé teorie obohacené o takto rozšířený kvarkový sektor pak bylo také možno provést podrobný výpočet relativní

četnosti procesu  $K^- \rightarrow \pi^0 e^- \bar{\nu}$ , který se při absenci neutrálních proudů se změnou podivnosti může realizovat jen jako efekt vyššího řádu. Srovnání výsledku s výše zmíněnými experimentálními daty ukázalo, že  $c$ -kvark by mohl být relativně těžký (ve srovnání s  $u, d$  a  $s$ ); jeho klidová hmotnost byla odhadnuta zhruba na 1,5 GeV. V raných sedmdesátých letech to ovšem bylo pouze teoretické schéma a mnohým se zdála záchrana GWS teorie pomocí nové hypotetické částice nepřijatelná (je třeba přiznat, že tato teorie obsahovala – na vikus své doby – hypotetických částic celkem dost).

Situace se naštěstí dramaticky změnila na podzim roku 1974, kdy byly objeveny nové hadrony, jež se daly přirozeně interpretovat jako vázané stavы kvarku  $c$  a jeho antikvarku  $\bar{c}$ . Nejprve velmi stručně k objevu samotnému. Zmíněné částice byly pozorovány prakticky současně ve dvou nezávislých (a zcela odlišných) experimentech provedených v USA. V jednom z nich, realizovaném v laboratoři SLAC (Stanford Linear Accelerator Center), se studovaly srážky vstřícných svazků elektronů a pozitronů. Tým vedený Burtonem Richterem zde při energii 3,1 GeV objevil rezonanci se šírkou několika desítek keV (podle současných dat 87 keV), což je hodnota překvapivě malá na tak těžký objekt (připomeňme, že typické šírky hadronových rezonancí známých v té době byly od několika MeV do stovek MeV). Richterova skupina označila tuto částici jako  $\psi$ . Ve druhém experimentu, uskutečněném v Brookhavenu pod vedením Samuela Tinga, se sledovala produkce elektron-pozitronových párů ve srážkách protonů s beryliovým terčíkem (poznamenejme, že vznik leptónového páru v hadronových srážkách se obecně nazývá Drell-Yanův proces). Tingova skupina rovněž identifikovala rezonanci při invariantní hmotnosti páru  $e^+ e^-$  rovné 3,1 GeV a označila ji jako  $J/\psi$ .

Obě skupiny se vzájemně informovaly o svých výsledcích v pondělí 11. 11. 1974 a bylo zřejmé, že pozorují totéž. Richter a Ting vzápětí vydali společné oznámení o objevu mezonu, který se až do dneška označuje  $J/\psi$ , a články obou týmů pak byly publikovány ve stejném čísle časopisu Physical Review Letters. Fakticky už před experimentálním odhalením  $J/\psi$  byly známy výsledky teoretické analýzy spektra vázaných stavů systému  $c\bar{c}$ , kterou provedli Thomas Appelquist a David Politzer. Jejich výpočet předpovídá řadu energetických hladin s malou rozpadovou šírkou, analogických hladinám pozitronia (tj. vázaného stavu elektronu a pozitronu). Klidová hmotnost pozorovaného  $J/\psi$  přitom byla pozoruhodně blízká dvojnásobku odhadované hmotnosti  $c$ -kvarku, o níž jsme se zmínili výše. Richterova skupina proto pokračovala v systematickém hledání dalších úzkých rezonancí, tj. excitovaných stavů „charmonia“ předpověděných teoretiky (anihilace  $e^+ e^-$  je z experimentálního hlediska mnohem čistší než srážky hadronů; Tingova skupina nemohla kvůli nedostatečnému energetickému rozlišení excitované stavů charmonia pozorovat). Deset dní po prvním objevu byla skutečně nalezena další rezonance (tentokrát při energii zhruba 3,7 GeV) a byla označena jako  $\psi'$  (podle dnešních dat má šírku 277 keV). Je celkem pochopitelné, že přirozená interpretace částic  $J/\psi$  a  $\psi'$  jako váza-



Burton Richter  
1931–



Samuel Ting  
1936–

ných stavů  $c\bar{c}$  pak brzy zcela převládla, a tak byl také akceptován čtvrtý kvark – ze zbožného prání zastánců kalibračních teorií se stala fyzikální realita.

Objev hadronů se „skrytým půvabem“ (angl. „hidden charm“) ve své době natolik výrazně ovlivnil myšlení a orientaci čisticových fyziků, že se tato událost často nazývá „listopadová revoluce“. Kromě výrazné (byť nepřímé) podpory GWS teorie šlo také o samotný koncept kvarkového modelu hadronů. Můžeme říci, že teprve po úspěšné identifikaci  $J/\psi$  a  $\psi'$  jako základního a prvního excitovaného stavu charmonia získaly kvarky (nejen  $c$ , ale i původní  $u$ ,  $d$  a  $s$ ) v myšlení fyziků definitivně status skutečných fyzikálních objektů. V této souvislosti bylo podstatné, že díky značné klidové hmotnosti kvarku  $c$  je možno vázané stavy  $c\bar{c}$  popsat celkem spolehlivě pomocí metod nerelativistické kvantové mechaniky známých z atomové a jaderné fyziky. Vnitřní struktura mezonu  $J/\psi$  je tak vystižena obzvláště názorně a to jaksi dodatečně zvyšuje důvěryhodnost kvarkového modelu vůbec. **Jinými slovy, úspěšné teoretické objasňení excitačního spektra charmonia lze považovat za jeden z nepřímých, ale velmi silných důkazů reálné existence kvarků.** Při popisu struktury hadronů ovšem musíme – na rozdíl od teorie atomů nebo jader – pracovat s představou „věznících sil“, jimž odpovídá potenciální energie rostoucí se vzdáleností (prostě proto, že volné kvarky nebyly nikdy pozorovány).

Dalším nevyhnutelným krokem pak byla identifikace hadronů s „odhaleným půvabem“ (poněkud volně z angl. „overt charm“). Zatímco v  $J/\psi$  je půvab skryt v podobě jeho uvězněných konstituentů  $c$ ,  $\bar{c}$  (hodnoty tohoto kvantového čísla pro  $c$  a  $\bar{c}$  jsou opačné a vzájemně se vyrůší), v rámci kvarkového modelu lze očekávat také bohaté spektrum hadronů obsahujících např. jeden kvark  $c$  a lehké kvarky  $u$ ,  $d$  nebo  $s$  (v případě baryonů je však možno očekávat i stavy obsahující dva nebo tři  $c$ -kvarky). První půvabné hadrony byly pozorovány ve SLAC v roce 1976. Jednalo se o mezony označované jako  $D^+$  a  $D^0$ , jež mají kvarkové složení  $c\bar{d}$ , resp.  $c\bar{u}$ . V dnešní době je známa celá řada mezonů a baryonů nesoucích půvab a jejich spektroskopie je stále předmětem experimentálního výzkumu (baryony obsahující více než jeden  $c$ -kvark však zatím pozorovány nebyly). Nakonec dodejme, že v roce 1976 získali Richter a Ting za objev čtvrtého kvarku Nobelovu cenu.

### TRIUMF STANDARDNÍHO MODELU ELEKTROSLABÝCH INTERAKCIÍ

---

Objev neutrálních proudů a experimentální potvrzení existence  $c$ -kvarku znamenal výrazný průlom v chápání fundamentálních sil v mikrosvětě. GWS teorie, která ještě na začátku sedmdesátých let sloužila spíše jako „existenční důkaz“ pro čistě teoretickou konstrukci renormalizovatelného modelu slabých interakcí, se po roce 1974 stala definitivně paradigmatem, tj. „standardním modelem“ fyziky elektroslabých sil. Je ovšem nepochybně, že i matematický důkaz renormalizovatelnosti teorie provedený 't Hooftem a Veltmanem výrazně přispěl k její popularitě, ale rozhodující nakonec byla úspěšná konfrontace teoretických předpovědí s experimentálními daty. Během druhé poloviny sedmdesátých let byla podrobněji testována struktura neutrálních proudů, jak s využitím svažků mionových neutrín, tak pomocí nabitych leptonů. V této souvislosti lze za mimorádně významný považovat experiment s nepružným rozptylem polarizovaných elektronů na nukleonech (přesněji řečeno na deuteriu) realizovaný v roce 1978 ve SLAC týmem, který vedl Charles Prescott. Tento experiment prokázal, že interakce elektronového neutrálního proudu narušuje paritu (nikoli ovšem maximálním způsobem jako v případě interakcí neutrín) a zároveň poskytl poměrně přesnou hodnotu Weinbergova úhlu, tj. parametru  $\sin^2 \theta_W$  (což, jak už bylo řečeno, umožnilo teoreticky předpovědět hmoty vektorových bosonů  $W$  a  $Z$ ). Celkovou situaci na konci sedmdesátých let – alespoň pokud jde o neutrální proudy – lze shrnout konstatováním, že až na některé drobné mráčky na horizontu (jako byla např. kontroverzní otázka na-

rušení parity v atomové fyzice, vyřešená později) všechna známá data potvrzovala standardní model. Vše tedy nasvědčovalo tomu, že z GWS modelu – „ošklivého kachňátku“ narozeného v šedesátých letech – se vyvinula realistická a prediktivní teorie. Její první úspěšné období bylo korunováno Nobelovou cenou, kterou Glashow, Salam a Weinberg získali společně v roce 1979.

Neutrální proudy a čtvrtý kvark ovšem představovaly, striktně vzato, pouze nepřímé důkazy správnosti GWS teorie. Naprostě zásadní však byla otázka existence intermediálních bosonů W a Z (z tohoto hlediska se mohlo zdát udělení Nobelovy ceny již v roce 1979 jako poněkud odvážný krok). Z předpovědi jejich hmotností,  $m_W \approx 80 \text{ GeV}$ ,  $m_Z \approx 91 \text{ GeV}$ , bylo na konci sedmdesátých let zřejmé, že žádné z tehdy existujících experimentálních zařízení není schopno tyto částice produkovat. Proto vznikl v CERN projekt collideru SpPS (Super p p Synchrotron) pro studium srážek vstřícných svazků protonů a antiprotonů při celkové energii (v téžišťovém systému) 540 GeV; jeho plánované parametry měly garantovat objev W a Z v každém případě (eventuálně vyvrácení GWS teorie). Hlavním organizátorem tohoto grandiozního projektu byl Carlo Rubbia (podstatná byla samozřejmě podpora tehdejších ředitelů CERN, jimž byli Leon Van Hove a John Adams).



Carlo Rubbia  
1934–

vač SPS (Super Proton Synchrotron), v němž protony a antiprotony získávaly konečnou srážkovou energii. Důležitou součástí zařízení byl také akumulační prstenec, v němž se hromadily antiprotony (vyroběné srážkami primárního protonového svazku s pevným terčem) tak, aby před finálním urychlěním měl jejich svazek intenzitu srovnatelnou se svazkem protonů. Celý komplex byl tedy vlastně koncipován jako „továrna na antiprotony“, kterých bylo třeba vyrobit a uchovat ve stabilním svazku ohromné množství, předtím, než dojde ke srážce s protony. Již dříve existovaly collidery se svazky elektronů a pozitronů (právě na jednom takovém zařízení objevila skupina B. Richtera částici  $J/\psi$ ), ale příprava svazku antiprotonů požadované intenzity představovala značný technický problém.

S řešením přišel Simon van der Meer, který vynalezl techniku nazývanou „stochasticke chlazení“ (angl. „stochastic cooling“). Pomocí tohoto postupu (kterým se reguluje neusporádaný pohyb vyrobených „syrových“ antiprotonů) se podařilo připravit antiprotonový svazek s potřebnými parametry a první srážky p p v SPS byly registrovány v létě 1981. V prosinci 1982 už byla statistika pozorovaných případů srážek natolik vysoká, že mezi nimi bylo možno identifikovat signál produkce bosonů W $\pm$ , a sice na základě jejich rozpadu na nabité lepton a příslušné neutrino. (Je známo, že tehdejší ředitel CERN Herwig Schopper neoficiálně informoval o této předběžných datech britskou ministerskou předsedkyni Margaret Thatcherovou, která se o možný objev W živě zajímala.) Oficiální oznámení bylo vydáno v lednu 1983 a o něco později byl detekován také neutrální vektorový boson Z, pomocí rozpadu na páru e $^+$  e $^-$  nebo  $\mu^+$   $\mu^-$ . Hmotnosti pozorovaných W a Z přitom dobře souhlasily s předpověďí standardního modelu (je samozřej-



Simon van der Meer  
1925–

mé, že experimentátoři nehledali rozpadové produkty W a Z „naslepo“, nýbrž právě v kinematické oblasti odpovídající očekávaným hodnotám  $m_W$  a  $m_Z$ ).<sup>11</sup> Potvrzení existence intermedialních bosonů elektroslabých interakcí s hmotnostmi předpověděnými teorií bylo skutečným triumfem GWS standardního modelu; tato ohromující souhra abstraktní teorie a obtížného experimentu se dá považovat za jeden z největších výkonů fyziky dvacátého století a moderní přirodovědy vůbec. Za svůj příspěvek k objevu W a Z získali Rubbia a van der Meer Nobelovu cenu v roce 1984.

Vraťme se však ještě na chvíli zpět do sedmdesátých let. Brzy po „listopadové revoluci“ spojené s objevem  $c$ -kvarku došlo poněkud překvapivě k odhalení dalších elementárních fermionů. V roce 1975 pozoroval Martin Perl se svým týmem ve SLAC případu srážek  $e^- e^+$ , v nichž se produkoval elektron a kladně nabité mion (resp. pozitron a záporně nabité mion) a nevznikaly přitom žádné dodatečné hadrony či fotony. Perl tyto případy interpretoval jako párovou produkci nového leptonu  $\tau$ , tj. reakci  $e^- e^+ \rightarrow \tau^- \tau^+$ , následovanou leptonovými rozpady typu  $\tau \rightarrow e \nu \bar{\nu}$  a  $\tau \rightarrow \mu \nu \bar{\nu}$ . Už z prvních měření bylo zřejmé, že  $\tau$  je poměrně těžká částice, s kladnovou hmotností mezi 1,6 a 2,0 GeV (takže označení lepton vlastně není v tomto případě etymologicky zcela adekvátní); podle současných dat je  $m_\tau = 1,777$  GeV. Od samého začátku se také povážovalo za víceméně hotovou věc, že v rozpadech  $\tau$  vzniká asociované neutrino  $\nu_\tau$  – bylo totiž zřejmé, že „chybějící energie“ v leptonových rozpadech  $\tau$  odnáší alespoň dvě neutrina a všeobecně se důvěrovalo zachování leptonového náboje. Poznamenejme však, že k přímé detekci  $\nu_\tau$  došlo až o 25 let později, v létě 2000. Perlův objev těžkého leptonu  $\tau$  byl ve své době téměř stejně dramatický jako objev  $J/\psi$ , ale neměl tak výrazný ohlas, jelikož k rozhodující „změně paradigmatu“ v čisticové fyzice už došlo rok předtím. Odmena v podobě Nobelovy ceny také přišla až mnohem později – Perl ji získal v roce 1995.

Na konci roku 1975 už tedy zdánlivě opět existovala „asymetrie“ mezi leptony a kvarky. Jelikož důvody pro rovnost počtu leptonů a kvarků jsou hlubší než jen estetické (zmníme se o nich za chvíli), byla zde zřejmá motivace pro hledání dalšího kvarku, v experimentech analogických tém, které dříve odhalily částici  $J/\psi$ . V polovině roku 1977 tak byl objeven pátý kvark, označený jako  $b$  (z anglicky „bottom“ nebo „beauty“). K objevu došlo ve FNAL (Fermilab) v USA při studiu produkce leptonových páru v hadronových srážkách. Tým vedený Leonem Ledermanem hledal rezonance ve spektru páru  $\mu^+ \mu^-$  produkovaných při srážkách protonů s energií 400 GeV s atomovými jádry. Při detailní analýze dat experimentátoři odhalili dva rezonanční píky při invariantních hmotnostech přibližně 9,5 GeV a 10 GeV a označili je  $\Upsilon$  a  $\Upsilon'$ . Brzy bylo zřejmé, že se zde prostě opakuje historie  $J/\psi$  a  $\psi'$  – pozorované rezonance bylo možno interpretovat jako vázané stavy nového kvarku  $b$  a antikvarku  $\bar{b}$  (šlo tedy o „bottomonium“); rozdíl je pouze v tom, že kvark  $b$  má hmotnost zhruba 4,5 GeV a náboj  $-1/3$ . Za objev pátého kvarku Nobelova cena udělena nebyla; připomeňme, že Lederman ji získal v roce 1988 spolu se dvěma dalšími badateli za identifikaci mionového neutrina.



Martin Perl  
1927–

<sup>11</sup> Zde je na místě ještě tato poznámka: Ačkolи jsou W a Z blízkými přibuznými fotonu, mají jen velmi krátkou dobu života, rádově  $10^{-25}$  s. Důvod ovšem spočívá právě v jejich velkých hmotnostech, které kinematicky dovolují celou řadu leptonových i hadronových rozpádů; interakce zodpovědná za tyto rozpady je přitom prakticky stejně silná jako interakce elektromagnetická.

V roce 1977 bylo tedy známo 6 leptonů a 5 kvarků. Pro jednotlivé kvarkové typy  $u, d, s, c, b$  se ustálilo označení „vůně“, resp. „aroma“ (angl. „flavour“) a někdy se tento poetický termín užívá i v případě leptonů. Od poloviny šedesátých let už bylo také dobře známo, že kromě vůně nesou kvarky další vnitřní kvantové číslo nazývané „barva“ – každý typ kvarku existuje ve třech jinak identických „barevných kopíech“. O dynamickém významu barvy (která byla do kvarkového modelu zavedena už v roce 1965) stručně pojednáme v následující kapitole. Elementární fermiony se také přirozeně dělí do skupin nazývaných „generace“: čtverice ( $v_e, e, u, d$ ) tvoří 1. generaci, ( $v_\mu, \mu, c, s$ ) je 2. generace a  $v_\tau, \tau, b$  patří do 3. generace.

Jak už jsme naznačili, existuje hlubší důvod pro symetrii spektra elementárních fermionů, tj. pro rovnost počtu kvarků a leptonů. Tímto důvodem je vnitřní konzistence poruchového rozvoje GWS teorie elektroslabých interakcí (a, strikně vzato, i renormalizovatelnost Feynmanových diagramů ve vyšších rádech poruchového rozvoje). Jde přitom o delikátní efekt specifických diagramů (obsahujících trojúhelníkové uzavřené smyčky fermionových linií), nazývaný „kvantová anomálie“ nebo konkrétně „ABJ anomálie“ (podle Stephena Adlera, Johna Bella a Romana Jackiwa). Anomálie znamená obecně narušení klasické symetrie na kvantové úrovni a v případě kalibračního modelu GWS typu může její přítomnost ohrozit vnitřní konzistenci teorie v rámci poruchového rozvoje. Podrobnejší diskuse tohoto hlubokého konceptu kvantové teorie pole vychází daleko za rámec našeho populárního přehledu; je však zajímavé alespoň uvést, k jakému omezení pro elementární fermiony vede podmínka absence efektu ABJ anomálie ve standardním modelu elektroslabých interakcí. Aplikace této podmínky fakticky znamená, že příspěvek „nebezpečných“ leptonových smyček se kompenzuje příspěvkem kvarkových smyček, což vede k pozoruhodnému vztahu

$$\sum_f Q_f = 0, \quad (10)$$

kde  $Q_f$  je náboj fermionu  $f$  (v jednotkách náboje pozitronu) a sčítá se přes všechny elementární fermiony, tj. kvarky a leptony. Rovnost (10) je skutečně splněna pro první dvě generace (pro každou zvlášť), pokud kvarky započítáme i s jejich barvami. Např. pro první generaci máme

$$0 + (-1) + 3 \cdot \left[ \frac{2}{3} + \left( -\frac{1}{3} \right) \right] = 0 \quad (11)$$

a ovšem zcela analogicky je takový vztah splněn pro druhou generaci kvarků a leptonů. Trojice  $v_\tau, \tau, b$  v tomto kontextu evidentně představuje neúplnou třetí generaci, neboť pro splnění vztahu (10) v ní chybí kvark s nábojem  $+2/3$ . Po roce 1977 se tedy prostě předpokládalo, že takový kvark existuje a pod označením  $t$  (top) figuroval ve schématu standardního modelu jako hypotetická, leč s důvěrou očekávaná částice. Na jeho experimentální detekci však bylo třeba čekat poměrně dlouho, až do poloviny devadesátých let (k historii objevu  $t$ -kvarku se ještě krátce vrátíme později).

Na konci sedmdesátých let ve skutečnosti existoval ještě jeden důvod pro doplnění třetí generace fermionů top-kvarkem. Po objevu čistic  $\Upsilon$ ,  $\Upsilon'$  a dalších excitovaných stavů „bottonomia“  $b\bar{b}$  byly pozorovány také mezon y a baryony složené z jednoho kvarku  $b$  a lehčích kvarků (např. B-mezony  $B^-(b\bar{u})$ ,  $B^0(b\bar{d})$  apod.). Ukázalo se, že ve slabých interakcích se chovají podobně jako podivné částice: rozpady, v nichž by se kvark  $b$  měnil např. na  $s$  (a páru nabitých leptonů) se nepozorují, nebo jsou velmi silně potlačené. Jinými slovy, prakticky se nepozorují slabé přechody se změnou vůně a beze změny náboje. Kdyby však existovalo pouze 5 kvarků, byly by neutrální proudy se změnou vůně v rámci GWS elektroslabé teorie nevyhnutelné (tj. vznikaly by interakce typu  $bsZ$  nebo  $bdZ$ ) podobně jako tomu bylo dříve

v případě Gell-Mannova modelu tří kvarků. Dá se tedy říci, že na konci sedmdesátých let se opakovala stejná situace jako v době vzniku GWS modelu: lichý počet kvarků byl nekompatibilní s kalibrační symetrií  $SU(2) \times U(1)$  a top-kvark  $t$  jako partner  $b$  byl prakticky nezbytný pro odvrácení konfliktu elektroslabé teorie s fenomenologií hadronových rozpadů.

Je pozoruhodné, že model šesti kvarků byl původně navržen – jako čistě teoretická konstrukce – už v roce 1973. Tehdy si totiž Makoto Kobayashi a Toshihide Maskawa jako první uvědomili, že chceme-li v rámci teorie elektroslabého sjednocení přirozeně popsat také narušení  $CP$ -symetrie (viz konec kapitoly „Slabá interakce“), nestačí uvažovat schéma GIM se čtyřmi kvarky, ale je nezbytné přidat třetí generaci, tj. dublet  $(b, t)$ . Důvod je víceméně technický a úzce souvisí se zobecněním popisu Cabibbova směšování kvarků  $d$  a  $s$ , o něž byla řeč v kapitole „Slabá interakce“. V zásadě jde o toto: V případě „dvougeneračního“ modelu GIM lze takový mixing vždy popsat pomocí reálných koeficientů, které charakterizují relativní sílu interakcí nabitych kvarkových proudů (pro různé dvojice kvarků s náboji lišícími se o jednotku). Souhrnně je možno zapsat je ve tvaru matice

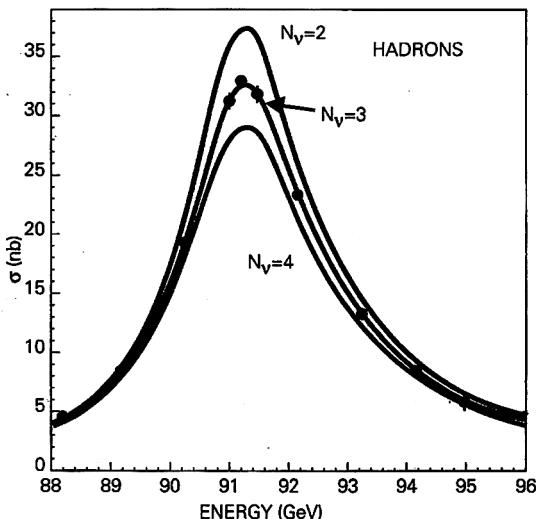
$$U_{CGIM} = \begin{pmatrix} U_{ud} & U_{us} \\ U_{cd} & U_{cs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_C & \sin \theta_C \\ -\sin \theta_C & \cos \theta_C \end{pmatrix}, \quad (12)$$

kde  $\theta_C$  je Cabibbov úhel. To znamená, že i vazbové konstanty pro slabé interakce typu  $udW$ ,  $usW$ ,  $cdW$  a  $csW$  jsou všechny *reálné* a z algebraických vlastností nabitych proudů pak plyne, že symetrie  $CP$  je v takovém případě *přesná*. Pro tři generace je směšování kvarků vyjádřeno pomocí unitární Cabibbo–Kobayashi–Maskawovy (CKM) matice

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

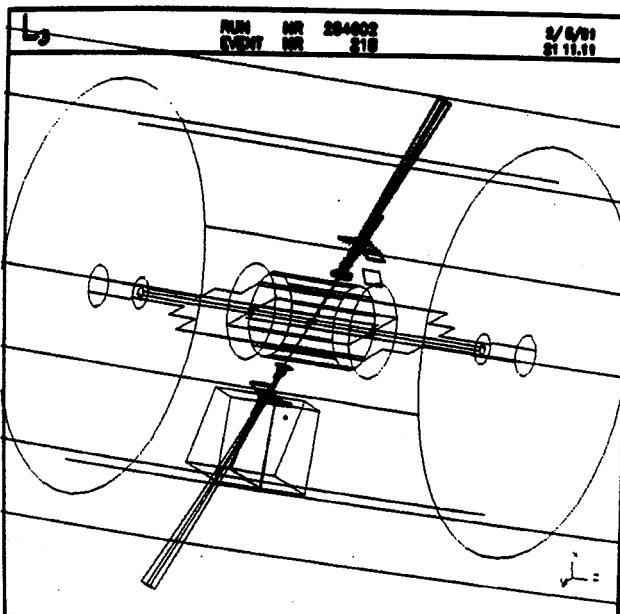
jejíž elementy jsou obecně *komplexní* (lze je parametrizovat pomocí tří úhlů Cabibbova typu a jedné fáze) a to může vést k *narušení*  $CP$ -symetrie v rovnicích popisujících interakce slabých proudů a vektorových bosonů.

Je zřejmé, že v roce 1973 představoval model šesti kvarků dost odvážnou extrapolaci, uvážme-li, že v té době ještě nebyl experimentálně prokázán ani čtvrtý kvark  $c$ , tj. nebyla ještě úplná ani druhá generace elementárních fermionů. Práce Kobayashiego a Maskawy proto několik let ležela víceméně bez povšimnutí, ale zájem o ni pochopitelně dramaticky vzrostl po objevu  $b$ -kvarku (stojí za zmínku, že v letech 1980–2000 byla jednou z nejvíce citovaných prací v čisticové fyzice vůbec). Přesné určení elementů CKM matice patří k hlavním aktuálním cílům experimentální čisticové fyziky, neboť představuje jeden ze zásadních testů správnosti standardního modelu elektroslabých interakcí. Jinými slovy, je důležité vědět, zda všechny efekty narušení  $CP$ -symetrie lze úspěšně popsat pomocí „Kobayashi–Maskawova mechanismu“ (tj. prostřednictvím imaginární části matice (13)) nebo zda v tomto kontextu hraje nějakou roli fyzika přesahující rámec standardního modelu. V současné době se proto dále detailně vyšetřují jednak rozpady K-mesonů známé už ze šedesátých let a kromě toho se hledají také vzácné procesy s relativní četností  $10^{-9}$  a menší. Obzvláště žhavým tématem je však identifikace efektů narušení  $CP$ -symetrie v rozpadech B-mesonů; „ostře sledovaným“ procesem je zejména  $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$  (na kvarkové úrovni mu odpovídá přechod  $b \rightarrow c \bar{c} s$ ).



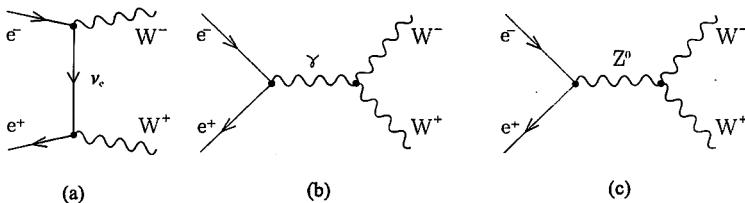
Obr. 10 Neutrální intermediální vektorový boson Z jako rezonance v účinném průřezu produkce hadronů ve srážkách  $e^- e^+$ . Šířka rezonance závisí na počtu lehkých neutrín, na jejichž páry se Z může rozpadat. Hodnota šířky Z změřená na LEP dává s velkou přesností  $N_v = 3$ .

Vraťme se nyní k období, jež následovalo po objevu intermediálních vektorových bosonů W a Z. Zjevný úspěch GWS standardního modelu výrazně motivoval přípravu dalších experimentů, v nichž by bylo možno testovat teorii elektroslabých interakcí přesněji, na úrovni efektů korekcí vyššího řádu, tj. radiačních korekcí vznikajících z Feynmanových grafů s uzavřenými smyčkami – podobně, jako tomu bylo kdysi v případě kvantové elektrodynamiky. K tomuto účelu byly v osmdesátých letech navrženy a zkonstruovány dva výkonné urychlovače, koncipované jako „továrny na  $Z^0$ “, v nichž se mělo docílit hojně (rezonanční) produkce neutrálních intermediálních bosonů ve srážkách vstřícných svazků elektronů a pozitronů (jíž rečeno, celková energie svazků byla nastavena na hodnotu 91 GeV odpovídající klidové hmotnosti Z). Jeden z nich, známý pod zkratkou SLC (Stanford Linear Collider), byl postaven v USA a druhý, kruhový collider LEP (Large Electron Positron Ring), byl vybudován v CERN. Svými rozměry je LEP dosud největší urychlovač na světě – obvod jeho podzemního tunelu, v němž je umístěn hlavní prstenec collideru, je 27 km. Pro ilustraci četnosti produkce Z uvedeme, že nominální luminosita vstřícných svazků LEP (rovná řádově  $10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) odpovídá produkci jednoho Z každé dvě sekundy.



Obr. 11 Počítačová rekonstrukce rozpadu  $Z$  na páru  $e^+ e^-$ , pozorovaného v detektoru L3 na LEP.

Experimenty na těchto nových zařízeních byly zahájeny na přelomu osmdesátých a devadesátých let a do konce 20. století přinesly výsledky, které potvrdily platnost standardního modelu elektroslabých interakcí s přesností řádově jednoho promile. Jedním z „vedlejších produktů“ přesných měření charakteristik elektroslabých procesů byl mj. také odhad hmotnosti top-kvarku provedený ještě před jeho přímou experimentální detekcí. Vtip je v tom, že radiační korekce k měřeným veličinám závisí na hmotnostech virtuálních častic v uzavřených smyčkách Feynmanových diagramů a konfrontace výpočtu s dostatečně přesnými experimentálními daty pak umožňuje provést zmíněný odhad, tj. např. „předpověď“ hmotnosti  $t$ -kvarku. V první polovině devadesátých let už bylo zřejmé, že pokud  $t$ -kvark existuje, musí být velmi těžký, dokonce těžší než  $W$  a  $Z$  – jeho klidová hmotnost byla odhadnuta na hodnotu  $m_t = (169 \pm 24)$  GeV. Top-kvark byl poprvé pozorován v laboratoři FNAL v USA (na urychlovači Tevatron, ve srážkách protonů s antiprotony při energii 1,8 TeV) v roce 1994 a jeho objev byl definitivně potvrzen o rok později. Podle současných experimentálních dat má  $t$ -kvark hmotnost přibližně  $(174 \pm 5)$  GeV a je tedy nejtěžší elementární částicí vůbec (je zhruba stejně těžký jako atom wolframu!). Střední doba jeho života je velmi krátká, řádově  $10^{-25}$  s. Úspěšný odhad  $m_t$  na základě výpočtu radiačních korekcí v rámci teorie elektroslabých interakcí byl zřejmě také bezprostředním popudem pro udělení Nobelovy ceny za rok 1999 G. 't Hooftovi a M. Veltmanovi, jejichž průkopnické práce týkající se renormalizovatelnosti kalibračních teorií měly pro výpočty výše zmíněné-



Obr. 12 Feynmanovy diagramy reprezentující jednotlivé příspěvky k procesu  $e^- e^+ \rightarrow W^- W^+$  ve standardním modelu: (a) slabá interakce nabitych proudů (b) elektromagnetická interakce (c) výměna  $Z^0$  a charakteristická elektroslabá Yang–Millsova interakce WWZ

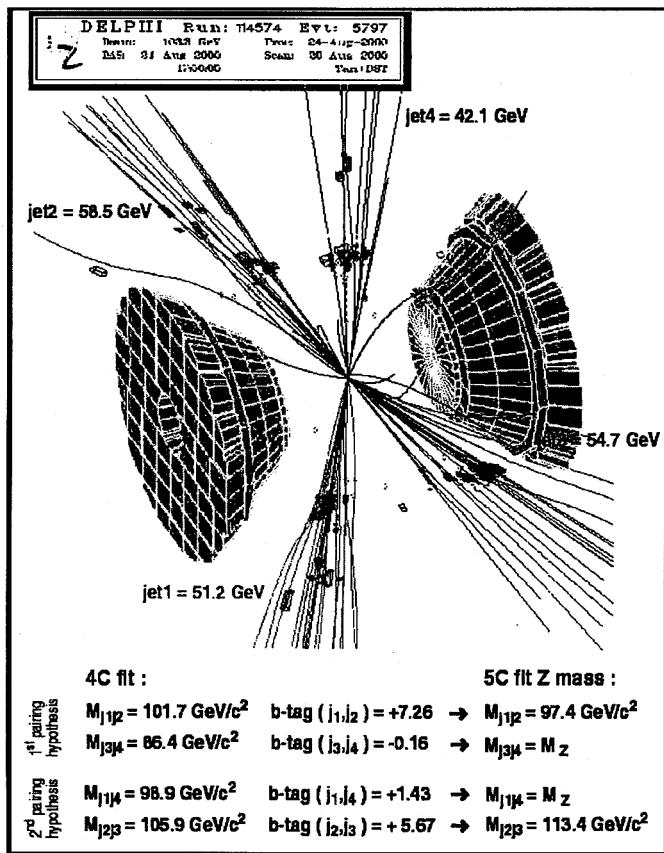
ho typu rozhodující význam (podle oficiálního odůvodnění získali tito dva Holanďané nejprestižnější vědeckou cenu za „objasnění kvantové struktury elektroslabých interakcí“).

Na podzim roku 1995 byla zvýšena energie vstřícných svazků elektronů a pozitronů na LEP na hodnotu, která umožňovala produkovat páry nabitych vektorových bosonů  $W^\pm$  (klidová hmotnost  $W$  odpovídá 80 GeV), takže k produkcii páru  $W^+ W^-$  je zapotřebí celkové energie srážky větší než 160 GeV). Začala tak nová fáze experimentů, nazývaná obvykle LEP II. Energie svazků se do roku 2000 postupně zvyšovala až na 206 GeV a bylo tak mimo jiné možno změřit poměrně detailně závislost účinného průřezu reakce  $e^- e^+ \rightarrow W^- W^+$  na energii srážky. Na obr. 12 jsou znázorněny relevantní Feynmanovy diagramy pro tento proces v rámci GWS standardního modelu (není zde uveden graf s výměnou Higgsova bosonu, který v tomto případě dává zanedbatelný příspěvek).

Výsledky měření potvrdily s velkou přesností předpověď standardního modelu; zejména byla nade vši pochybnost prokázána přítomnost interakce vektorových bosonů typu WWZ, která je charakteristická pro teorie s neabelovskou kalibrační symetrií. Bez příspěvku diagramu (c) by totiž účinný průřez uvažovaného procesu rychle rostl s rostoucí energií (to je chování odpovídající nerrenomalizovatelné teorii), data však jasné ukazují mnohem mírnější průběh této závislosti.

Jediným „chybějícím článkem“ standardního modelu tak zůstává Higgsov boson  $H$ , o němž byla řeč v kapitole „Elektroslabé sjednocení“. Jak už jsme konstatovali dříve, GWS teorie bohužel nedává žádnou konkrétní předpověď pro jeho hmotnost, což znamená, že současné i budoucí experimenty musí systematicky prohledat poměrně širokou oblast dostupných energií. Jsou ovšem určitá obecná omezení plynoucí z teorie, takže dříve či později se fundamentální otázka existence či neexistence Higgsova bosonu rozhodne s definitivní platnosti. Lze např. říci, že jeho hmotnost je omezena shora hodnotou řádově rovnou 1 TeV (tj. 1 000 GeV), neboť  $H$  by pak přestal být dobře definovanou částicí – jeho rozpadová šířka by byla přibližně rovna jeho klidové energii. V takovém případě by také některé interakce Higgsova bosonu byly mnohem silnější než např. typické elektroslabé interakce vektorových bosonů. Standardní model by tak ztratil svou vnitřní konzistence v rámci poruchového rozvoje (tj. metoda Feynmanových diagramů by byla prakticky nepoužitelná) a jednoduchý „Higgsov trik“, pomocí něhož se v GWS teorii generují hmotnosti  $W$  a  $Z$ , by bylo třeba nahradit jiným mechanismem narušení elektroslabé symetrie. Hodnotu  $m_H$  lze také odhadnout na základě analýzy radiačních korekcí k měřitelným charakteristikám elektroslabých procesů, podobně jako tomu bylo v případě  $t$ -kvarku. Tyto korekce však závisí na  $m_H$  mnohem slaběji než na  $m_t$  a příslušný odhad hmotnosti Higgsova bosonu proto není příliš přesný. Lze však říci, že současná data

z přesných testů standardního modelu silně preferují hodnotu  $m_H$  menší než 200 GeV. Na druhé straně, negativní výsledky přímého hledání H na LEP II dávají pro hmotnost Higgsova bosonu dolní mez, která je nyní zhruba 113 GeV.



Obr. 13 Případ pozorovaný v detektoru DELPHI (zde rekonstruovaný na obrazovce počítače) na LEP II, který by mohl odpovídat společné produkci Higgsova bosonu a vektorového bosonu  $Z^0$  a jejich následnému rozpadu na kvark–antikvarkové páry. Konečnými produkty reakce jsou úzké „jet“ („trysky“) hadronů vznikající z kvarků a antikvarků.

V této souvislosti stojí za zmínku, že v létě roku 2000 – těsně před definitivním uzavřením experimentů LEP II – byl pozorován signál, který naznačoval produkci a následný rozpad Higgsova bosonu s hmotností asi 115 GeV. Dominantním mechanismem eventuelní produkce H na LEP II je proces  $e^- e^+ \rightarrow Z H$  a při energii srážky rovné 206 GeV může spolu se Z vzniknout H s hmotností maximálně 115 GeV. Takový Higgsův boson se podle standardního

modelu rozpadá nejčastěji na pár těžkých fermionů – za daných okolností by převládající rozpadový mód byl  $H \rightarrow b\bar{b}$  a druhý nejčastější (zhruba desetkrát méně pravděpodobný) je  $H \rightarrow \tau^-\tau^+$ . Ve zmíněném signálu z LEP II experimentátoři pozorovali právě případy produkce páru  $b\bar{b}$ , jež odpovídaly rozpadu částice s hmotností přibližně 115 GeV (viz obr. 13). Situace, v níž byla analyzována data, byla kuriózní zejména tím, že k odhalení zajímavých případů došlo prakticky na poslední chvíli – definitivní uzavření experimentů na LEP II bylo původně plánováno na konec září 2000. Navíc, že čtyř nezávislých experimentálních skupin (jež pracovaly se čtyřmi různými detektory) pouze dvě viděly příslušný signál. Provoz LEP II byl prodloužen o měsíc a celé zařízení bylo nakonec uzavřeno na začátku listopadu 2000. U mnohých fyziků to jistě muselo vyvolat „tantalovské“ pocity, ale v konečném rozhodnutí vedení CERN nakonec zřejmě převážila snaha nenarušit výrazněji harmonogram prací spojených s přípravou experimentů na novém urychlovači, známém pod zkratkou LHC (Large Hadron Collider). Toto zařízení má pracovat se vstřícnými svazky protonů s celkovou energií až 14 TeV, jež budou urychlovány v původním prstenci LEP. Výsledky plánovaných experimentů na LHC by měly dát definitivní odpověď na otázky spojené s možnou existencí Higgsova bosonu. Podle projektu má být LHC spuštěn v roce 2006 a s určitou dávkou optimismu tak lze říci, že problém Higgsovy částice by mohl být vyřešen okolo roku 2010. Pokud je však  $H$  skutečně tak lehký, jak naznačila zmíněná „last-minute“ data z LEP II, šanci na jeho objevení mají také experimentátoři na collideru Tevatron ve FNAL v USA, který od března 2001 pracuje se vstřícnými svazky protonů a antiprotonů s celkovou energií zvýšenou na 2 TeV a plánuje se zde také zvýšení luminosity. K objevu lehkého Higgsova bosonu na Tevatronu by přitom mohlo dojít už do roku 2006, takže situace v experimentální čisticové fyzice bude v tomto období zřejmě celkem napínává.

Jak jsme viděli, GWS model elektroslabého sjednocení zaznamenal – po poněkud rozpačitých začátcích v sedesátých letech – ohromující úspěch hned v několika směrech. Jelikož však o vlastnostech předpokládaného Higgsova sektoru víme dosud jen velmi málo (resp. téměř nic), nelze současnou teorii elektroslabých interakcí ani zdaleka považovat za uzavřenou kapitolu moderní čisticové fyziky. Proto je v našem přehledu věnován největší prostor právě této části standardního modelu mikrosvěta – je totiž zřejmé, že další vývoj představ o fundamentálních silách mezi elementárními česticemi bude do značné míry záviset na řešení dnešních otevřených problémů fyziky elektroslabých interakcí.

Na druhé straně, základy moderní teorie silných interakcí – kvantové chromodynamiky – se dnes považují za dobré známé a ověřené a v budoucnosti zde lze těžko očekávat nějaké překvapení na fundamentální úrovni. Přesto je fyzika silných interakcí stále předmětem intenzivního výzkumu, zejména proto, že teorie skýtá mnoho možností aplikací v oblasti relativní nízkých energií a dává tak předpovědi ověřitelné při mnohem nižších nákladech, než je tomu např. v případě hledání Higgsova bosonu. V následující kapitole tedy pro úplnost shrneme vývoj představ o silných interakcích, který vedl ke vzniku kvantové chromodynamiky; časově jde prakticky o stejně období, kdy se na fyzikální scéně etabloval GWS model elektroslabých interakcí.

## SILNÁ INTERAKCE

---

Jakmile se od poloviny sedesátých let začal postupně prosazovat kvarkový model hadronů, bylo zřejmé, že stará Yukawova teorie jaderných sil založená na představě výměny pionů nemůže obstát jako realistiky popis silné interakce na fundamentální úrovni. Trvalo však několik let, než byla vytvářena adekvátní teorie mezikvarkových sil. Problém spočíval v tom, že z počátku nebylo příliš jasné, co je vlastně relevantní „háboj“ hadronových konstituentů, který způsobuje, že existují baryony a mezony jako vázané stavby tří kvarků, resp. kvarku a anti-

kvarku. Začátkem sedmdesátých let se vyjasnilo, že rozhodující dynamickou roli hraje kvantové číslo nazývané **barva** (o kterém jsme se již zmínili v předchozí kapitole), jež bylo do kvarkového modelu původně zavedeno kvůli uspokojivému popisu baryonů složených z identických kvarků. K tomu je třeba nejprve uvést pář slov na vysvětlenou.

Kvarky jsou fermiony se spinem 1/2 a musí tedy splňovat **Pauliho vylučovací princip** – to znamená, že dva identické kvarky nemohou být ve stejném kvantovém stavu (tentotéž princip je ve skutečnosti důsledkem obecnějšího pravidla, podle něhož kvantově-mechanická vlnová funkce systému identických fermionů musí být *antisymetrická* při jejich permutacích). Charakteristiky některých známých baryonů složených ze stejných kvarků (jako je např.  $\Delta^{++}$  nebo  $\Omega^-$ ) však ukazují na to, že jejich vlnové funkce (v základním stavu) jsou symetrické jak vůči prostorovým, tak i spinovým proměnným. V rámci původního Gell-Mann-Zweigova modelu to představovalo paradox – zdálo se, že kvarky nelze považovat za standardní fermiony, navzdory polocelé hodnotě jejich spinu. Tento problém lze odstranit, předpokládáme-li, že každý kvark existuje ve třech různých „barvách“: v matematické řeči, kvark s určitou vůní představuje ve skutečnosti triplet vůči další (v tomto případě přesné) symetrie  $SU(3)$ . Základní stav výše zmíněných baryonů je pak antisymetrický právě vůči barvě a potenciální spor se základními principy kvantové teorie je tak odvrácen.

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

Pro popis interakcí kvarků se z počátku užíval model podobný kvantové elektrodynamice, v němž místo fotonu figuroval „gluon“, částice se spinem 1, která byla podle tehdejších představ barevným singletem, tj. nenesla žádnou barvu. Z dobové literatury je však také zřejmé, že už ve druhé polovině sedmdesátých let někteří teoretici (jako první zřejmě Y. Nambu) uvažovali o multipletu barevných gluonů – tj. o schématu, které v podstatě odpovídá současným představám. Rozhodující zlom však nastal až v roce 1973, v souvislosti s objevem tzv. **asymptotické volnosti** neabelovských kalibračních teorií; právě v tomto roce nakonec vznikla **kvantová chromodynamika (QCD)** jakožto polní teorie silných interakcí založená na principu lokální symetrie „barevné“  $SU(3)$ . V takové teorii je pak nositelem interakce **oktet barevných gluonů** – ty odpovídají osmi Yang-Millsovým polím ( $8 = 3^2 - 1$ ) a podle známých obecných pravidel interagují také samy se sebou (existují samointerakce tří a čtyř gluonů). K obsahu a významu konceptu asymptotické volnosti se vrátíme za chvíli, ale nejprve snad stojí za to uvést několik poznámek historického charakteru.

Je skutečně poněkud obtížné přesně a objektivně označit práci, v níž byla kvantová chromodynamika poprvé formulována. Asymptotickou volnost odhalili David Gross, Frank Wilczek a nezávisle na nich David Politzer a své výsledky publikovali ve stejném čísle časopisu *Physical Review Letters* zhruba v polovině roku 1973. Ačkoli jejich výpočty měly dosti obecnou platnost, měly evidentně na mysli i možné aplikace v realistické teorii silných interakcí. Na druhé straně, za vlastní tvůrce QCD se v literatuře často označují Harald Fritzsch, Murray

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

Gell-Mann a Heinrich Leutwyler, a sice na základě jejich společného článku publikovaného koncem roku 1973 v časopise Physics Letters. Tato práce však byla zaslána k publikaci až několik měsíců po otištění zásadních článků Grossa, Wilczeka a Politzera. Existují i odkazy na jednu z dřívějších prací Fritzsche a Gell-Manna (obsaženou ve sborníku mezinárodní konference o fyzice vysokých energií konané v Chicagu roku 1972), ale při jejím studiu pozorný čtenář snadno zjistí, že ta je v daném kontextu poněkud zavádějící. Spiše se tedy zdá, že začátkem sedmdesátých let základní myšlenka QCD jaksi „viseela ve vzduchu“, ale rozhodující impuls k její definitivní formulaci dodaly teprve fundamentální práce o asymptotické volnosti neabelovských kalibračních teorií. Z těchto poznámek je snad také dostatečně zřejmé, že genéza QCD byla značně spletitá; v každém případě, samotný název „kvantová chromodynamika“ prosadil M. Gell-Mann (odpovídá řeckému výrazu „chromos“ pro barvu) a od stejněho autora pochází i termín „gluon“ (z angl. „glue“ – lepidlo).

Jaký je tedy obsah a význam pojmu „asymptotická volnost“ v kontextu silných interakcí? Asymptotická volnost (angl. „asymptotic freedom“) kvantové chromodynamiky znamená, zhru- ba řečeno, že interakce mezi kvarky (resp. samointerakce gluonů) vymizí na malých vzdále- nostech. Provedeme-li přímočarou (monotonou) extrapolaci na velké vzdálenosti, lze očekávat, že v této oblasti silná interakce poroste. Oprávněnost takové extrapolace ovšem není nikterak zřejmá, neboť Gross, Wilczek a Politzer získali své výsledky na základě výpočtu Feynmano- vých diagramů, tj. v rámci poruchového rozvoje. Poruchové metody jsou spolehlivé jen v přípa- dě, že interakce je dostatečně slabá (tzn. příslušná vazbová konstanta je malá) – v daném přípa- dě tomu tak je pro malé vzdálenosti interagujících částic. Oblast velkých vzdáleností je třeba vyšetřit „neporuchovými“ metodami (jež jsou pro tyto účely rovněž rozpracovány) a výsledky jejich aplikace skutečně ukazují, že s rostoucí vzdáleností roste energie interakce barevných objektů přibližně lineárně (což odpovídá konstantní síle na velkých vzdálenostech). Interakce barevných nábojů v rámci QCD se tedy chová zcela opačně než elektromagnetické sily! Růst energie interakce kvarků a gluonů se vzdáleností znamená, že k rozbití libovolného hadronu na jeho volné konstituenty (např. k roztržení kvark–antikvarkového páru tvůrčího mezon) je za- potřebí nekonečně velké energie; jinými slovy, podle teorie QCD jsou objekty nesoucí barevný náboj v (bezbarvých) hadronech trvale „uvězněny“ (českému „uvěznění“ odpovídá anglický termín „confinement“). To ovšem přesně odpovídá pozorované skutečnosti – při srážkách had- ronů vždy vznikají zase jen hadrony (případně také leptonové páry), ale nikdy ne volné kvarky nebo gluony.

Vraťme se však zpět k samotnému fenoménu asymptotické volnosti, tj. k vymizení silné interakce kvarků a gluonů na malých vzdálenostech. Tento pozoruhodný výsledek teoretických výpočtů rovněž má, jak se ukázalo, jasnou oporu v experimentálních datech. Souvislost teorie a experimentu je zde však poněkud méně názorná než v případě uvěznění barev a její objasnění proto vyžaduje podrobnější komentář a rovněž určitou historickou retrospektivu.

Vnitřní strukturu nukleonů lze efektivně zkoumat např. pomocí jejich srážek s elektrony (eventuelně jinými leptony) při vysokých energiích. Pokud při takovém procesu dojde k velké změně energie a hybnosti dopadajícího elektronu (v takovém případě mluvíme o „tvrdé“ srážce), lze říci, že leptonový projektil zkoumá strukturu terčového nukleonu na malých vzdále- nostech. Poněkud přesněji, jakousi hloubkovou sondou, kterou si můžeme „posvítil“ do nitra nukleonu, je virtuální foton (s velkou energií a hybností) zprostředkující elektromagnetickou interakci projektuлу a terče. Experimentální zařízení, v němž se studují srážky leptonů a nuk- leonů při dostatečně velkých energiích (tj. urychlovač a detektor), lze tedy chápat jako mikro- skop s ohromnou rozlišovací schopností – lepší než je rozměr nukleonu, tj.  $10^{-15}$  m a méně (připočeme v této souvislosti, že rozlišovací schopnost sondy je dána její vlnovou délkou a malá vlnová délka odpovídá velké hybnosti).

První experimenty s rozptylem vysokoenergetických elektronů na nukleonech probíhaly již od padesátých let na Stanfordově univerzitě v Kalifornii. Průkopníkem v této oblasti byl Ro-

bert Hofstadter, který vyšetřoval pružný rozptyl elektronů s energií 188 MeV na vodíkovém terci. Jeho měření definitivně prokázala, že proton není bodová částice<sup>13</sup> – pro příslušný „střední kvadratický poloměr“ vyšla hodnota  $0,74 \cdot 10^{-15}$  m (s přesností zhruba 30 %). Za tuto práci získal Hofstadter Nobelovu cenu v roce 1961. Poznamenejme, že ve zmíněných experimentech se fakticky měřily tzv. **formfaktory** pružného rozptylu (jež představují Fourierův obraz rozložení elektrického náboje a proudu uvnitř protonu) a přidaná hybnost byla přitom relativně malá; jednalo se tedy o „měkký“ rozptylový proces. Znalost formfaktorů v takové kinematické oblasti stačí k určení středního poloměru, ale pro detailnější studium vnitřní struktury nukleonů je zapotřebí podstatně vyšších energií.



Robert Hofstadter  
1915–1990

K tomuto účelu byl ve Stanforde postaven lineární urychlovač, který dával svazek elektronů s energií 18 GeV (právě toto zařízení se stalo základem americké národní laboratoře SLAC, o níž byla v tomto textu již několikrát zmínka; jejím prvním ředitelem se stal proslulý experimentátor Wolfgang Panofsky). Experimenty na novém urychlovači začaly v roce 1967. Podstatné bylo, že dosažená (tehdy mimořádně vysoká) energie elektronů umožňovala vyšetřovat nejen jejich pružný rozptyl, ale zejména výrazně nepružné srážky s nukleony terče. V takových případech obsahuje koncový stav rozptýlený elektron a místo počátečního nukleonu obecně libovolný počet hadronů (ten je ovšem omezen kinematicky – zákonem zachování energie a hybnosti). V technickém žargonu čisticové fyziky se pro tento typ procesu ustálil název **hluboký nepružný rozptyl** (z angl. „deep inelastic scattering“) a pro stručnost budeme v dalším občas užívat standardní akronym DIS odpovídající původnímu anglickému názvu.

První výsledky měření nepružných srážek ve SLAC byly pozoruhodné. Zatímco formfaktory pružného rozptylu rapidně klesají s rostoucím kvadrátem přidané čtyřhybnosti  $Q^2$  (jde samozřejmě o čtyřhybnost předanou elektronem), v případě DIS se ukázalo, že příslušné formfaktory (tzv. **strukturální funkce** terčového nukleonu – např. protonu) závisí na  $Q^2$  jen velmi slabě. Přesněji řečeno, strukturální funkce jsou obecně vyjádřeny pomocí dvou kinematických proměnných (kromě  $Q^2$  vchází do hry ještě skalární součin  $Q$  a čtyřhybnosti terčového nukleonu), ale v určité kinematické oblasti (v níž je hodnota  $Q^2$  velká) fakticky závisí pouze na bezrozměrném poměru těchto dvou veličin. Tento jev se nazývá „škálování“ (anglicky „scaling“). Jako první studoval takový efekt čistě teoreticky James Bjorken (ještě před publikací dat ze SLAC), a proto se v literatuře obvykle nazývá **Bjorkenovo škálování**. Bjorken k němu dospěl formálně na základě představy, že hadronové proudy vstupující do elektromagnetické interakce s virtuálním fotonem jsou vyjádřeny pomocí volných kvarkových polí. Nezávisle na něm formuloval R. Feynman model, podle něhož při DIS dochází k rozptylu elektronu na volném bodovém konstituentu, který nese určitý zlomek hybnosti a energie terčového nukleonu. Feynman nazval tyto konstituenty nukleonů **partony**. V každém případě, situace značně připomínala někdejší Rutherfordův objev atomového jádra – bylo zřejmé, že

<sup>13</sup> Tuto skutečnost už ostatně naznačovala experimentální hodnota spinového magnetického momentu protónu  $\mu_p$  známá od třicátých let. Ta se výrazně liší od předpovědi Diracovy rovnice, podle níž by  $\mu_p$  měl být roven „jadernému magnetonu“  $\mu_N = \frac{e \cdot \hbar}{2m_p}$ . Ve skutečnosti je však  $\mu_p = 2,79 \cdot \mu_N$ . Podobně je tomu v případě neutronu, jehož magnetický moment by podle Diracovy rovnice měl být nulový, ale experimentální hodnota je  $\mu_n = -1,91 \cdot \mu_N$ .

při dostatečně tvrdých srážkách se elektron rozptyluje na prakticky bodových objektech a nikoli na homogenním „pudingu“, který by mohl vyplňovat objem nukleonu. V rámci Feynmanova modelu bylo tedy možno nukleon chápát (v kinematické oblasti odpovídající DIS) jako svazek partonů bez vnitřní struktury, které dohromady nesou celou jeho hybnost a energii a přitom na ně nepůsobí silná interakce.

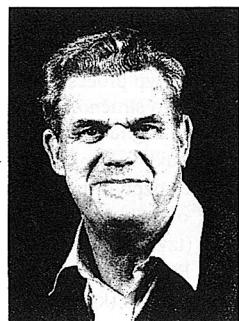
Experimenty s hlubokým nepružným rozptylem byly později opakovány i v jiných světových laboratořích, přičemž kromě elektronů se jako projektily užívaly také jiné leptony – zejména mionová neutrino. Zatímco teoretické předpovědi pro DIS elektronů na nukleonech jsou závislé na určitých kombinacích elektrických nábojů partonů, v případě neutrín vstupuje do hry pouze slabá interakce a předpovědi modelu pak na nábojích nezávisí. Srovnáním experimentálních dat pro oba případy lze potom určit náboje partonů (přesněji řečeno, jejich určité kombinace). Tak se již v první polovině sedmdesátých let ukázalo, že partony je možno ztožnit s kvarky a Bjorken–Feynmanovu teorii DIS lze tedy nazvat **kvark-partonovým modelem**. Navíc, partonový model byl úspěšně aplikován také na jiné tvrdé procesy, jako je např. produkce leptonových párů s velkou invariantní hmotností v proton–protonových srážkách (tzv. Drell–Yanův proces, o němž jsme se již stručně zmínili dříve v souvislosti s objevem častic  $J/\psi$  a  $\Upsilon$ ). Nakonec ještě poznamenejme, že tři protagonisté průkopnických experimentů ve SLAC – Jerome Friedman, Henry Kendall a Richard Taylor – získali za svou práci společně Nobelovu cenu v roce 1990.



Jerome Friedman  
1930–



Henry Kendall  
1926–1999



Richard Taylor  
1929–

Po tomto poněkud dlouhém výkladu je už celkem snadné pochopit, proč je asymptotická volnost velmi vítaným aspektem kvantové chromodynamiky jakožto teorie silných interakcí. Jak už jsme konstatovali, experimentální studium DIS umožňuje nahlédnout hluboko do nitra nukleonů a testovat přitom síly mezi kvarky na velmi malých vzdálenostech. Úspěch Feynmanovy teorie jasně naznačuje, že v relevantní kinematické oblasti lze skutečně prakticky ignorovat silnou interakci mezi kvarky uvnitř nukleonů – tento základní předpoklad partonového modelu tedy dobře koresponduje právě s asymptotickou volností QCD (věznící síly se projeví až na větších vzdálenostech rádu  $10^{-15}$  m, ve stádiu „hadronizace“ partonů, jež se účastní tvrdé srážky). Bjorken–Feynmanova teorie DIS ovšem zahrnuje ještě další konkrétní modelové představy a nelze tedy jednoduše říci, že partonový model je důsledkem kvantové chromodynamiky – QCD pouze dává teorii tvrdých hadronových procesů hlubší a vnitřně konzistentní koncepční rámcem. Podstatné přitom je, že zatímco z jednoduchého partonového modelu vychází Bjorkenovo škálování *přesně*, kvantová chromodynamika umožňuje spočítat jeho mírné *narušení* (tj. výše zmíněnou slabou závislost na kvadrátu předané čtyřhybnosti  $Q^2$ ), které se

skutečně pozoruje. To ovšem reflekтуje skutečnost, že „volnost“ QCD je pouze asymptotická: pravděpodobnost interakce kvarků (partonů) přesně vymízí při nulové vzdálenosti, ale na velmi malých konečných vzdálenostech dává QCD příspěvek, který mírně modifikuje předpověď partonového modelu.

Zde je na místě ještě jedna víceméně technická poznámka. Asymptotická volnost se odvozuje na základě výpočtu Feynmanových diagramů, jež přispívají k renormalizaci barevného náboje kvarku nebo gluonu (poruchový rozvoj QCD je renormalizovatelný podobně jako je tomu v případě kvantové elektrodynamiky) a v matematickém smyslu primárně znamená vymízení „efektivního náboje“, resp. „efektivní vazbové konstanty“ při velkých hodnotách předané čtyřhybnosti v uvažovaném procesu. Kličovou roli přitom hraje samointerakce gluonů – kdyby existovala jen interakce barevných kvarků s gluony, choval by se příslušný efektivní náboj stejně jako v kvantové elektrodynamice, tj. rostl by s rostoucím  $Q^2$ . Jinými slovy, renormalizační efekty Feynmanových diagramů s uzavřenými smyčkami gluonových a kvarkových linií působí „proti sobě“ a pokud by počet kvarkových typů (tj. „vůni“) byl příliš velký, QCD by asymptotickou volnost ztratila. Výsledky výpočtu relevantních jednosmyčkových diagramů ukazují, že QCD se třemi barvami kvarků a  $N_f$  vůněmi je asymptoticky volná, pokud je číselný výraz  $11 - \frac{2}{3} N_f$  kladný. Tak tomu je v našem reálném světě, kde  $N_f = 6$ ; pro  $N_f \geq 17$  by však asymptotická volnost přestala v QCD platit.

Kvantová chromodynamika se během poslední čtvrtiny 20. století stala všeobecně uznávanou teorií silných interakcí a nalezla velké množství aplikací jak v oblasti tvrdých procesů (kde lze užívat poruchové metody Feynmanových diagramů kombinované s partonovým modelem), tak v oblasti hadronové spektroskopie, pro niž bylo třeba vyvinout specifické neporuchové metody. Ačkoli se základem QCD všeobecně důvěřuje, na mnoha světových experimentálních zařízeních nadále probíhá přesné testování jejich předpovědí, neboť řada otázek spojených s popisem konkrétních hadronových procesů zůstává dosud otevřená. Mezi nejvýznamnější urychlovací komplexy zaměřené na výzkum hadronových interakcí při vysokých energiích patří elektron–protonový collider HERA v německé laboratoři DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron, Hamburg) a již zmíněný p–p collider Tevatron v americké národní laboratoři FNAL lokalizované poblíž Chicaga.

Podstatným aspektem moderní fyziky silných interakcí samozřejmě vždy bude pozoruhodný jev **uvěznění barevného náboje**. Ten představuje značnou komplikaci při konfrontaci teoretických výsledků a experimentálních dat, neboť kvantová chromodynamika je formulována jako kalibráční teorie interakcí kvarků a gluonů, zatímco reálně pozorovanými částicemi jsou za obvyklých podmínek vždy bezbarvé hadrony. V této souvislosti stojí za zmínu, že v experimentech se srážkami těžkých atomových jader (například olova, zlata nebo uranu apod.) lze docílit extrémních stavů charakterizovaných mimořádně vysokou teplotou a hustotou, v nichž se nukleony „roztaží“, a v oblasti srážky se krátkodobě vytvoří „kvark–gluonové plazma“ (takový stav hmoty zřejmě musel existovat i v raných fázích vývoje vesmíru). Aby nevzniklo nedorozumění, je třeba zdůraznit, že existence kvark–gluonového plazmatu ve skutečnosti není ve sporu s uvězněním barvy v rámci QCD. Kvantová chromodynamika důvěryhodně (ačkoli ne zcela rigorózně) předpovídá uvěznění kvarků a gluonů v jednotlivých hadronech, tj. zhruba řečeno při nulové teplotě a malých hustotách. Předpovídá však rovněž specifické fázové přechody při vysokých teplotách a hustotách, přičemž jedním z nich je právě přechod do fáze, v níž kvarky a gluony opustí své původní hadronové vězení – jinými slovy, hadrony ztratí svoji individualitu. První indikace vzniku kvark–gluonového plazmatu byla oznámena v roce 1999 po ukončení série experimentů se srážkami těžkých iontů v CERN. V současné době probíhají podobné experimenty na collideru RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider).

v národní laboratoři BNL v americkém Brookhavenu a těší se značné pozornosti odborné i laické veřejnosti.

## EPILOG

Standardní model (SM) fyziky elementárních částic, jehož genezi a současný stav jsme popsali v předchozích kapitolách, je dnes – na přelomu druhého a třetího tisíciletí – mimořádně úspěšnou teorií mikrosvěta. Lze říci, že SM byl nakonec až *nečekaně úspěšný*, uvážíme-li, jak spekulativní teorii představoval v době svého vzniku a jaké technické překážky bylo třeba překonat při jeho matematické formulaci. Přinosem SM je jednak **redukce počtu elementárních částic** ve srovnání s nepřehlednou situací padesátých a šedesátých let (tj. definitivní posun na úroveň **kvarků a leptonů**), ale zejména **identifikace základního dynamického principu**, který určuje povahu interakcí v mikrosvětě. Tím je princip lokální vnitřní symetrie neboli (neabelovské) **kalibrační symetrie**. Zdá se, že tímto klíčovým výsledkem si můžeme být dnes už jisti, jak v oblasti elektroslabých interakcí (GWS model), tak v případě silných interakcí kvarků a gluonů (QCD). Mimořádně pozoruhodným rysem SM byla ve své době předpověď několika nových částic (včetně jejich vlastností), které byly posléze potvrzeny experimentálně – historie intermediálních bosonů W a Z je v tomto ohledu příkladem par excellence. Je určitou ironií historie, že symetrie  $SU(2)$  a  $SU(3)$ , považované za fundamentální v padesátých a šedesátých letech, jsou nakonec (v matematickém smyslu) podstatné i v rámci standardního modelu, ale hrájí zde zcela odlišnou fyzikální roli:  $SU(2)$  představuje neabelovskou část lokální symetrie elektroslabých interakcí a  $SU(3)$  odpovídá (přesně) barevné symetrii, jež určuje dynamiku silných interakcí. Původní izospinová  $SU(2)$  a Gell-Mann–Ne’emanova  $SU(3)$  jsou z hlediska dnešního standardního modelu přibližnými „náhodnými“ symetriemi, jež pouze reflektují jisté vlastnosti spektra hmotností lehkých kvarků.

Ve srovnání s modely slabých a silných interakcí z padesátých a šedesátých let je SM podstatně dokonalejší teorií a je nepochybné, že se jeho tvůrcům skutečně podařilo odhalit další „vrstvu“ ve struktuře hmoty a úspěšně vystihnout podstatu relevantních interakcí. Na druhé straně, v současné době celkem oprávněně převládá názor, že standardní model téměř jistě ne-představuje „finální teorii“ elementárních částic, nýbrž je pouze „efektivní teorie“ platnou v oblasti dnes dostupných energií. Jedním z důvodů, proč lze očekávat nějakou hlubší teorii vycházející za rámec SM, je poměrně velký počet volných parametrů, které SM obsahuje, ale jejich hodnoty nedokáže vysvětlit. Pokud předpokládáme (dnes už poněkud nerealisticky), že všechna neutrína jsou nehmotná, je takových volných parametrů celkem 18 (1 vazbová konstanta QCD, elektromagnetická konstanta jemné struktury  $\alpha$ , Fermiho konstanta  $G_F$ , Weinbergův úhel  $\theta_W$ , hmotnost Higgsova bosonu, 3 hmotnosti nabitéch leptonů, 6 hmotností kvarků a 4 parametry Kobayashi–Maskawovy matice). V rozšířeném schématu, v němž má leptonová část elektroslabé teorie analogickou strukturu jako kvarkový sektor, je třeba přidat ještě 3 hmotnosti pro neutrín a 4 parametry příslušné směšovací matice. Nejobecnější verze SM tedy vyžaduje 25 volných parametrů. V této souvislosti poznamenejme, že problém hmotností a směšování neutrín patří dnes – zejména po objevu tzv. neutrínových oscilací v japonském detektoru Super-Kamiokande v roce 1998 – mezi nejsledovanější otázky čisticové fyziky.

Prakticky všeobecně se tedy očekává, že v dohledné budoucnosti se dočkáme odhalení nových jevů, které přesahnu rámec SM. Teorií, které popisují možnou fyziku za hranicemi SM, byla v poslední čtvrtině 20. století vypracována celá řada a některé z nich se průběžně srovnávají s výsledky nedávných nebo současných experimentů – analýza dat tak může dát alespoň omezení na relevantní parametry „nové fyziky“ (např. na hmotnosti předpokládaných, leč do-

sud nepozorovaných častic). Otevřenou otázkou číslo jedna je však nepochybně problém generování hmotnosti intermediálních bosonů elektroslabých interakcí, tj. podstata Higgsova mechanismu. S tím ovšem souvisí také otázka existence či neexistence Higgsova bosonu H. Je nutno zdůraznit, že existence H je nezbytně nutná jen pro udržení renormalizovatelnosti poruchového rozvoje reprezentovaného Feynmanovými diagramy. Je však myslitelný i scénář, v němž elementární Higgsov boson ve smyslu SM neexistuje a za vznik hmotnostních členů pro W a Z odpovídá nějaká nová silná interakce, jejíž efekty nelze v plném rozsahu popsat pomocí poruchových metod. Současná data však nepřímo svědčí spíše ve prospěch existence relativně lehkého konvenčního Higgsova bosonu v rámci SM. Ať tak či onak, tento problém bude téměř jistě definitivně vyřešen na základě experimentů na collideru LHC, který se v současné době buduje v CERN, přičemž relevantní časový horizont představuje (podle optimistického odhadu) zhruba rok 2014.<sup>14</sup>

Mnohem obtížnější je však problém hmotnosti elementárních fermionů, který se často v literatuře nazývá poněkud obecněji „problém vůně“ („problem of flavour“). Jde především o to, jaký může být přirozený mechanismus vzniku tak širokého spektra hmotností (s rozsahem prakticky 13 rádů, od  $10^{-2}$  eV pro neutrino do 100 GeV pro top-kvark). Obecnější, je tady stále stará otázka I. Rabiho „Kdo si to objednal?“ vznesená na konci třicátých let na adresu mionu. Na tu otázku dodnes neznámé uspokojivou odpověď a navíc je ve spektru elementárních leptonů a kvarků takových „neobjednaných“ častic (tj. takových, jež nehrájí přímou roli ve stavbě okolního světa) hned několik. Jinak řečeno, je hluboce nejasné, na základě jakého principu by mělo existovat právě šest kvarků (pokud je jich opravdu právě šest). Jediným argumentem ve prospěch šesti kvarků je, že to je jejich minimální počet, při němž v teoretickém rámci SM přirozeně dochází k narušení  $CP$ -symetrie (jež je zatím ve shodě se všemi existujícími „pozemskými“ experimenty).<sup>15</sup>

Přirozeně se nabízí myšlenka, že dosud známé a poněkud záhadné spektrum leptonů a kvarků je projevem jejich další vnitřní struktury; v současné době však neexistuje žádný uspokojivý teoretický model substruktury častic standardního modelu a nejsou známa ani experimentální data, která by ukazovala v tomto směru.

Bez ohledu na určitou skeptiku, která se člověka nutně zmocní tváří v tvář témtoto fundamentálnímu a mimořádně obtížnému problémůmu, je třeba zdůraznit, že fyzika elementárních častic má ve třetím tisíciletí velmi dobrou perspektivu a už během jeho první dekády zde můžeme s jistotou očekávat výrazný pokrok hned v několika směrech najednou. Lze také říci, že bez ohledu na budoucí vývoj teoretických představ zůstane SM nepochybně trvalou součástí fyzikálního poznání jako teorie platná v určité omezené oblasti energií; v tomto smyslu je současný standardní model mikrosvěta jedním z nejsilnějších výsledků přírodovědy 20. století.

<sup>14</sup> Je pozoruhodné, že existence Higgsova bosonu s hmotností zhruba do 130 GeV je charakteristický rysem dnes velmi populárních rozšíření standardního modelu, založených na ideji supersymetrie (SUSY), což je, zhruba řečeno, symetrie spojující bosony s fermiony. Takové modely předpovídají bohaté spektrum nových častic („superpartnerů“ známých častic SM). Zatím však není k dispozici žádný přímý experimentální argument ve prospěch SUSY; také tato otázka – existence či neexistence supersymetrických častic – by měla být definitivně zodpovězena na základě experimentů na LHC.

<sup>15</sup> V této souvislosti je důležité si uvědomit, že narušení  $CP$ -symetrie má také dramatické důsledky pro kosmologii: vede totiž k pozorované asymetrii mezi množstvím hmoty a antimoty ve vesmíru (k výrazné převaze hmoty nad antimotou), jež je koneckonců nezbytná pro existenci okolního světa včetně nás samých. Lze tedy také říci, že celkový počet typů kvarků má takto neprímo podstatný vliv na globální charakter našeho vesmíru, ačkoli okolní svět je fakticky vystavěn pouze z nukleonů (tj. kvarků  $u$  a  $d$ ) a elektronů.

## JMENNÝ REJSTŘÍK

---

V rejstříku jsou tučně zvýrazněny stránky, na nichž naleznete fotografiu fyzika.

### A

ADAMS J. 40  
ADLER S. 42  
ANDERSON C. 7–9  
APPELQUIST T. 38

### B

BECKER H. 6  
BECQUEREL H. 6  
BELL J. 42  
BJORKEN J. 51, 52  
BOHR N. 4, 5, 25  
BORN M. 5  
BOSE S. 5  
BOTHE W. 6  
BREIT G. 13  
BUTLER C. 11

### C

CABIBBO N. 28, 30, 37, 43  
COMPTON A. 7, 9, 26  
COWAN C. 19  
CRONIN J. 31  
CURIE I. 6  
CURIE M. 6  
CURIE P. 6

### D

DIRAC P. 5, 7, 25, 51  
DYSON F. 25

### E

EINSTEIN A. 5, 7

### F

FERMI E. 5, 6, 13, 26  
FEYNMAN R. 22, 29, 30  
FITCH V. 31, 50  
FRIEDMAN J. 52  
FRITZSCH H. 50

### G

GELL-MANN M. 11, 12–19, 28–31, 33, 35–37,  
43, 49, 50, 54  
GLASER D. 12, 13  
GLASHOW S. 33, 34, 35, 37, 40  
GREENBERG O. 49  
GROSS D. 49, 50

### H

HAN M. Y. 49  
HEISENBERG W. 5, 10  
HIGGS P. 34, 35, 46–48, 54, 55  
HOFSTADTER R. 50, 51  
'T HOOFT G. 35, 36, 39, 45

### Ch

CHADWICK J. 5, 6  
CHAMBERLAIN O. 21  
CHEW G. 14

### I

ILIOPOULOS J. 37

### J

JACKIW R. 42  
JOLIOT F. 6  
JORDAN P. 5

### K

KEMMER N. 10  
KENDALL H. 52  
KLEIN O. 26  
KOBAYASHI M. 43, 54

### L

LEDERMAN L. 20, 41  
LEE T. D. 29  
LEPRINCE-RINGUET L. 11  
LEUTWYLER H. 49  
LEWIS G. 7  
L'HÉRITIER M. 11

### M

MAIANI L. 37  
MARSHAK R. 29  
MASKAWA T. 43, 54  
VAN DER MEER S. 40, 41  
MILLS R. 32, 33, 35, 46, 49

### N

NAMBU Y. 49  
NEDDERMAYER S. 8, 9  
NE'EMAN Y. 15–17, 54  
NISHIJIMA K. 12, 14, 16

### O

OKUBO S. 15

OPPENHEIMER R. 24

**P**

PAIS A. 12

PANOFSKY W. 51

PAULI W. 6, 9, 19, 31, 49

PERKINS D. 9

PERL M. 41

PLANCK M. 5, 9, 13

POLITZER D. 38, 49, 50

PONTECORVO B. 20

POWELL C. 9

PRESCOTT C. 39

**R**

RABI I. 8, 9, 25, 55

REINES F. 19

RICHTER B. 38–40

ROCHESTER G. 11

RUBBIA C. 40, 41

RUTHERFORD E. 4, 5, 51

**S**

SALAM A. 35, 40

SAMIOS N. 17

SEGRÈ E. 21

SCHOPPER H. 40

SCHRÖDINGER E. 4, 7

SCHWARTZ M. 20

SCHWINGER J. 24, 25, 33

STEINBERGER J. 20

SUDARSHAN E. 29

**T**

TAYLOR R. 52

THATCHER M. 40

THOMSON J. J. 4

TING S. 38, 39

TOMONAGA S. 24, 25

**V**

VAN HOVE L. 40

VELTMAN M. 35–37, 39, 45

**W**

WEINBERG S. 34, 35, 37, 39, 40, 54

WIGNER E. 10, 13

WILCZEK F. 49, 50

WILSON C. 8

**Y**

YANG C. N. 29, 32, 33, 35, 46, 49

YUKAWA H. 9, 10, 26, 48

**Z**

ZWEIG G. 18, 49

---

## VĚCNÝ REJSTŘÍK

---

**A**

ABJ anomálie 42

anomální magnetický moment 25

antičástice 7, 10–12, 21, 26, 31

antiproton 7, 21, 40, 45, 48

asymptotická volnost 49, 50, 52, 53

atom 4–9, 39, 45

atomové jádro 4–6, 8, 10, 11, 13, 26, 33, 41,  
51, 53

**B**

barva 42, 49, 50, 53

baryon  $\Omega^-$  16–18, 49

baryonové číslo 12, 17

baryony 10–19, 21, 27, 28, 39, 42, 48, 49

beta-rozpad 6, 8, 9, 19, 26–30

Bjorkenovo škálování 51, 52

$b$ -kvark 41–43, 48

Bohrův magneton 25

Bohrův poloměr 4

boson Higgsův viz *Higgsův boson*

boson intermediální vektorový viz *intermediální vektorový boson*

bosony 5, 10, 21, 26, 32–35, 41, 43, 44, 46, 55  
bosony vektorové W a Z viz *vektorové bosony*

$W$  a  $Z$

bottomonium, mezon  $\Upsilon$  41–43, 52

bublinová komora 12–14, 36

**C**

Cabibbův úhel 28, 43

CERN 16, 17, 2, 36, 37, 40, 44, 48, 53, 55

$c$ -kvark viz *původní kvark, c-kvark*

collider 40, 44, 48, 53, 55

Comptonova vlnová délka 9, 26

*CPT*-teorém 31

**Č**

částice elementární viz *elementární částice*  
číslo baryonové viz *baryonové číslo*

**D**

dekuplet baryonů 16–18

délka vlnová Comptonova viz *Comptonova vlnová délka*

DESY 53

diagramy Feynmanovy viz *Feynmanovy diagramy*

DIS viz *hluboký nepružný rozptyl*, *DIS*  
divergence ultrafialové viz *ultrafialové divergence*

doba života střední viz *střední doba života*

## E

efektivní náboj 24, 53

eightfold way 14, 16, 18, 19

elektrodynamika kvantová viz *kvantová elektrodynamika*, *QED*

elektron 4–10, 19, 20, 22–26, 28–30, 33, 34,  
36, 38–41, 44, 46, 50–53, 55

elektronvolt 5

elektroslabá interakce 30–37, 39, 41–46, 48,  
54, 55

elementární částice 4, 6–8, 13, 19, 21, 26, 45,  
48, 54, 55

elementární náboj 4, 5, 12, 18, 22

energie klidová viz *klidová energie*

## F

Fermiho konstanta 27, 28, 31, 34, 54

Fermiho teorie slabých interakcí 19, 26–29, 31  
fermiony 5, 10, 21, 26, 28, 33, 34, 37, 41, 42,  
48, 49, 55

Feynmanovy diagramy 21–25, 27, 28, 33–36,  
42, 45, 46, 50, 53, 55

flavour viz *vůně kvarků*, *flavour*

FNAL 37, 41, 45, 48, 53

formfaktory 51

formule Gell-Mann–Nishijimova viz *Gell-Mann–Nishijimova formule*

foton 7–12, 17, 19, 21–24, 27, 28, 31–33, 41,  
49–51

foton virtuální viz *–virtuální foton*

funkce strukturní viz *strukturní funkce*

## G

Gell-Mann–Nishijimova formule 12, 14, 16

Gell-Mann–Okubova relace 15

GIM model viz *model GIM*

gluony 49, 50, 53, 54

GWS standardní model 35–44, 46, 48, 54

## H

hadrony 10–19, 28, 32, 37–39, 41, 43, 48, 50  
až 53

helicita 30

HERA 53

Higgsův boson 35, 46–48, 54, 55

hluboký nepružný rozptyl, *DIS* 51, 52

hyperony 11, 12, 14, 16, 18

## Ch

charmonium, mezon *J/ψ* 38–41, 43, 52

chromodynamika kvantová viz *kvantová chromodynamika*, *QCD*

## I

interakce elektroslabá viz *elektroslabá interakce*

interakce silná viz *silná interakce*

interakce slabá viz *slabá interakce*

interakce, 4 typy 7–14, 16, 20–27, 29, 31–35,  
37, 41, 46, 50, 54

intermediální vektorový boson 26–35, 37, 40,  
41, 44, 54, 55

izospin 10–18, 32, 54

## J

*J/ψ* viz *charmonium*, *mezon J/ψ*

jaderní magneton 51

jádro atomové viz *atomové jádro*

## K

kalibrační symetrie 32, 33, 37, 43, 46, 54

kaon, K-meson 11, 12, 14, 17, 18, 20, 29, 31,  
43

klidová energie 5, 6, 9–12, 14, 15, 17, 46

K-meson viz *kaon*, *K-meson*

Kobayashi–Maskawova matici 43, 54

komora bublinová viz *bublinová komora*

komora mlžná Wilsonova viz *Wilsonova mlžná komora*

konstanta Fermiho viz *Fermiho konstanta*

konstanta jemné struktury 22, 26, 27, 34, 54

konstanta Planckova viz *Planckova konstanta*

korekce radiační viz *radiační korekce*

korekce Schwingerova viz *Schwingerova korekce*

kvantová elektrodynamika, QED 21–25, 31,  
32, 34, 44, 53

kvantová chromodynamika, QCD 32, 48–50,  
52–54

kvantová mechanika 4, 6, 39

kvantová teorie pole 7, 22–25, 31, 35–37, 42

kvark *b* viz *b-kvark*

kvark *c* viz *půvabný kvark*, *b-kvark*

kvark půvabný viz *půvabný kvark*, *c-kvark*

kvark *t* viz *t-kvark*, *top*

kvark–gluonové plazma 53

kvarkový model 14, 18, 19, 21, 28, 30, 37–39,  
41–43, 48–54

kvary  $u, d, s$  18, 19, 21, 28, 32, 35, 37, 39, 42,  
43

## L

LEP 44, 46–48  
lepton  $\tau$  41, 42, 48  
leptonový náboj 20, 41  
leptony 10, 18–21, 28, 30, 34–42, 50, 52, 54,  
55  
LHC 48, 55  
lokální vnitřní symetrie 32–35, 37, 54  
luminosita 13, 44, 48

## M

magnetický moment elektronu 7, 25  
magneton Bohrův viz Bohrův magneton  
magneton jaderný viz jaderný magneton  
matice Kobayashi–Maskawova viz Kobayashi–  
Maskawova matice  
mechanika kvantová viz kvantová mechanika  
mezon  $J/\psi$  viz charmonium, mezon  $J/\psi$   
mezon  $\pi$  viz pion,  $\pi$ -mezón  
mezon  $\Upsilon$ , bottomonium viz bottomonium, mezo-  
zon  $\Upsilon$   
mezon K viz kaon, K-mezón  
mezony 9–16, 18, 19, 21, 27–31, 35, 38, 39,  
42, 43, 48, 50  
mion 8–11, 19, 20, 22–25, 27–30, 34, 36, 37,  
41, 55  
mionové neutrino 20, 21, 36, 37, 39, 41, 52  
model  $V - A$  30, 31, 33  
model GIM 37, 43  
model kvarkový viz kvarkový model  
model partonový viz partonový model  
model standardní GWS viz GWS standardní  
model  
moment magnetický anomální viz anomální  
magnetický moment  
moment magnetický elektronu viz magnetický  
moment elektronu

## N

náboj efektivní viz efektivní náboj  
náboj elementární viz elementární náboj  
náboj leptonový viz leptonový náboj  
narušení  $CP$ -symetrie 31, 43, 55  
narušení parity 29–31, 39, 40  
neabelovské kalibrační (Yang–Millsovo) pole  
32, 33, 35, 46, 49  
neutralní proudy 28, 33, 34, 36–40, 42  
neutrino 6–11, 19–21, 26–30, 34, 36, 39–41,  
52, 54, 55  
neutrino mionové viz mionové neutrino  
neutron 5–8, 10, 15, 18, 19, 26–28, 30, 51

## O

oktet baryonů 15, 16, 18  
oktet mezonů 15, 16, 18

## P

partonový model 52, 53  
pion,  $\pi$ -mezón 8–15, 17, 19, 20, 27–31, 48, 49  
Planckova konstanta 5, 9, 13  
plazma kvark–gluonové viz kvark–gluonové  
plazma  
podivnost 11–18, 28, 37, 38  
pole neabelovské kalibrační viz neabelovské  
kalibrační (Yang–Millsovo) pole  
pole Yang–Millsovo viz neabelovské kalibrač-  
ní (Yang–Millsovo) pole  
poloměr Bohrův viz Bohrův poloměr  
poruchový rozvoj 22–25, 31, 35, 36, 42, 46,  
50, 53, 55  
pozitron 7, 8, 19, 21–23, 38, 40–42, 44, 46  
propagátor 23  
proton 4–10, 12–15, 17–20, 26, 27, 30, 38, 40,  
41  
proud slabý nabitý viz slabý nabitý proud  
proudý neutrální viz neutrální proudy  
průřez účinný viz účinný průřez  
přirozená soustava jednotek 26  
půvabný kvark, c-kvark 37–40

## Q

QCD viz kvantová chromodynamika, QCD  
QED viz kvantová elektrodynamika, QED

## R

radiační korekce 24, 25, 37, 44–46  
radioaktivita 6, 8, 26  
relace Gell-Mann–Okubova viz Gell-Mann–  
Okubova relace  
renormalizace 24, 25, 33, 37, 53  
rezonance 13–18, 38, 41  
RHIC 53  
rozpad beta viz beta-rozpad  
rozptyl hluboký nepružný viz hluboký nepruž-  
ný rozptyl, DIS  
rozvoj poruchový viz poruchový rozvoj

## S

Schwingerova korekce 25  
silná interakce 7, 9–12, 14, 15, 19, 21, 25, 32,  
33, 35, 37, 48–50, 52–55  
sjednocená elektroslabé viz elektroslabá inter-  
akce  
slabá interakce 8, 11, 12, 14, 17, 19–21, 25–35,  
37, 39, 42, 43, 46, 52  
slabý nabitý proud 28–30, 33, 36, 37, 43, 46

SLAC 38, 39, 41, 51, 52  
S-matice 22, 24  
soustava jednotek přirozená *viz přirozená soustava jednotek*  
spin 5, 6, 8–10, 13, 14, 16–18, 21, 25, 28–30,  
32, 34, 35, 49, 51  
standardní model GWS *viz GWS standardní model*  
strukturní funkce 51  
střední doba života 8, 10, 11, 13–15, 17, 28,  
41, 45  
 $SU(3)$  *viz symetrie  $SU(3)$*   
supersymetrie, SUSY 55  
SUSY *viz supersymetrie, SUSY*  
symetrie  $SU(3)$  15, 16, 18, 19, 49, 54  
symetrie kalibrační *viz kalibrační symetrie*  
symetrie lokální vnitřní *viz lokální vnitřní symetrie*  
symetrie vnitřní *viz vnitřní symetrie*

## Š

škálování Bjorkenovo *viz Bjorkenovo škálování*

## T

teorém  $CPT$  *viz CPT-teorém*  
teorie pole kvantová *viz kvantová teorie pole*  
teorie slabých interakcí *viz Fermiho teorie slabých interakcí*  
Tevatron 45, 48, 53  
top-kvark *viz t-kvark, top*

## PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji dr. Tomáši Sýkorovi za vydatnou technickou pomoc a některé připomínky k textu. Dr. Jiřímu Dolejšímu jsem zavázán za neocenitelnou technickou pomoc při přípravě konečné podoby článku a za řadu věcných připomínek. Za cenné připomínky k textu děkuji rovněž prof. Jiřímu Formánkovi, prof. Jiřímu Chýlovi, dr. Luboši Motlovi a prof. Jánu Pišútovi. Děkuji rovněž dr. Aleši Trojánkovi a doc. Aleši Lacinovi, jejichž zájem mě povzbudil k napsání tohoto článku.

Obrázky 9, 10, 11 a 13 bylo možno otisknout díky laskavému svolení archivu CERN.

Práce vznikla za podpory Centra částicové fyziky, projekt MŠMT LN00A006.

## LITERATURA:

- [1] Cahn R., Goldhaber G.: *The experimental foundations of particle physics*. Cambridge University Press, Cambridge 1995.
- [2] Frazer G.: *The quark machines: How Europe fought the particle physics war*. Institute of Physics Publishing, Bristol 1997.
- [3] <<http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/>> *Ústav částicové a Jaderné fyziky* (česky, anglicky).
- [4] <<http://www-hep.fzu.cz/Centrum/>> *Centrum částicové fyziky* (česky).

Na adresách [3] a [4] čtenář nalezne další užitečné odkazy s bohatou informací o fyzice elementárních čistic.

*t*-kvark, top 42, 43, 45, 46, 55

## U

účinný průřez 13, 19, 20, 22, 26, 27, 36, 46  
úhel Cabibbův *viz Cabibbův úhel*  
úhel Weinbergův *viz Weinbergův úhel*  
ultrafialové divergence 24, 31, 33, 34  
uvěznění barevného náboje 18, 39, 50, 53

## V

vektorové bosony W a Z 29, 32–35, 37, 39, 40,  
43, 44, 46  
virtuální foton 23, 24, 50, 51  
vlnová délka Comptonova *viz Comptonova vlnová délka*  
vnitřní symetrie 10, 15  
volnost asymptotická *viz asymptotická volnost*  
vůně kvarků, flavour 42, 49, 53, 55

## W

W *viz vektorové bosony W a Z*  
Weinbergův úhel 34, 37, 39, 54  
Wilsonova mlžná komora 8

## Y

Yang–Millsovo pole *viz neabelovské kalibrační (Yang–Millsovo) pole*

## Z

Z *viz vektorové bosony W a Z*

## Cesta k přírodovědné gramotnosti\*

Arnold B. Arons, Department of Physics, University of Washington, USA

### ÚVOD

Žalostná úroveň chápání vědy laickou veřejností je starým problémem. Už v devatenáctém století na ni upozorňovaly časopisecké články a prohlášení různých vědeckých sdružení. Dvacáté století přineslo rostoucí úsilí o zlepšení tohoto neutěšeného stavu. Zvláště vědci vracející se po druhé světové válce k akademické práci z armády nebo vojenského výzkumu se velice snažili vštípit studentům lepší představu o povaze, možnostech a omezeních vědeckého myšlení. Usilovali zejména o to, aby jejich svěřenci lépe porozuměli vzájemným vazbám mezi vědou a společností. Vliv vědy a techniky na morální, etické, politické i společenské problémy se však od té doby dále stupňoval a tím rostly také nároky na všeobecné vzdělávání.

Schůze vědeckých společností i stránky pedagogických časopisů byly po léta věnovány popisům nových kurzů, zaměřených na zvýšení přírodovědné gramotnosti absolventů nepřírodovědných oborů. Součástí téměř každé přednesené či publikované zprávy bylo i „vyhodnocení“ odpovědí studentů na tendenční dotazníky – odpovědí, které nezvratně dokazovaly, že se jim kurz velice líbil, že si cení získaných vědomostí a váží si práce učitelů. Až na několik výjimek však tyto kurzy neměly dlouhého trvání. Byly rychle vystřídány „modernějšími“ – avšak v podstatě stejnými a stejně mizejícimi – verzemi, jež byly rovněž provázeny nadšenými dobrozdáními studentů.<sup>1</sup>

Tyto pedagogické pokusy měly na přírodovědnou gramotnost zpravidla velmi malý vliv. Jejich absolventi, kteří tak příznivě odpovídali na dotazníky, mají o vědě jen malé nebo vůbec žádné ponětí a vzájemné působení mezi ní a společností nechápu. Většina z nich si sice vzpomíná, že se jim vyučování moc líbilo, ale nemohou se upamatovat na nic z toho, co se během něj měli naučit. (Poněvadž je to výsledek téměř univerzální, můžeme s trpkostí konstatovat, že jsme zřejmě svoje úsilí vyplýtvali na vymýšlení sice stále zábavnějších, ale také stále méně účinných kurzů.) O malém úspěchu dosavadních snah svědčí i nesláboucí volání po tom, aby se přírodověda stala podstatnější složkou všeobecného vzdělání.

Za hlavní příčinu tohoto neúspěchu považuju domněnku, že osvojení vědy lze dosáhnout čistě verbálním vštěpováním. Žkušenost ukazuje stále jasněji, že verbální podání – přednášení velkým skupinám duševně pasivních posluchačů či pouhá četba tištěných materiálů – nezanechává ve studentově mysli nic skutečně trvalého nebo významného. Takový způsob výuky mu velmi málo pomáhá získat schopnosti, které, podle mého názoru, charakterizují vědecky gramotnou osobu.

\* Pro Československý časopis pro fyziku přeložil Aleš Lacina. Přeloženo z časopisu *Deadalus*, Spring, 1983: Scientific Literacy, s laskavým souhlasem autora i vydavatele.

© The American Academy of Arts and Sciences, 1983.

Československý časopis pro fyziku A 35 (1985), s. 58; Československý časopis pro fyziku A 35 (1985), s. 151.

V mírně upraveném tvaru vyšel tento text jako dvanáctá kapitola první části mimořádně pozoruhodné knihy Arons A. B: *Teaching Introductory Physics* (J. Wiley & Sons, New York 1997). Nejpodstatnější odlišností tohoto nedávného knižního vydání článku od jeho verze prezentované na předcházejících stránkách je doplnění citací novějších literárních pramenů, které se věnují též problematice.

<sup>1</sup> Chtěl bych zdůraznit, že nezpochybňuji názory studentů paušálně. Nepřikládám jim však velkou váhu, jsou-li citovány fakultou, která není schopna vybavit své absolventy dostatečnými vědomostmi.

Poněvadž právě tyto atributy jsou předmětem všech dalších tvrzení a doporučení, bude snad vhodné začít jejich výčtem. Člověk vědecky gramotný by měl:

1. Pochopit, že vědecké pojmy (např. rychlosť, zrychlení, síla, energie, elektrický náboj, gravitační a setrvačná hmota) nejsou náhodně objevenými předměty jako zkameněliny, nové rostliny nebo zvláštní nerosty, ale byly vytvořeny činností lidského rozumu a obrazotvornosti.
2. Uvědomit si, že pochopení a správné užívání takových pojmu vyžaduje pečlivou operacionální definici vycházející z praktické zkušenosti a z předchozího zjednodušeného vymezení pojmu; jinými slovy, chápat, že vědecký pojem obsahuje především myšlenku a pak teprve název a že porozumění nespočívá v odborných termínech samotných.
3. Chápat rozdíl mezi pozorováním a myšlenkovou dedukcí a rozlišovat tyto dvě metody vědecké činnosti.
4. Odlišovat roli náhodných objevů ve vědeckém výzkumu od cílevědomé strategie vytváření a testování hypotéz.
5. Chápat význam slova „teorie“ ve vědecké terminologii. Mít určitou představu (získanou na konkrétních příkladech) o tom, jak se teorie vytvářejí, testují, potvrzují a dočasně přijímají. Na jejím základě pochopit, že toto označení nepřísluší každému osobnímu mínění nebo nepodloženému názoru a s tímto vědomím pohlížet například na tvrzení kreacionistů, kteří označují vývoj za „pouhou teorií“.
6. Poznat, kdy se vychází z hotových neověřovaných výsledků, modelů či závěrů a také umět vyvodit jejich základ a původ; tj. rozeznat, kdy se kladou a s porozumením odpovídají otázky typu „Jak víme ...?“, „Proč věříme ...?“, „Co svědčí pro ...?“ a kdy se bere něco jako fakt.
7. Pochopit (opět na konkrétních příkladech), že vědecké pojmy a teorie nejsou nemenné. Uvědomovat si, jak se postupnými aproxiacemi trvale mění, zdokonalují a zpřesňují.
8. Vědět o mezích vědeckého bádání; znát typy otázek, které nemá smysl ani klást, ani na ně hledat odpověď.
9. Mít v určité oblasti (nebo oblastech) zájmu dostatečné základní znalosti, jež by umožňovaly další studium bez metodického vedení.
10. Znát alespoň několik konkrétních příkladů ukazujících, jak vědecké znalosti bezprostředně ovlivnily intelektuální vývoj lidstva, jak přímo formovaly názor člověka na svět a na jeho postavení v něm.
11. Znát alespoň několik konkrétních příkladů vazeb mezi vědou a společností v morální, etické a sociologické rovině.
12. Uvědomovat si velmi těsnou analogii mezi některými myšlenkovými postupy v přírodovědě a v jiných disciplínách – historii, ekonomice, sociologii, politických vědách (například vytváření pojmu, testování hypotéz, rozlišování mezi pozorováním a myšlenkovou dedukcí, konstrukce modelů a provádění hypotetico-deduktivních úvah).

Tento výčet si nedělá nárok na úplnost a není míněn jako soubor nařízení. Shrnuje pouze některé vlastnosti, které považuji za atributy vědecké gramotnosti. Jsem přesvědčen, že si je může osvojit většina vysokoškoláků, bude-li mít dostatek času, příležitostí a, samozřejmě, také chuti vynaložit určité duševní úsilí. Čtenář ovšem asi má na tyto otázky svůj vlastní názor. Podle něj může předcházející požadavky modifikovat.

vat a provedené změny pak sám prověřit v rámci následující diskuse, věnované snahám škol všech stupňů o zvýšení vědecké vzdělanosti.

Ke skutečnému pochopení vědeckých pojmu a teorií může vysokoškolák, stejně jako žák základní školy<sup>2</sup> dospět jedině usilovnou deduktivní a induktivní duševní činností podloženou interpretací vlastního pozorování a zkušeností. Studenti vyučovaní jen pasivním poslechem projevují takovou aktivitu jen velice zřídka. Experimentální motivaci a přiměřeným tempem výuky ji však lze pěstovat, podporovat a rozvíjet u naprosté většiny [3–6]. Odborníci v teorii poznání rozlišují dvě základní kategorie znalosti: vědomosti figurativní nebo deklarativní a vědomosti operační nebo procedurální [7]. Deklarativní vědění spočívá ve znalosti „faktů“ – například, že Země obíhá kolem Slunce a že hmota se skládá z diskrétních atomů a molekul, že živočichové vdechují kyslík a vylučují kysličník uhličitý. Operační vědění zahrnuje jednak pochopení přičin podmiňujících takové deklarativní poznatky (Jak víme, že Země obíhá kolem Slunce a proč tento názor přijímáme, když se zdá, že je tomu právě naopak?, Co dokazuje, že struktura hmoty není spojitá, ale diskrétní?, Co rozumíme „kyslíkem“ a „kysličníkem uhličitým“?, Jak poznáme, že jsou to různé látky?), jednak pochopení závažnosti deklarativního vědění v nových či neobvyklých situacích a schopnost je na ně aplikovat nebo modifikovat.

Stále zřetelněji se ukazuje, že naše střední a vysoké školy v žádném z vyučovaných předmětů operační vědění příliš nerozvíjejí. Nejde tedy jen o bolest přírodovědy, i když právě v ní je neúspěšně nejlépe patrný [3, 8]. Uvedu několik konkrétních příkladů z vlastní zkušenosti. Prakticky každý člověk vám řekne, že Země a ostatní planety naší sluneční soustavy obíhají kolem Slunce. Mnohým se to nezdá být nijak paradoxní, protože na rozdíl od starověkých národů má nyní málo lidí příležitost systematicky pozorovat oblohu a tak si přímo uvědomit pohyby nebeských těles. Otázka, proč začítávají heliocentrický názor, v nich však většinou vyvolá zděšení nebo rozpaky; někteří nanejvýš mumlají cosi namemorovaného a nesrozumitelného o paralaxe hvězd. Tito lidé nemají nic než deklarativní znalost; přijali pouze to, co Whitehead nazval „definitivním závěrem daným Autoritou“ a nemají tušení o velkolepé syntéze, kterou provedla moderní věda. Věci zřejmě rozumějí ještě méně než středověcí vzdělanci, kteří by sice hájili geocentrickou představu, ale asi by o ní hovořili spíše jako o modelu „vyhovujícím pozorování“ než jako o konečné Pravdě. Takové novodobé reakce jsou charakteristické i pro mnoho jiných oblastí a rozhodně nejsou tím, co si představujeme pod „porozuměním vědě“.

Druhý příklad shrnuje zkušenosti získané jednak v letních školách pořádaných pro učitele z praxe, jednak na fakultách, kde se studenti na učitelskou dráhu teprve připravují. (Ukazuje se, že pokud jde o úroveň pochopení vědecké tematiky, není mezi těmito dvěma skupinami žádný rozdíl.) Každý z nich slyšel během studia nebo za jiných okolností něco o „elektrických obvodech“. Všichni viděli na tabulích nebo v knihách nákresy různých zapojení a slyšeli řadu tvrzení o vedení elektrického proudu.

Dáme-li však oběma skupinám baterii, žárovku a kus drátu a požádáme je, aby žárovku rozsvítily, téměř všichni bez výjimky začnou drátem spojovat patice žárovky s jedním pólem baterie nebo jím propojují oba póly a spodní kontakt žárovky přiloží k jednomu z nich. Neuvědomují si, že jak baterie, tak žárovka má dva konce. Jen nemnozí si všimnou, že se drát spojující oba vývody baterie zahřívá, a téměř nikdo nevyvzorce z tohoto zjištění nějaké závěry. Trvá dvacet až třicet minut, než objeví – zkouškami a omyly – uspořádání, v němž žárovka svítí. Úplně stejně, a o nic pořáleji, postupují v této situaci sedmileté děti. Bez praktické zkušenosti nerozumějí vysoko-

<sup>2</sup> Viz např. popisy záměrů a cílů i samotné učební texty výukových programů [1] a [2].

školáci – bez ohledu na slova, která „umějí“, a tvrzení a popisy, které slyšeli – „elektrickým obvodům“ ani o trochu lépe než sedmileté děti, které se s nimi setkávají *poprvé*. Čistě verbální výuka v nich nezanechala ani stopu skutečných znalostí nebo pochopení. Takový je výsledek většiny našich současných výukových metod.

Vysokoškolské kurzy, které si kladou za cíl rozvíjet přírodovědnou gramotnost studentů nepřírodovědných oborů, lze rozdělit do dvou základních skupin. První je tvořena kurzy, které se snaží během jednoho školního období, školního roku nebo dokoncě semestru seznámit posluchače s hlavními úspěchy přírodních věd (ve fyzice například se vším od Galilea a Newtona až po zákony termodynamiky, teorii relativity a kvantovou mechaniku). Do druhé patří kurzy, které se soustředí na určitou užší aktuální oblast, například problematiku energetické krize, devastace životního prostředí, použití vědy pro vojenské účely, etické a morální otázky spojené s novodobým pokrokem molekulární biologie, filozofické otázky kladené teorií relativity a kvantovou mechanikou atd.

Kurzů první kategorie už bylo realizováno bezpočet. Přes veškerou snahu autorů a navzdory vysoce kladným studentským hodnocením však mají velmi krátký život. Jejich skutečný účinek na posluchače je totiž tak malý, že jsou neustále nahrazovány novými – v podstatě však stejnými – kurzy, sepisovanými ve víře, že zaplní vzniklé vakuum. Mladí vědci, kteří si zřejmě myslí, že toto vakuu existuje jen proto, že tento přístup ještě nikdy nikdo nezkoušel, vidí řešení ve způsobu výkladu látky. Jsou přesvědčeni, že *jejich* podání – originální, nadšené a dokonale jasné – povede k úspěchu. Ve skutečnosti je zde však vakuu proto, že je pochybený už samotný přístup. Jeho zastánci jej ale donekonečna obhajují tvrzením, že studentům dává „představu“ o obsahu vědy a podstatě moderního vědeckého myšlení.

Takové snahy – jak se znova a znova ukazuje – vždy ztroskotají: za prvé proto, že studenty trvale vystavují nesrozumitelnému přívalu odborné hantýrky, která není podložena žádnou jím dostupnou zkušeností; za druhé proto, že přílišný rozsah látky a příliš rychlé tempo jejího probírání nedovolí studentům myšlenky, pojmy či teorie vůbec pochopit. Rychlosť výkladu ztěžuje nebo vůbec znemožňuje vytvoření jakékoli představy o tom, jak pojmy a teorie vznikají, jak jsou ověřovány a akceptovány, jak souvisí se skutečností a jak odhalují souvislosti mezi zdánlivě nezávislými jevy. Množství látky i tempo výkladu vylučuje získání jakékoli rozumné představy o možnostech a mezech vědeckého poznání, o vlivu vědy na naše intelektuální dědictví a na názor na postavení člověka ve světě. Kurzy tohoto typu nevyřešily a nevyřeší náš vzdělávací problém, ač jsou učebnice sebekrásněji ilustrovány a sebehojněji kořeněny zmínkami o devastaci, etice, energetické krizi, stelární nukleosyntéze, černých dírách nebo Kafkovi.

Kurzy druhé kategorie trpí podobnými nedostaty, i když je jejich rozsah zdánlivě menší. Mám zato, že intelektuální pociťost by vyžadovala, aby posluchači skutečně chápali vědecké pojmy a teorie, které jsou základem diskutovaných aktuálních otázek, a aby nebyli vychováváni k planému mluvení o věcech, jejichž podstatě nerozumějí. Pokud již potřebné základy mají, je samozřejmě možné se s nimi do técto diskusí přímo pustit. Avšak se studenty, kteří je postrádají – kteří netuší, co znamená slovo „energie“ a nevídí nic o mnohosti interakcí vedoucí k omezením vyjádřeným zákony termodynamiky, se studenty, jejichž víra v diskrétní strukturu hmoty není ničím podložena (znají pouze řadu názvů jako „atom“, „molekula“, „ jádro“, „elektron“, které jim byly předloženy bez jakékoli informace o empirickém materiálu a úvahách, jež k vytvoření técto pojmu vedly), se studenty, kteří nemají ponětí o tom, co je to elektrický náboj a nevědí, z čeho pramení naše přesvědčení, že Země obíhá kolem Slunce,

se studenty, jejichž teleologický styl řeči a neznalost zákona setrvačnosti svědčí o tom, že jsou v podstatě ještě aristotelovci – s takovými studenty je sice snad na první pohled efektní, ale rozhodně nečestné zahajovat diskusi, aniž bychom jim napřed pomohli vytvořit a důkladně pochopit nezbytné základní pojmy. Pokud si však jednou uvědomí, v čem spočívá intelektuální pootkovost, čemu musí porozumět, aby mohli hovořit rozumně a smysluplně o původních problémech, jen málokterí se o to nebudu snažit.

Takový návrat k potřebnému pochopení ovšem drasticky omezí množství látky, které může být probráno. A poněvadž se učitelé a autoři učebnic většinou k této redukci neodhodlájí, jejich žáci nerozumějí vědeckým pojmul ani povaze a omezením vědeckého myšlení o nic lépe než oběti kurzů z první kategorie.

Jak tedy postupovat? Domnívám se, že je nutno přibrzdit. Zpomalit a probrat méně. Dát studentům možnost sledovat a zažít vývoj jen několika nejdůležitějších vědeckých idejí, zato však v takovém rozsahu a takovým tempem, aby jejich znalosti nebyly pouze deklarativní, ale spíše operační. Podle času, který máme k dispozici, bychom s nimi mohli projít jeden nebo několik z následujících námětů:

1. Proč věříme, že Země obíhá kolem Slunce? V jakém smyslu je toto tvrzení „pravdivé“?
2. Proč jsme přesvědčeni, že hmota má diskrétní strukturu; tj. jaké máme důkazy pro atomárně-molekulární teorii?
3. Co rozumíme „elektrickým nábojem“? Jak jsme k tomuto pojmu dospěli? Je „náboj“ materiální substancí? Z čeho vychází naše přesvědčení, že existují pouze dva druhy elektrického náboje? Na základě jaké (hypotetické) zkušenosti bychom mohli tvrdit, že jsme objevili třetí?
4. Na čem se zakládá naše víra, že i atomy mají diskrétní strukturu? Jakými jednoduchými srozumitelnými argumenty ji můžeme podpořit? (Pouhé tvrzení o existenci entity zvané „elektron“ nedokazuje vůbec nic. Přesto je vyučování často vedeno právě tímto stylem.)
5. Jaké zkušenosti vedly k vytvoření pojmu „elektron“? Z čeho plyne, že je taková entita základní složkou hmoty? Co svědčí o tom, že je lehčí než atom?

Naproti tomu si myslím, že je neužitečné a může být dokonce i škodlivé:

1. Vypravovat studentům odbornou hantýrkou o „úchvatném světě“ fyziky vysokých energií (hovořit o interakcích, momentu impulsu, ekvivalenci hmoty a energie, kvantových přechodech a principu neurčitosti), když nemají tušení o tom, co je rychlosť, zrychlění, síla, hmota, energie či elektrický náboj, a vůbec nevěděj, jak lze ověřovat představy o struktuře hmoty v dimenzích přesahujících možnosti našich smyslových orgánů.
2. Vést studenty, kteří jsou ještě vlastně aristotelovci, bez sebemenšího pochopení zákona setrvačnosti k zonglování s frázemi o Coriolisově efektu v meteorologii a oceánografii.
3. Přednášet v astronomii studentům o stelární nukleo syntéze, kvazarech, pulzarech a černých dírách, nemají-li ponětí o tom, jak se definuje lokální poledne, půlnoc či severojižní směr, nevěděj nic o původu ročních období nebo fází Měsíce (považujíce jeho neosvětlenou část za zemský stín) a netuší, že hvězdy mají svůj denní pohyb.
4. Podporovat studenty v četbě a mluvení o DNK, molekulové struktuře genů a nervové a svalové činnosti, když nemají potuchy o tom, proč vůbec věříme

v atomy a molekuly, jak se dozvídáme cokoliv o složení, velikosti a struktuře molekul, co se operačně rozumí „kyslíkem“, „dusíkem“ a „uhlíkem“, co je to „elektrický náboj“, co „potenciální rozdíl“ a odkud vlastně víme, že tyto pojmy nějak souvisí s nervovou činností.

### ILUSTRACE VĚDECKÉHO ZPŮSOBU MYŠLENÍ

---

O mezích a charakteru vědeckého myšlení si sotva někdo může udělat dobrou představu jen na základě hotových tvrzení. Budeme-li však přiměřeným tempem, tj. tempem dovolujícím pochopení pojmu a rozmyšlení otázek typu „Jak víme ...?“, „Proč věříme ...?“, probírat téma navržená v předcházející části, objasní se tyto věci zcela přirozeně. Uvažme následující příklady.

Když ve *Dvou nových vědách* Galileo řeší problém, jak popsat změnu rychlosti pohybujícího se tělesa (dnes hovoříme v této souvislosti o „zrychlenu“), upozorňuje, že existují dvě alternativy:

1. Pozorujeme, že na vzdálenosti tolika a tolika loktů se rychlosť tělesa mění z jiště počáteční hodnoty na určitou hodnotu koncovou. Na základě tohoto zjištění by bylo možné popisovat pohyb objektu pomocí čísel udávajících, nakolik se jeho rychlosť změnila při proběhnutí jednotlivých loktů dráhy.
2. Tutež změnu rychlosťi lze však vztáhnout i k příslušnému časovému intervalu. Sledovaný děj je tedy možné charakterizovat také čísla udávajícími změnu rychlosťi v každé sekundě.

Který způsob popisu máme přijmout? Výběr není triviální.

Galileo volí druhou možnost: změnu rychlosťi za jednotku času. Chce totiž popsat „přirozeně zrychlenu“ pohyb (volný pád) a je intuitivně hluboce přesvědčen, že volný pád je *rovnoměrně* zrychléný právě v tomto smyslu a nikoliv ve smyslu změny rychlosťi připadající na délkovou jednotku dráhy. Na základě hypotézy (induktivní domněnky) vybírá alternativu, jež vede k nejjednoduššímu a nejelegantnějšímu popisu volného pádu, a vzápětí tuto hypotézu testuje vyvozováním důsledků, které lze ověřit experimentem.

Zde se jasně ukazuje několik základních rysů vědecké práce: úloha induktivního a deduktivního usuzování; skutečnost, že vědecké pojmy jsou výsledkem činnosti lidského rozumu a ne materiálními objekty nalezenými a popsanými svými objeviteli jako nové kontinenty či nová zvířata; fakt, že v postupu existuje možnost volby, vytvářející prostor i pro estetická kritéria, jako je elegance a jednoduchost.

Rovněž se zde objevuje nová, revoluční idea vytváření apriorních hypotéz a experimentálního testování jejich matematických důsledků. Pozorování i experimentu užívali, alespoň v některých případech, už Řekové (například uváděli odpór nafouknutého zvěřecího měchýře proti stlačení jako experimentální důkaz materiálnosti vzduchu), avšak modely, které vymýšleli pro vysvětlení přírodních jevů, netestovali.

Neopakuji tento známý příběh proto, že bych se snad chtěl domáhat nějakého nového nebo hlubokého pojednání filozofie a historie vědy. Snázím se jen co nejsrozumitelněji upozornit na důležité ideje, které mohou vysokoškoláci pochopit a ocenit. Přestože leží přímo pod povrchem každého úvodního kurzu fyziky, dostávají studenti jen zřídka možnost, aby je objevili, formulovali a vychutnali. K jejich odhalení jim musíme dát příležitost podstoupit a promyslet, oč vlastně jede, znovu prožít některé z intelektuálních zkušeností, rozebrat a zhodnotit myšlenkový postup a uvědomit si přitom prvky jeho logiky, jeho možnosti i jeho omezení.

Tuto příležitost však studentům poskytuje jen velmi málo kurzů a učebnic. Standardní definice rychlosti a zrychlení jsou vyhlašovány tak, jako by byly skálopevnými útvary, které existují odjakživa. „Historie“ se odbývá zmínkou o Galileovi a několika okázalými, ale nepodloženými a oftelymi fráze se oznamuje, že objevil „experimentální metodu“ a je otcem „moderní přírodovědy“.

Jsem přesvědčen, že si studenti mohou vytvořit zralou, zasvěcenou představu jak o metodách a postupech, tak o úspěších i mezích vědy. Nedospěj k ní však automaticky procičováním výpočtu, jak vysoko vystoupí kámen vymřštený do vzduchu nebo jak dané elektrické pole vychýlí svazek elektronů. Takový intelektuální nadhled se dá vypestovat jenom skloubením znalosti samotného vědeckého problému s pochopením postupu jeho řešení – s pochopením, kterého se dosahuje úvahami typu „Jak víme ...?“, „Proč věříme ...?“.

Příležitosti ozřejmit tyto aspekty kulturního fenoménu, jímž věda je, se objevují téměř na každém kroku. Přejděme k dalším příkladům.

Díky didaktickému stylu, jakým se jim věda servíruje, studenti zpravidla považují vědecké pojmy za ztrnulé, neměnné entity mající pouze jeden absolutní význam. Ten, jak se domnívají, musí každý zasvěcenec automaticky „znát“ a zadýchanému nováčkovi nezbývá než jej přjmout během „jedné otáčky mozků“. Mnohým se pak značně uleví, když shledají, že tomu tak není; když zjistí, že se tyto pojmy s narůstajícím vědeckým poznáním vyvíjejí, až jsou – postupným předefinováváním, zpřesňováním a tříbením – dovedeny od surového počátečního intuitivního tvaru k pozdější rafinovanosti.

Například pojem „síla“ byl původně zaveden v souvislosti se svalovým tahem nebo tlakem. Zákonem setrvačnosti se však předefinovává tak, aby byl použitelný na jakékoliv působení, které uděluje zrychlení materiálnímu objektu (např. působení elektrický nabité tyče na kousky papíru). I neživým předmětům se tím připisuje schopnost působit silou najiná tělesa (nabitá tyč působí silou na kousky papíru, stůl působí silou orientovanou vzhůru na knihu, která na něm leží, Země působí silou orientovanou dolů – těhoucí silou – na nás a silou orientovanou vzhůru na naše chodidla). Newton pak rozšiřuje tento pojem ještě dále tvrzením, že pokud stůl působí vzhůru orientovanou silou na knihu, působí kniha současně silou opačného směru na stůl. Od původního použití slova „síla“ pro živý svalový tah nebo tlak na jiný předmět jsme se dostali hodně daleko.

Z hrubé počáteční představy vycházíme i při definici „rychlosti“. Původně ji zavádíme jako míru toho, jak rychle (v průměru přes konečný časový interval) se objekt pohybuje podél přímky. Potom tuto jednoduchou ideu zdokonalujeme až k pojmu okamžité rychlosť, kterému připisujeme další vlastnosti: směr v prostoru a měřítko změny jak velikosti, tak směru.

Význam původního slova se v jednotlivých krocích podstatně mění. V pozdějších stadiích postupu již tedy zvolené slovo neoznačuje výchozí intuitivní představu, ale nový, rafinovanější pojem. Pochopení tohoto významového posunu výrazně zvyšuje důvěru studentů ve vlastní znalost nového způsobu myšlení. Otevírá jim oči k analogickým postupům a zobecněním nejen v další generaci pojmu (jako jsou „energie“ a „elektrický náboj“), ale je užitečné i pro jiné obory studia: jen zřídka se připomíná, že podobné sémantické změny se objevují i ve společenských nebo humanitních vědách.

V kurzech, které vedu, vyhlásím hned první den, že budeme pracovat podle hesla „nejjdříve myšlenka – název později“, a dám na srozuměnou, že odborné termíny nabývají významu až prostřednictvím popisu empirických poznatků slovy dříve přijaté definice. Pokouší-li se někdo projevovat svoji erudici (nebo se vyhnout otázkám) pou-

žíváním slov nebo odborných výrazů, které ještě nebyly zavedeny, tváříme se – já a moji asistenti – zcela netečně a předstíráme, že nevíme, o čem se mluví. Studentům to rychle dojde. Nechají hry se slovy a většinou si začnou uvědomovat, že jejich význam nerozumějí. Brzy mi sdělují, že narážejí na potíže v psychologii, sociologii, ekonomii či politických vědách, když se učitele ptají na význam odborných termínů, jimiž je velmi nenuceně častuje.

Tato opakující se zpětná vazba ukazuje na jeden aspekt rozumového vývoje, který mnozí studenti poměrně snadno a rychle zvládnou.<sup>3</sup> Pro kurzy, které jim to neumožňují, je takové zjištění samozřejmě špatným vysvědčením.

Ve třicátých a čtyřicátých letech minulého století konal Michael Faraday velmi krásné elegantní výzkumy elektřiny a magnetismu. Studenty lze vést k tomu, aby sami formulovali alespoň některé z hlubokých otázek, jež si tehdy kládli: Existuje nějaký mechanismus, jímž se realizuje silové působení jedné částice na druhou?, Bude-li jedna částice náhle přemístěna, změní se síla působící na druhou ihned nebo až po konečné době?, Uplyne také konečný časový interval mezi okamžikem, v němž je do drátu vpuštěn elektrický proud, a okamžikem, v němž se střídka blízkého kompasu záčne díky magnetickému účinku tohoto proudu natáčet?, Uplyne-li v obou případech konečný časový interval, co se během něj děje v prostoru mezi interagujícími objekty? Ve snaze odpovědět na tyto otázky vymyslel Faraday model, který úplně přesahuje veškerou přímou smyslovou zkušenosť. Zavedl slavné „silozáry“, které se natahovaly a smršťovaly, rozestupovaly a kumulovaly, čímž docházelo k šifrování elektrických a magnetických účinků prázdným prostorem. Tento představy později rozpracoval James Clerk Maxwell do rafinovaného novodobého pojmu „pole“. Sám Faraday psal o tomto vysoce spekulativním modelu téměř omluvně:

„Na bádání tohoto druhu by se v přírodní filozofii nemělo pohlížet jako na nutně škodlivá nebo zbytečná. Měla by být sice vždy považována za poněkud pochybná, zodpovědná za chyby a náhylná ke změnám, avšak v rukou experimentátorů a matematiků jsou podvuhodnými pomůckami. Jsou užitečná nejen tím, že osvětlují nesrozumitelnou ideu, dávajíce jí cosi jako určitou podobu, která může být přizpůsobena experimentu a výpočtu, ale vedou – dedukcemi a korekcemi – dál k odhalení nových jevů a tak podmíňují růst a postup skutečné přírodní pravdy, jež se, na rozdíl od hypotézy, která k ní přivedla, stává věděním nepodléhajícím změně.“ [9]

Tento překrásný popis cíle a funkce heuristického modelu současně ukazuje charakteristický rys myšlení mnoha vědců devatenáctého století. Byli opravdu přesvědčeni, že hromadí „skutečnou přírodní pravdu“ a „vědění nepodléhající změně“.

Když se studenti dozvídí něco o pojmové revoluci spojené se základy teorie relativity nebo když se seznámí s některými neúspěchy newtonovské a maxwellovské fyziky v mikrosvětě, je zajímavé nechat je porovnat toto Faradayovo prohlášení s pozdějším pesimističtějším výrokem J. R. Oppenheimera:

„Ke svým novým problémům přistupujeme plni starých představ a starých slov. Nejen nepostradatelných slov každodenního života, ale i takových, která nám byla užitečná v mnohaleté vědecké zkušenosti ... Máme rádi stará slova, starý jazyk a staré analogie a používáme je ve stále neobvyklejších a neznámějších situacích.“ [10]

---

<sup>3</sup> O jiných aspektech intelektuálního vývoje, například schopnosti abstraktního logického usuzování, se to buhužel říci nedá. Ale to je jiný příběh a, jak říkával Mortimer Snerd, dlouhý a mlhavý. Viz [3, 8].

V tomto stadiu se už studenti sami domýšlejí, proč většina vědců nepovažuje vědecké znalosti za neměnné a definitivní, ale spíše je pokládá za proměnlivé a dočasné. Začínají si uvědomovat omezenou platnost i úspěšných teorií a za každou zodpovězenou otázkou jsou schopni nalézt celou řadu nevyřešených problémů.

Jiným vhodným námětem, v němž se rovněž vyskytují modely přesahující přímou smyslovou zkušenosť, je vývoj představ o atomárně-molekulární struktuře hmoty a stavbě atomů samotných. Studenti jej mohou celý projít a rozebrat jeho jednotlivé kroky. Musíme jim však přitom dovolit, aby – stejně jako někdejší průkopníci – pochybovali a vyslovovali svoje rozpaky nad interpretací některých „evidentních“ závěrů. Není možné pouze jim vnutit několik navzájem nesouvisejících argumentů, jež jsou samy o sobě nepřesvědčivé, a hned nato téma ukončit vyhlášením závěrečných výsledků. Prvotní skeptici nebyli koneckonců ani zdaleka nějakým spolkem hlupáků. Cestu, kterou vývoj v této oblasti prošel, vroubí mnoho ilustrativních klenotů. Dalton například ve svých původních pokusech vybudovat kvantitativní atomárně-molekulární teorii porovnával procentové složení různých sloučenin s jejich hmotnostmi. Jedinou pravidelností, která byla do té doby v těchto údajích pozorována, byl takzvaný zákon stálých poměrů hmotnostních – tj. pevně procentové složení každé určité chemické sloučeniny – a i ten byl předmětem jistých sporů a pochybností. Veden představami o korpuskulární stavbě hmoty, zaměřil Dalton svoji pozornost především na případy, kdy určitá dvojice prvků (třeba kyslík a uhlík) tvoří více různých sloučenin. Přitom ho napadlo, že pokud se jeden gram uhlíku slučuje s 1,3 gramy kyslíku v jednu sloučeninu, pak by na tentýž gram uhlíku mělo v jiné sloučenině připadnout 2,6 nebo 0,65 nebo 3,9 gramů kyslíku, případně jiné množství, které by bylo celistvým násobkem nebo dělitelem 1,3. Právě takové jednoduché číselné poměry by totiž měly vyjít, kdyby se sloučeniny opravdu skládaly z molekul vytvořených z malého počtu atomů reagujících prvků. Chemické údaje se však tímto způsobem nikdy dříve nezkoumaly a tato přísná pravidelnost zůstávala skryta za neprůhledným procentuálním složením. Přísel Dalton a pravidlo bylo na světě; *předpověď* dnes běžně známý „zákon násobných poměrů hmotnostních“. (Pokud se tento zákon uvádí v novodobých kurzech, bývá většinou prezentován jako odnepaměti známý apriorní důkaz atomové teorie.) Je podstatné, že fakta velmi často *nehovorí* sama. V tomto případě byla známa dlouhou dobu, ale nikdo si jich příliš nevšímal, dokud nebyla ohledána očima teorie. Teprve potom byla pochopena a stala se dramatickým potvrzením teoretické koncepce, která je objasnila.

Opáčným příkladem je historie „piltdownského člověka“ – podvrhu, který byl odhalen v padesátých letech našeho století. Mnozí paleontologové akceptovali zkamenělinu s lidskou lebkou a opicí čelistí, poněvadž na základě apriorních teoretických představ očekávali existenci evoluční posloupnosti, v níž by vývoj mozku předcházel změnám v jiných částech těla. Přijali padělek na téměř padesát let, přestože se dobře vědělo, že jej nelze zařadit na žádné místo v evoluční linii hominidů. Ani zde nevypovidala sama fakta; pohlíželo se na ně očima teorie a teorie vedla na scestí.

Pro vskutku všeobecně vzdělávací proces je příznačné objasnění základních charakteristik veškeré intelektuální činnosti. Toho samozřejmě nelze dosáhnout vágním generalizováním nesvázaným s niterným úsilím o zvládnutí tématu. Vybudování přírodovědné gramotnosti je proto nemyslitelné bez ovládnutí alespoň *určitého* rozumného množství látky umožňujícího prováděné generalizace pochopit.

## ILUSTRACE SOUVISLOSTI VĚDY S INTELEKTUÁLNÍ HISTORIÍ LIDSTVA

V dobře vedených úvodních kurzech je mnoho možností, jak dosáhnout toho, aby si studenti uvědomili význam vědy ve vlastním rozumovém vývoji. Při svém zájmu o přírodovědné vyučování na základních školách jsem se například nejednou setkal s následující situací: Na otázku, čím to je, že předmět padá, dostává dítě od učitele (nebo rodiče) odpověď: „Gravitaci“. V dítěti vzniká dojem, že byl dán důvod vysvětlující *příčinu* i *účinek*. Ani dítě, ani učitel si však přitom neuvědomují, že technický termín nevyjadruje ani znalost, ani informaci, ale pouze skrývá nevědomost. Zdrcující většina řadových občanů, ale i studentů a učitelů nemá sebemenší povědomí o historii tohoto pojmu. Neví, že se slovo „gravitace“ původně objevilo jako označení teleologického faktu – „snahy“ či „touhy“ živlů (a jejich směsí) najít střed Země. Málokdo si uvědomuje, že Newton explicitně odmítl hovořit o mechanismu či procesu interakce, když vyslovil svoji velkolepou domněnku, že totéž – ať už to funguje jakkoliv – co nutí jablko padat, váže i Měsíc k Zemi a planety ke Slunci; a konečně, že navzdory kráse a eleganci obecné teorie relativity nemáme dodnes ponětí o tom, jak vůbec gravitace „funguje“.

Velmi málo studentů chápá význam převratných výsledků vědy sedmnáctého století – odvržení názoru, že nebesa a nebeská tělesa jsou vytvořena z jiné látky a podřízena jiným zákonům než objekty pozemské; podrobení všeomíra jednotné soustavě člověkem pochopených zákonů; jeho rozšíření do nekonečna a s tím spojené překonání představy o nebeské klenbě nad našimi hlavami. Na tomto místě došlo v naší intelektuální historii k zásadnímu obratu. Názor každého jedince na sebe sama a jeho místo ve světě je hluboce podmíněn tímto dědictvím po Galileovi, Newtonovi a ostatních přírodních filozofech sedmnáctého století. Vzdělaný člověk by si měl být vědom historického a intelektuálního významu tohoto dědictví a nejen memorovat závěrečné výsledky. Přestože lze tyto věci na vysokoškolské úrovni velmi pěkně vyložit [11, 12], dělá se to dokonce i ve všeobecně vzdělávacích kurzech jen zídkou; ve studijních plánech pro budoucí vědce a inženýry se toto téma neobjevuje vůbec.

Náležité zdůraznění těchto hledisek již v úvodních přírodovědných kurzech by přitom nesmírně obohatilo a posílilo intelektuální obsah jakéhokoliv studia a stimulovalo by žádoucí pronikání idejí bariérami oddělujícími navzájem jednotlivé disciplíny. Studenti například žasou, když zjistí, kolik slohových obratů užívaných otciznáři\*\* v našich historických dokumentech lze zpětně vysledovat přes deisty až u Lockeho a Newtona. [13]

Za příklad souvislosti s literaturou mohou sloužit tyto řádky ze *Senlinovy ranní písni* [14] od Conrada Aikena:

„Země se se mnou tocí a přece se nepohybuje,  
hvězdy tiše blednou v korálovém blankytu.  
Stojím před zrcadlem ve hvízdající prázdnотě,  
je mi to jedno a vážu si kravatu.“

Aiken se současně dovolává zákona setrvačnosti, galileovské relativity i newtonovské kosmologie a všechno koření nádechem ironie a protismyslu. Je to pohled zcela novodobý; nic takového by asi nemohlo být napsáno v šestnáctém století. Velmi působivé je i srovnání těchto veršů s Miltonovou obojetností (pokud jde o ptolemaiovský a koperníkovský systém) ve *Ztraceném ráji*.

\*\* Pozn. překl.: Otcové-zakladatelé (*Founding-fathers*), tzn. státníci z období americké revoluce.

Jiným nesmírně podnětným námětem, jenž se zrodil z potřeb techniky, překlenul a nakonec sjednotil všechny přírodní vědy a silně ovlivnil intelektuální vývoj lidstva, je problematika „principů nerealizovatelnosti“. Tento příběh začíná už za dávných časů postupně narůstajícím poznáním, že příroda vždycky vzdurouje našemu přání „získat něco z ničeho“, naší snaze nahromadit nevyčerpatelné zásoby hmoty, pohybu, změny nebo tepla bez vynaložení odpovídajícího úsilí a nákladů. Na základě tohoto původně kvalitativního zjištění se v osmnáctém století začaly některé důležité pojmy kvantifikovat. Lucretiova „nic nemůže být vytvořeno božskou vůlí z ničeho“ se překrásnými Lavoisierovými experimenty přeměnilo v zákon zachování hmoty. Tehdy se také začaly objevovat první představy o mechanické energii; o jejich souvislosti s teplem se však ještě nevědělo.

Devatenácté století přineslo velkolepou syntézu prvního a druhého zákona termodynamiky zahrnující sjednocení mechanické energie a tepla a zachování energie celkové, stanovení možného a nemožného směru spontánních změn a odhalení tendence systémů k rovnováze, možnost úplné přeměny práce v teplo kontrastující s nemožností úplné transformace tepla v práci a konečně podřízení všech stavových změn – mechanických, chemických, tepelných, elektrických, magnetických – právě těmto dvěma zákonům. Kvantifikované podoby principů nerealizovatelnosti, jež vzešly z techniky průmyslové revoluce, vnesly srozumitelný a působivý rád do zmatku jinak navzájem nesouvisejících změn. Tím hluboce ovlivnily a usměrnily i myšlení ve společenských vědách. Jako příklad jmenujme třeba francouzského filozofa Georgese Sorela [15] nebo historika Henryho Adamse [16].

Devatenácté století ještě pohlíželo na hmotu a energii jako na dvě rozdílné entity, z nichž každá se sama zachovává. Ve dvacátém století přinesla Einsteinem podnícená myšlenková revoluce nový pohled: hmota a energie tvoří jednotu a nikoli dichotomii; jsou vzájemně přeměnitelné podobně jako práce a teplo. Pomocí tohoto poznatku se dalo vysvětlit, jak si může radioaktivní látka sama, zdánlivě po neomezenou dobu, udržet vyšší teplotu, než jakou má její okolí, jak může Slunce trvale zářit během nesmírného trvání geologického času a konečně jak může být uvolněna úžasná energie skrytá v atomovém jádře.

Dále už cesta vede přímo ke všem morálním, etickým a společenským problémům, které přináší jak mírové, tak válečné využití existující techniky. Tento příběh i jeho vliv na lidskou společnost však začal daleko dříve, než Fermi a jeho spolupracovníci spustili v Chicagu první jaderný reaktor. Věřím, že je možné dosáhnout toho, aby si studenti alespoň něco z těchto věcí uvědomili v široké perspektivě intelektuální historie lidstva a neviděli jen konečné vědecké či společenské důsledky.

## VÝBĚR TÉMAT

---

Mám zato, že předcházející ilustrace epistemologických, filozofických a historických aspektů vědy mohou vtisknout obecně humanistické perspektivy jakémukoli studijnímu plánu. Uvědomuji si však, že jejich konkrétní výběr je do značné míry závislý na osobním vkusu, a proto uvedené návrhy nijak neprosazuj proti jiným alternativám. Každý učitel si musí vybrat taková téma, která se mu líbí a která je schopen podat nejpřesvědčivějším a nejvíce stimulujícím způsobem. Může to být například celá řada aspektů, na něž James Conant upozorňoval jako na „taktiku a strategii vědy“. Lze se věnovat úchvatnému, částečně vědeckému, částečně psychologickému problému ověřování a přijímání vědeckých teorií. Nabízejí se i filozofické problémy pozitivismu a otázky týkající se „reálnosti“ entit (atomů, molekul, elektronů), jejichž detekce přesahuje možnosti našeho smyslového vnímání.

Jsou zde samozřejmě také jiné náměty: naléhavé společenské problémy, jež přineslo uvolnění jaderné energie, vojenské využití vědy, možnost syntetizování živé hmoty a zasahování do genetického vývoje lidských bytostí, otázky devastace a tvorby životního prostředí. Nechci snižovat význam těchto životně důležitých problémů. Mám však výhrady k zahajování diskusí a rozborů dříve, než studenti porozumějí věci z odborného hlediska. Jsou-li takové základy poctivě vybudovány, mohou být další diskuse pedagogicky plodné a užitečné. Pokud však k těmto otázkám přistupujeme, jak se to bohužel často dělá, bez potřebného zázemí, může snad celý podnik vypadat efektně (studenti podléhají klamu, že se účastní pravého bádání), ale ve skutečnosti není ničím jiným než žonglováním s bezobsažnými generalizacemi – hrou se slovy zbavenou podstaty a opravdového myšlení. Toto není cesta ke vzdělanosti.

Je zřejmé, že způsobem, který doporučuji, nelze probrat vše, co by člověk chtěl. Tako není možné rozebírat každý důležitý problém a zmínovat se o každé významné perspektivě. Jsou dávno pryč časy, kdy jsme ještě mohli učit své studenty všechno, co by měli znát. Neřeknu jistě nic nového, připomenu-li, že jediným důležitým a realistickým úkolem vyššího školství je postavit studenty na vlastní intelektuální nohy: dát jim soubor základních pojmu, z něhož by mohli vycházet, a vybudovat v nich vědomí toho, co znamená se něco naučit a pochopit; naučit je používat vlastní rozum tak, aby byli v případě potřeby schopni číst, studovat a rozvíjet svoje vědomosti samostatně, bez metodického vedení.

Základním požadavkem je, aby si studenti nenavykli chrlit naučená tvrzení o přírodě a postupech vědecké práce bez toho, že by se sami, na základě své vlastní zkušenosti, pokusili formulovat podobné závěry. Bez vlastní (byť nevelké) účasti na pochopení a výkladu vědeckých pojmu a teorií nezískají o vědě o nic lepší představu, než jakou by si udělali o poezii pouhým čtením jejich rozborů (ale nikoliv básní samotných) nebo o dějinách jen z diskuse o jejich filozofii, aniž by přitom historii čehokoliv znali.

Jsem přesvědčen, že kdybychom studentům namísto servírování pojmu a vztahů, na něž zatím jejich rozumové schopnosti nestačí, dopřáli možnost pohlédnout na vědu prizmatem méně vznesených problémů a konfrontovat ji s vlastní zkušeností, získali by nadhled, jenž odpovídá daleko lépe tak často vyhlašovaným cílům všeobecného vzdělávání. Takový nadhled by přispěl k vývoji vzdělanějších jedinců a rozumověji založených občanů stejně jako vědomí historie nebo vnímavost k literatuře.

## PROBLÉMY REALIZACE

---

Přestože bych, zvláště na vyšších stupních, dával přednost spíše občasným speciálním kurzům věnovaným konkrétním důležitým problémům (a v těchto kurzech bych – bez ohledu na vyšší náklady – prosazoval týmové vyučování vytvářející interdisciplinární nadhled), jsem přesvědčen, že mnoho práce se dá udělat už na nižších stupních a ve stávajících učebních strukturách.

Především je nutné snížit přehrady, které oddělují jednotlivé disciplíny přírodních, humanitních i společenských věd. Na uváděných příkladech jsem se snažil ukázat, jak by se to mělo udělat. Získá-li učitel – vlastní snahou a pilí – o historických, filozofických, epistemologických či společenských aspektech svého předmětu lepší přehled, než jaký mu poskytla příprava na univerzitu, velice to posílí obecný obsah jeho výuky. Potřebné materiály jsou snadno přístupné jak učitelům, tak studentům. Trochu důvtipu vyžaduje jen vymýšlení otázek, problémů zadávaných za domácí cvičení a písemných

úkolů, na nichž by se studenti obeznámili s idejemi přesahujícími svým významem sterilní závěrečné výsledky konkrétních výpočetních postupů.

Kdybychom chtěli tyto materiály použít ve stávajících přírodovědných kurzech, rozhodně bychom museli upustit od nesmyslného rozsahu látky i tempa, jemuž v současné době vystavujeme naše poddajné a nesoudné studenty. Už dluho tvrdím, že je degradujeme na automaty rozemírající rovnice a nutíme je k bezduchém memorování metod řešení úloh. Dokonce jim ani nedáváme příležitost, aby si uvědomili, co to pochopení ve skutečnosti je. Pokud bychom požadovali, aby rozuměli pojmu a postupu rozumového uvažování, stanovili bychom jim tím daleko vyšší intelektuální měřítka a žádali bychom od nich mnohem vyšší mentální výkony, než jakých jsou schopni nyní – při vši tak na odiv stavěné „šíří záběru“ našich kurzů. Toto konstatování neznamená ústup, právě naopak. Vím dobré, že studenti takové nároky splnit mohou a splňují. Není však možné je přesvědčovat o důležitosti všeobecného vzdělání a přitom je krmit jen nic neříkajícími frázemi. Sama znalost věci zde nestačí, je třeba usilovat také o to, aby studenti získali i vlastní nutkavé intelektuální, morální a estetické zkušenosti. Učitel přírodovědných a technických disciplín musí provozovat svoji vlastní způsobilost v těchto otázkách, jinak bude jeho pedagogické působení pokrytectvím. Jak můžeme po studentech chtít, aby dělali něco, co neděláme sami?

Tyto požadavky se ovšem netýkají jen učitelů technických oborů. Bariéry by měly být prostupné i v opačném směru. Učitelé humanitních disciplín se musí přestat schovávat před „tvrdou vědou“, jak to většinou během studií asi dělali. Musí se přinutit ke zvládnutí alespoň *několika* otázek typu „Jak víme ...?“, „Proč věříme ...?“, o nichž jsem se zmiňoval dříve. O přírodovědných tématech musí ve svých předmětech hovořit zasvěceně; například v každém historickém výkladu o osmnáctém století by měl být *seriozně* (*ne letmo a povrchně*) diskutován Newtonův vliv. Naprosto stejně, jak jsem to požadoval po svých kolejích-technicích a přírodovědcích, se musí stát i učitelé humanitních a společenskovědních předmětů pro své studenty příkladem. Nemůžeme přece očekávat, že studenti přestanou utíkat od všeho, co v nich vyvolává pocit intelektuální nejistoty, budeme-li to dělat sami.

Nedělám si nejmenší iluze, že by se nám mohlo toto všechno lehce podařit. Skutečně však nevidím žádnou jinou možnost, jak dosáhnout alespoň zlomku našich velkolepých cílů. Sám jsem, bohužel, jako student inženýrství tímto způsobem vychováván *nebyl*. Abych svoje vzdělávání intelektuálně vůbec přežil, musel jsem se z oné proasti dostat v následujících letech vlastními silami; musel jsem přitom překonat snad všechny překážky a nesnáze, na něž člověk může za takových okolností narazit. Vy naložené úsilí se mi však bohatě vyplatilo.

## OTÁZKA ROZVOJE POZNÁNÍ

---

Rozvíjí-li naše všeobecné vzdělávání skutečně, jak se domníváme, schopnost myslit, usuzovat a chápát, měly by tomu odpovídat i výsledky obvyklých průzkumů poznávacího vývoje studentů. Jeho stupeň se běžně zjišťuje [3, 8] zadáním dvou nebo více dnes už klasických piagetovských úkolů. Znovu a znova se při tom ukazuje, že asi jen necelých 25 % vysokoškoláků má vyvinutou schopnost abstraktního logického myšlení na úrovni těchto základních úloh. Až 50 % studentů užívá ještě převážně konkrétního způsobu myšlení a zbyvajících 25 % (jež tvoří studenti částečně úspěšní v řešení metodických úsudkových úloh) je v přechodném stadiu.

Mentální schopnosti studentů se *mohou* rozvíjet dále [4–6, 17]. Jejich vývoj je však podmíněn praxí a zkušenostmi s důležitými způsoby myšlení. Vyžaduje *trénink*, ve-

doucí (v Piagetově terminologii) k přizpůsobení a rovnováze. Většina vysokoškoláků potřebuje takové praxe velice mnoho a musí během ní dostávat příležitost k odhalení chyb a jejich opravě. Při tom by se studenti měli naučit:

1. Formulovat a chápát jednoduché premisy a jednostupňové a dvoustupňové syllogismy.
2. Poznat, že neporozuměli tomu, co četli, a identifikovat v textu kritické místo.
3. Dělat elementární hypoteticko-deduktivní úvahy (tj. umět si teoreticky představit možné důsledky různých změn systému).
4. Rozpozнат okolnosti, za nichž mohou nebo nemohou být ustanoveny příčinné vztahy.
5. Provádět základní korelační úvahy.
6. Provádět aritmetické úvahy obsahující poměr a dělení; v jejich rámci zvládnout jednoduché odhadování plochy, objemu nebo jiných běžných veličin.
7. Překládat symboly do slov a slova do symbolů (tj. grafy a jiná symbolická vyjádření vysvětlovat pomocí slov a naopak verbální prohlášení převádět na grafy a aritmetické operace).

Už jsem zdůrazňoval, že množství látky, které cpeme do studentů ve většině všeobecných kurzů přírodovědy, a tempo, jímž to děláme, naprosto znemožňuje procvičování časově náročných operací myšlení, usuzování a chápání. Studenti jsou tím nuceni k bezduchému memorování a nakonec nutně dospívají k přesvědčení, že veškeré „pochopení“ a „vědění“ je totožné s naučenými slovy a frázemi. Nejsou vedeni k používání rozumu, nejsou zkoušeni myšlení; požaduje se po nich pouze odhrávání závěrečných výsledků. Za takových okolností není vůbec žádná naděje, že získají nadhled a porozumění charakterizující pravou přírodovědnou gramotnost či gramotnost v jakémkoli jiném oboru vyžadujícím abstraktní logické myšlení.

Chceme-li skutečně, aby naše všeobecné vzdělávání bylo úspěšné, musíme vycházet z předpokladu, že studenti mají intelekt schopný vývoje a použití. Musíme jim ale dát příležitost přemýšlet, užívat rozumu a duševně se vyvijet. K tomu je třeba podávat látku takovým tempem a na takové úrovni, aby ji mohli strávit. Opravdové pochopení několika základních témat svědčí o daleko vyšších intelektuálních měřítcích a náročných než působivá prohlášení o pokročilých či aktuálních problémech chráněna naučenou hantýrkou.

## VÝCHOVA UČITELŮ

---

Zdaleka nejlepší předpoklady i největší možnosti ke zlepšení veřejného povědomí o problémech, metodách, meziči i společenském dopadu vědy mají základní a střední školy. Pokud by se už na nich dosáhlo opravdového pochopení základních pojmu, ne-smírně by to ulehčilo jakoukoliv pozdější výuku. Na vysoké školy by studenti dokonce mohli přicházet s tak rozvinutými mentálními schopnostmi a s takovými odbornými znalostmi, že by snadno zvládli i ty aspekty moderní vědy, které jsou dnes pro ně beznadějně nepochopitelné. S tímto zázemím by snad byl i nás velkovýrobní způsob výuky početných skupin značně účinnější než teď.

Takovému zlepšení nebrání v současné době nedostatek vhodných studijních textů, ale nevyhovující příprava učitelů. Ani sebelepší studijní materiály nebudou nikdy samospasitelné. Učitel může jejich záměr zcela ukazat svým přístupem, nesouhlasnými komentáři a nejvíce snad tím, co vybere ke zkoušení. Skutečná intelektuální hodnota výuky závisí mnohem více na testech než na textech. K úspěšné realizaci dokonalejších studij-

ních materiálů je nezbytné, aby je učitelé používali s naprostou jistotou – aby bezpečně znali nejen jejich obsah, ale ihy také dokonale ohápal jejich pedagogický záměr.

Není například vinou učebnic, že výtečné učební plány přírodovědy pro základní školy [1, 2] mají tak malý úspěch. Spíše za to může přírodovědná příprava na fakultách, která nevybavuje učitele základních škol potřebnými znalostmi a porozuměním. Zkušenosti, které jsme získali na washingtonské univerzitě, ukazují, že studenti učitelství i učitelé z praxe jsou na tom po této stránce stejně: většinou u nich převládá konkrétní způsob myšlení nad metodickým, nejvýslednějším aritmetických úsudků, v nichž se vyskytuje dělení (jen málokteré zvládnou aritmetické slovní úlohy pro pátu a šestou třídu), neumějí pracovat s proměnnými, nejvýslednější odhadnout, k jakým změnám dojde v soustavě, změní-li se v něj podmínky. Jejich „znalost“ přírodovědy je souhrnem nazepamět naučených názvů a odborných termínů. A poněvadž jim chybí náležité operační pochopení těchto výrazů, nedokáží je v žádném konkrétním případě smysluplně použít.

Jinými slovy, pokud učitelé našich základních škol mohou vůbec nějakou fyziku, pak prošli kurzy kritizovanými v předečnějších částech tohoto článku. Takový způsob výuky neumožňuje budoucímu učiteli onvojení látky, ani jej nevede k používání rozumu. Vypravuje jej do života s jen napojo zapamatovanou zásobou efektních slov jako jádra, lasery, podivné částice, moment hybnosti a černé díry, zato bez jakékoli vědomosti o hustotě, plavání a potápění, bez znalosti zákona setrvačnosti, bez pochopení rozdílu mezi teplem a teplotou, bez porozumění původu fází Měsíce nebo ročního pohybu Slunce, bez představy o elektrickém proudu v jednoduchém ohmickém obvodu a bez sebemenší orientace v nejběžnějších vlnových úkazech. Dobrý učební plán přírodovědy pro základní školu, který by v rozumné míře preferoval jevy každodenního života před tajemným slovníkem moderní fyziky, by ihned odhalil, že počáteční znalosti učitelů i jejich žáků jsou naprosto stejné. Přestože tato slova jsem slyšel od poctivých vnímavých učitelů jako charakteristiku jejich situace.

K osvojení abstraktního způsobu myšlení a k pochopení pojmu obsažených v přírodovědném učivu základní školy nedochází u doplňkých (učitelů a studentů učitelství) ani snáze, ani rychleji než u dětí. V našich výzkumech se znova a znova ukazuje, že se při tom potýkají, často dokonce pomalejším tempem, s týmiž překážkami a obtížemi. Mnoho úsilí vloženého do krátkokdobých instruktáží, které měly připravit učitele základních škol na výuku podle nových učebních plánů, přišlo zcela nazra tím, že doba jejich trvání byla naprosto nedostatečná. Druhá většina učitelů na tom totiž není ani po absolvování vysoké školy o nic lépe než jejich žáci. Je iluzorní doufat, že stručné poučení o „duchu plánu“ a následující proběhnutí příslušných materiálů jim postačí k pochopení obsahu. Zjistili jsme, že potřebnou jistotu mohou získat jen pomalým, trpělivým probíráním látky a nacvičováním abstraktního způsobu myšlení [4, 5, 17, 18]. Dokud nezměníme studijní plány a způsob výuky na vysokých školách, budeme pořád produkovat učitele, kteří potřebují takové nápravné kurzy už v okamžiku promoce. Přitom by tomu tak být nemuselo. Naše výzkumy ukazují, že velká většina učitelů (stávajících i budoucích) potřebné způsobilosti dosáhne, má-li k tomu příležitost.

Velmi běžným projevem nedostatečného zvládnutí látky je u učitelů základních škol jejich reakce na lepší učební materiály. Často je prostě nechávají zavřené v kabinetech, a když už musí přírodovědu učit, recitují ji ze starých osvědčených textů. Jindy, když si sami nejsou v nových materiálech příliš jisti, shledávají je „příliš obtížnými“ pro děti. A poněvadž si neuvědomují, že zdrojem potíží je jejich vlastní nevědomost, sdružují se a v dobré vůli vynakládají spoustu energie na psaní textů vlastních.

Výsledkem této činnosti je vždy zmetek – plný neporozumění, chyb a nesprávných tvrzení – jehož vzdělávací hodnota je nejspíš záporná. (Zdůrazňuji znova, že autory stávajících materiálů pro základní školu, o nichž jsem se prve zmíňoval [1, 2], jsou zkušení, nanejvýš kompetentní vědci, kteří mají nezbytný nadhled i znalosti.)

Ani ty nejlepší učebnice, jaké nám může pedagogický výzkum poskytnout, výuku na školách nijak podstatně neovlivní, dokud nevychováme učitele, kteří budou schopni podle nich učit. To je v současnosti nás hlavní problém a musí být vyřešen na vysokých školách. Vyčítání a obviňování učitelů nižších typů škol je z větší části nepodložené a nespravedlivé: „*Vinny, milý Brute, nejsou naše hvězdy ...*“.

Kromě látky a schopnosti metodicky myslit si učitel musí během své přípravy osvojit i chování ve třídě. Dobré, nové učební plány přírodovědných disciplín nespouští na monologu učitele, ale předpokládají, že studenti budou sami bádat, zkoušet i chybovat, hovořit i naslouchat, diskutovat i vysvětlovat. (Ukazuje se, že kvalifikované vyučování přírodovědy zvyšuje schopnost dětí samostatně číst, chápát a dělat aritmetické úsudky [19–21].) Koná-li se výuka podle špatných učebnic, je důležité, aby učitel zaměřoval pozornost žáků na nesrovnanost a rozporu, které se v nich vyskytují, aby je vedl ke kritickému pohledu a k oprávěnemu textu a nevyžadoval jen „správné odpovědi“. Takový postup od něho ovšem vyžaduje jistotu, dokonalou znalost látky a pohotovost v myšlení; pouhé vyhlašování správných odpovědí je mnohem snazší a zpravidla bývá zástěrkou nejistoty. Bylo by příliš velkým optimismem očekávat tak vyspělé chování od mladého člověka, byť odborně dobře připraveného, který se právě ocitl v nové třídě. Budoucí učitel potřebuje nejen návod, ale i předchozí příklad. Mnoho odborníků u nás i v jiných zemích je zajedno v tom, že učitelé obvykle učí tak, jak byli učeni sami. Pokud tedy pro adepty učitelství neděláme nic jiného než přednášky, budou i oni ve svých vlastních třídách jen přednášet. A to bez ohledu na poučení, kterého se jim dostalo (také ovšem formou přednášky) na katedrách pedagogiky v různých „metodikách“.

Nakonec se zmíňme o výuce budoucích učitelů prováděné v malých skupinách – přesně tak, jak bychom chtěli mít realizovány učební plány přírodovědy na základních školách. Takto vyučovaná přírodovědná disciplína se stává i kurzem metodiky. Budeme-li studenty učitelství vzdělávat tímto způsobem, můžeme doufat i ve změnu na školách, jež se později velmi výrazně projeví také na úrovni posluchačů vysokých škol.

## ÚLOHA POČÍTAČE

---

Jedním ze závěrů, k nimž dospěla naše skupina dlouhodobým sledováním a studiem mnoha různých kurzů, je poznatek, že mnozí studenti nejsou s to zvládnout některé pojmy či kroky myšlenkového postupu jinak než na základě diskuse ve dvojici [4, 22]. Zejména učitelé – jak budoucí, tak stávající – potřebují tuto pomoc. Velmi často by bylo třeba takto probrat například: aritmetické úsudky obsahující dělení, rozdíl mezi rychlostí a zrychléním, vysvětlení závislosti polohy na čase nebo rychlosti na čase jen slovy a pohyby rukou, rozdíl mezi teplem a teplotou, vytvoření a využití modelu vysvětlujícího původ fáze Měsíce (tj. zacházení s otázkami typu „Očekávali byste východ úpláku o půlnoci?“, „Proč?“ nebo „Proč ne?“), vytvoření modelu elektrického proudu a odporu a jeho aplikace na jednoduché obvody sestavené z baterii a žárovek (odpovědi na otázky typu „Jak se změní světlo žárovek v důsledku různých zásahů do obvodu (zkraty, odstranění některých žárovek, zařazení dalších atd.)?“).

Poněvadž takový dialog s jedním studentem může trvat dvacet až třicet minut a více, lze takto postupovat v malých skupinách jen velmi těžko a ve velkých vůbec ne.

Jistě by bylo možné zaujmout stanovisko, že ten, kdo není schopen zvládnout tak jednoduché základní pojmy či způsoby myšlení, do vysokoškolských přírodovědných kurzů nepatří a učitelský obor by se mu neměl mít jinak zvlášť věnovat. I kdybychom však neusilovali o nic vše o prohloubení vlastního zaváděného zájmu studentů o vědu, měli bychom postupovat obvyklěji. Mezi studenty, kteří v našich kurzech propadají nebo z nich prostě mizí (nebo se do nich ze strachu či nejistoty nikdy nezapíší), je mnoho nadějných adeptů jiných oborů, jejichž vztah k přírodním vědám by mohl být zachráněn zmíněnými dialogy v klíčových místech. Naprostě stejně je tomu i u většího budoucích učitelů základních škol a mnoha jiných lidí.

Zde může pomoci moderní technika. Nástup osobních mikropočítačů s grafickým vstupem a výstupem přináší možnost provádět výukové dialogy při jakémkoli počtu studentů [23]. Problem se redukuje na sestavení účinných dialogových programů, které by studentům pomohly překonat nejhorší počáteční překážky a přivedly by je na cestu k dalším vědomostem, na niž by už byli stále méně závislí na cizí pomoci.

Nezbytným předpokladem při první takových dialogů je samozřejmě dokonalá znalost výsledků výzkumu rozvoje poznání a bezpečné zvládnutí logického způsobu myšlení. Dobrý autor ne kromě toho musí dopodrobna obeznámit i s myšlenkovými pochody studentů v konkrétních situacích. Namí tolik velmi zřídka správně odhadneme, z jakých upřímných představ studenti vycházejí, co nejobtížněji chápou a jaké mají vyjadřovací potřeby. Nejdôležitější a nejohroznejší věci při psaní dobrého počítačového dialogu je vlastní vělení takových postupů, které vedou studenta ke korigování nesprávných názorů; pouhá *ifidění*, *nepovídání* na správné a chybné je velice snadné a málo užitečné. Cílené sestavování počítačových dialogů je velmi prospěšné i pro autory samotné. Znovu a znova vydám při školách zkušené učitele po takovém cvičení zdrceně sedět v řadě: „*Tuto látku už tak nikdy učit nebudu. Nechápu, kde jsem k tomuhle pojedl vůbec přitíel. Je plné nedostatků a muklo studenty jen mást.*“

#### POUČENÍ ZE ZKUŠENOSTI

V souvislosti s oživením *zájmu o výukovu věd a inženýrů* dochází v současné době znova k diskusi o postoji veřejnosti k vědě a technice. Někteří jednotlivci připomínají při té příležitosti „nepřesné“ snahy o vytvoření studijních plánů v padesátých a šedesátých letech a vyzývají k zahájení nového kola jejich přípravy. Doufají přitom, že *tentokrát* to budou materiály „lepší“ a „čistější“. Zdá se mi, že si dělají bláhové naděje. Pedagogykou úroveň existujících učebnic by jistě bylo možné zlepšit, obávám se však, že by to hlavní problémy a překážky neodstranilo. Ani sebelepší studijní materiály totiž nemohou „učit samy“.

Nemyslím si, že náleží přírodovědné učební texty padesátých a šedesátých let byly neúspěchem. V době, kdy (především z podnětu *National Science Foundation*) vznikaly, bylo mnohem všechno nových učebnic, zvláště takových, které by vycházely z pozorovací zkušenosti a laboratorní praxe. Těchdejší texty byly intelektuálně naprostě sterilní, navíc zastaralé, plné chyb a nesprávných tvrzení. Po několik generací byly kopirovány a znova napodobovány autory, kteří látky náležitě nerozuměli a z moderního hlediska ji nepoehopili.

V opojné atmosféře té doby přinesly vůdci osobnosti různých vědeckých a technických oborů tvůrce nadhled a nové perspektivy do svých disciplín a vytvořily korektní logické základy pro nové materiály. Vzdělávací hodnota vznikajících textů byla ovšem rozdílná. V jedných bylo tempo na věkovou skupinu, pro niž byly určeny, příliš rychlé. Druhé, stavějící na zaváděných výsledcích rafinovaných postupů jiných věd-

ních oborů, zase neumožňovaly studentům ráděn pochopit výchozí tvrzení (úvahami typu „Jak víme ...?“, „Proč věříme ...?“) a zahlcovaly je jejich nesrozumitelnými důsledky. Další autoři měli zkreslenou představu o skutečných rozumových schopnostech různých věkových skupin [8] a často koncipovali výklad tak abstraktně, že byl nepochopitelný nejen žákům, ale i mnoha učitelům. Tímto nedostatkem trpěla zvláště matematika.

Přesto všechno však vzniklo mnoho znamenitých učebních plánů a textů. Nejlepšími z nich jsou, podle mého názoru, materiály pro první stupeň základní školy [1, 2]. Nepředpokládají u dětí žádnou dřívější „znalost“ odborných termínů. Napřed je seznámují s myšlenkami a potom teprve s názvy. Pojmy nepodávají poučovatelským způsobem, ale syntetizují je z pozorovací zkušenosti. S usuzováním se začíná na konkrétní úrovni a postupně, pod vedením způsobilého učitele, se přechází k abstrakci. Opakování intelektuální zkušenosti tohoto druhu vedou k formování abstraktního myšlení a podporují jeho další rozvoj. Několik zdařilých a potenciálně účinných učebnic bylo napsáno i pro vyšší třídy základních škol a školy střední. Tyto materiály sice většinou nejsou přiměřené věku žáků, pro něž byly určeny, velice dobře se však hodí pro studenty o jeden, dva či tři roky starší.

Jsem přesvědčen, že přes veškeré chyby se *podarilo* vytvořit celou řadu zdařilých, zajímavých a pedagogicky zdravých materiálů. Tyto texty nejsou ani zastaralé, ani nemoderní. Jejich zavedení bylo sice opravdu zklamáním, ale „neúspěch“, o němž se v této souvislosti hovoří, není podle mého názoru způsoben nedostatkem materiálů samotných. Zavinily jej vnější příčiny. Ani ty nejlepší ze současných studijních plánů jistě ještě nejsou posledním slovem učitelské rafinovanosti a rezervy máme určitě i v lepším využití znalosti rozvoje poznání. Jsem však přesvědčen, že nová generace učebních materiálů by – z těchže příčin – selhala naprosto stejně.

Prvním závažným důvodem neúspěchu (zejména na základních školách) byla nedostatečná materiální podpora učitelů, kteří měli dostatek odvahy pustit se do zkoušení nových učebních plánů. Laboratorně orientovaný způsob výuky se neobejde bez doplnění a údržby pomůcek. Přetižení, neustále zaneprázdnění učitelé při něm potřebují trvalou pomoc. Nelze po nich požadovat, aby se ke všem ostatním povinnostem, které musí plnit, ještě starali o provozní záležitosti školy. I když snad někteří vyvíjejí v počáteční vlně nadšení mimořádné úsilí, nemohou to vydržet dlouho. Tak potřebná podpora v těchto záležitostech nebyla nikak velká ani v počátečních stadiích zavádění nových programů a s rostoucím finančním tlakem na školy v sedmdesátých letech zmizela úplně.

Obrovskou překážkou, kterou je nutno odstranit na školách všech stupňů, je tedy starost o materiální a pomůckové zabezpečení výuky. Je naprosto iluzorní doufat, že k rozvíjení vědecké vzdělanosti budou někdy stačit jen tištěné materiály. Nezbytné pochopení, logické myšlení i ovládání pojmu a idejí se u velké většiny běžných jedinců může rozvíjet *jenom* na základě konkrétní pozorovací zkušenosti. Někteří nadaní jedinci si sice mohou osvojit jak vědecké znalosti, tak abstraktní způsob myšlení i bez ní, avšak tomuto malému zlomku populace se to podaří za jakýchkoli podmínek. A máme opravdu štěstí, že tomu tak je, protože jinak by byla vědecká vzdělanost ještě nižší. K jejímu všeobecnému zvýšení, které je naším hlavním cílem, je nezbytné umožnit mladým studentům experimentální zkušenosť a trvale je vést od konkrétního myšlení k abstraktnímu.

Druhým a hlavním důvodem neúspěchu nových studijních materiálů je způsob, jímž se provádělo přeskolování učitelů. Přestože na ně bylo podle pokynů profesorských sborů univerzit vynaloženo velké množství peněz i úsilí, mnoho užitku nepři-

neslo. Nějaky mohl měla jenom tenkrát, když školitelé poznali a respektovali, že frekventanti mají velmi výraznou představu o vědě a že jsou na téměř stejně úrovni pojmového vývoje jako jejich vlastní žáci; jenom tehdy bylo účinné, pokud se v něm pomalu a pečlivě procházela látka, kterou mohli učitelé později vykládat ve svých třídách. Zpravidla však zůstal tento stav nepovědomut nebo nedoceněn. Většina kurzů vycházel z mylného předpokladu, že učitelé základních i středních škol té nejzákladnější přírodovědě, kterou mají ujeti, opravdu rozumejí (nebo že ji současně se studenty snadno pochopí ze závažného nových materiálů). Na letních školách a jiných instruktážích se jim tedy přednášelo o „vzdělávacím duchu“ materiálů, jejichž obsahu nerozuměli. Nebo byl informován o pokročilejších tématech (která byla ovšem také zcela mimo jejich možnosti), aby si rovnali zkušosti svého oboru o nejnovější poznatky. Nebo – a to vůbec nejčastěji – přišli jen poslouchali další stejně rychle probírané, nezáživné a nerozumitelné vzdělávacího druhu přednášky, které už v minulosti neměly žádný patrný vliv na jejich intelekt. Po absolvování takového kurzu ovšem nebyli s to pracovat s novými učebními materiály o ně lepce než před jeho zahájením. Není možné jim zařídit, že si tyto nedostatky neuvědomili a že po následujících zklamáních při výuce případně nechápe až téměř nových textů než vlastní neschopnosti. (Chtěl bych hned říct, že nejdříve všechny učitele do jednoho pytla. Neustále slyším o svrchovaných způsobilých pedagogzech na všech stupních škol. Některé znám i osobně. Ale na to, aby vytětili náš problém, je jich příliš málo.)

Má-li se všechny chápání vědy výrazně zlepšit, budeme muset podniknout účinné kroky k odstranění hlavních příčin současného neutěšeného stavu. Úkol je to sice velmi obtížný (i nákladný), ne však nereálný. Především to musí pochopit profesorské sbory našich univerzit. Budoucí lze totiž pokračovat ve výchově učitelů stejným způsobem jako dosud, nemá na nějaký pokrok vůbec žádná naděje.

Ani ty nejdokonalejší studijní materiály nemohou splnit naše cíle samy o sobě. Jejich zlepšování by mohl mohlo pomoci mnohem méně nadaným studentům, pro drtivou většinu ostatních však řekněm nem. Dokud nevybudujeme nezbytné základy, o nichž jsem hovořil v tomto článku, bude vydávání dalších textů jen záplatováním, které si vyžádá obrovské sponuty peněz i času a z mnoha nám nepomůže. Vyvolá pouze novou vlnu náručí a nárokování na nepriměřenost, zane plíneče řeči o neúspěchu a jeho konečným výsledkem bude jen další volant po lepších učebních plánech. Řešení problému všeobecně přírodovědné gramotnosti ne bude vzdalovat do nekonečna.

## LITERATURA

---

- [1] *Elementary Science Study, Webster Division*. McGraw-Hill, New York 1968.
- [2] *Science Curriculum Improvement Study*. Delta Education. Nashua, New Hampshire 1968.
- [3] Arons A. B. ve sborníku *Cognitive Processes Instruction*. (Red. Lockhead J., Clement J.) Franklin Institute Press, Philadelphia 1979.
- [4] Arons A. B.: *Cultivating the Capacity for Formal Reasoning: Objectives and Procedures in an Introductory Physical Science Course*. American J. of Physics 44, No. 9 (1976) 834.
- [5] Arons A. B.: J. of College Nat. Teaching 1, No. 4 (1972) 30.
- [6] Lawson A. B.: *Relationships among Level of Intellectual Development, Cognitive Style, and Choices in a College Metaphysics Course*. Sci. Education 64, No. 1 (1980) 95.

- [7] Lawson A. E.: *The Reality of General Cognitive Operations*. *Sci. Education* **66**, No. 2 (1982) 229.
- [8] Chiappetta E. L.: *A Review of Piagetian Studies Relevant to Science Instruction at the Secondary and College Level*. *Sci. Education* **60**, No. 2 (1976) 253.
- [9] Faraday M.: *On the Physical Character of Lines of Magnetic Force*. In: Faraday M.: *Experimental Researches in Electricity*, Vol. III. Taylor and Francis, London 1839. (Přetisk: Dover publication, New York 1965, p. 408.)
- [10] Oppenheimer J. R.: *Communication and Comprehension of Scientific Knowledge*. *Science* **142**, No. 3596, November 29 (1963) 1144.
- [11] Holton G.: *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science*, 2<sup>nd</sup> ed. Addison-Wesley, Reading-Massachusetts 1973.
- [12] Rutherford F. J., Holton G., Watson F. G.: *The Project Physics Course*, 3<sup>rd</sup> ed. Holt, Rinehart and Winston, New York 1981.
- [13] Arons A. B.: *Newton and the American Political Tradition*. *American J. of Physics* **43**, No. 3 (1975) 209.
- [14] Aiken C.: *Collected poems*. Oxford University Press, New York 1953.
- [15] Humphrey R. D.: *Georges Sorel, Prophet without Honor*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts 1951.
- [16] Adams H.: *The Education of Henry Adams*. Houghton Mifflin, Boston 1918 (a fada dalších vydání).
- [17] McDermott L. C.: *Combined Physics Course for Future Elementary and Secondary School Teachers*. *American J. of Physics* **42**, No. 8 (1974) 668; *Practice-Teaching Program in Physics for Future Elementary School Teachers*. *American J. of Physics* **42**, No. 9 (1974) 737; *Teacher Education and the Implementation of the Elementary Science Curricula*. *American J. of Physics* **44**, No. 5 (1976) 434; *Improving High School Physics Teachers Preparation*. *The Physics Teacher* **43**, No. 9 (1975) 523.
- [18] Arons A. B.: *The Various Language: An Inquiry Approach to the Physical Sciences. Teacher's handbook*. Oxford University Press, New York 1977.
- [19] Bredderman T.: *Effects of Activity-Based Science in Elementary School*. In: Rowe M. B. (ed.): *Education in the '80s: Science*. National Education Association, Washington, DC 1982.
- [20] Shymansky J. A., Kyle W. C. Jr. and Alport J. M.: *The Effects of New Science Curricula on Student Performance*. *J. Res. Sci. Teach.* **20** (1983) 387.
- [21] Wellman R. T.: *Science: A Basic Language for Reading Development*. In: Rowe M. B. (ed.): *What Research Says to the Science Teacher*, Vol. 1. National Science Teachers Association, Washington, DC 1978.
- [22] Arons A. B.: *Thinking, Reasoning and Understanding in Introductory Physics Courses*. *The Physics Teacher* **19**, No. 2 (1981) 166.
- [23] Bork A. M.: *Interactive Learning*. *American J. of Physics* **47**, No. 1 (1979) 5.