

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Jiří Formánek

Nobelova cena za fyziku za rok 1988

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 34 (1989), No. 5, 262--266

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138360>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1989

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Nobelova cena za fyziku 1988

Jiří Formánek, Praha

Stěží potěší fyzika cokoliv víc než zjištění, že jím odhalený přírodní zákon skutečně funguje. Švédská královská akademie věd svým rozhodnutím udělit letos Nobelovu cenu ve fyzice „Za metodu neutrinového svazku a důkaz párové struktury leptonů prostřednictvím mionového neutrina,“ učiněným dva roky po uveřejnění článku [1] v tomto časopise proto nemohla potěšit nikoho více než mne. Připouštím, že podobnou radost mohou prožívat i L. Lederman, M. Schwartz a J. Steinberger, kteří se o tuto cenu dělí.

Ti, kdo znají jejich dílo, vědí, že obsahuje nejen jeden výsledek ocenitelný Nobelovou cenou. Ostatním se pokusím přiblížit alespoň výsledky shrnuté ve stručném sdělení [2], o něž se rozhodnutí Švédské akademie opírá.

Nejprve si však musíme uvědomit situaci před 25 až 30 lety, kdy tyto výsledky vznikaly. Nikdo nepochyboval o tom, že v atomech elektrony obklopují jádro díky elektromagnetické interakci a že jádro samo sestává z protonů a neutronů vzájemně vázaných silnou interakcí. Podobně se chápala výstavba molekul atd. Za strukturu a dynamiku veškeré stabilní, nás obklopující látky na mikroskopické úrovni byly činěny odpovědnými elektromagnetické a silné interakce. Na druhé straně struktura a dynamika v kosmickém měřítku byla doménou především gravitace. Vědělo se ovšem, že v evoluci hvězd hrají důležitou roli také interakce slabé a že při β -rozpadech jader, které díky nim probíhají, vznikají současně s elektrony také neutrina. Vše tedy nasvědčovalo tomu, že struktura a dynamika veškerého materiálního světa je důsledkem čtyř druhů interakcí: gravitační, elektromagnetické, silné a slabé. První z nich je v makroskopickém měřítku úspěšně popisována Einsteinovou teorií a její vliv na dění v mikrosvětě se považoval za zanedbatelný. Elektromagnetické interakce byly úžasně přesně popisovány kvantovou elektrodynamikou jako důsledek výměny fotonů. Silné interakce mezi nukleony se chápaly jako projev výměny pionů. Čtyřfermionové interakce (viz [1]), přestože úspěšně popisovaly slabé procesy, byly již tehdy mnohými fyziky považovány pouze za nízkoenergetickou aproximaci popisu slabých interakcí, které ve skutečnosti jsou také důsledkem výměny nějaké částice (= intermediálního bosonu).

Naznačené chápání materiálního světa tedy vyžadovalo existenci elektronů (e), protonů (p), neutronů (n), neutrin (ν), pionů (π) a intermediálních bosonů. Fakt, že intermediální bosony tehdy ještě objeveny nebyly, se dal snadno vysvětlit (dnes víme, že správně) tím, že na existujících urychlovačích je produkovat nebylo možno pro jejich příliš velkou hmotnost.

K čemu však zde je mion (μ *) – částice, která je po všech stránkách věrnou kopií elektronů až na to, že je zhruba 200krát těžší? Nejen sama existence mionů, ale i některé

*) Traduje se výrok ISOSORA RABIHO: „Who ordered that?“

jejich projevy zůstávaly záhadou. To, že interagují s jádry mnohem méně často, než se po jejich objevu v kosmickém záření r. 1936 očekávalo, se ovšem objasnilo již v r. 1947 nalezením pionů. Ty bylo možno bez potíží identifikovat s Yukawou předpověděnými nositeli silných interakcí, za něž byly původně považovány miony. Současně se stalo jasným, že μ pozorované v kosmickém záření jsou produkty rozpadů*)

$$(1) \quad \begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu, \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}. \end{aligned}$$

Vědělo se také, že jejich rozpad

$$(2) \quad \mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu + \bar{\nu}$$

je výsledkem slabé interakce naprosto stejného tvaru (a síly) jako interakce odpovědná za β -rozpad neutronů

$$(3) \quad n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$$

a jader. Velkou záhadou však bylo, proč nebyl zjištěn rozpad

$$(4) \quad \mu \rightarrow e + \gamma.$$

Vždyť zdánlivě nejpřirozenější vysvětlení shodnosti μ a e nabízela představa, že μ je „vzbuzeným stavem“ e . Proces (4) by pak měl obdobný charakter jako přechod atomu ze stavu excitovaného do základního. Je ovšem pravda, že k takovéto naivní představě se ani před 30 lety mnoho fyziků nepřiklánílo. Podstatnější proto bylo, že Feinberg už v r. 1958 ukázal, že v rámci teorie, v níž jsou slabé interakce zprostředkovány intermediálním bosonem by na každých 10 tisíc rozpadů typu (2) měl připadat jeden rozpad typu (4) a zejména, když pak o něco málo později Lee a Yang zjistili, že podobný závěr má prakticky obecnou platnost. Z experimentu se totiž vědělo, že rozpad (4) nemůže připadnout na méně než 100 miliónů**) rozpadů (2).

Tento katastrofální rozpor mezi teorií a experimentem bylo možno obejít hypotézou, že mion je nositelem zachovávajícího se kvantového čísla, které je nulové, m.j. pro π , γ a všechny částice ve formuli (3), ale nenulové nejen pro μ , ale také pro neutrino v rozpadu (1) a jedno z neutrin rozpadu (2). Přestože již počátkem padesátých let Konopiskí s Mahmudem a o něco později i Schwinger a další uvažovali modely, v nichž neutrino z β -rozpadu ($\equiv \nu_e$) nebylo totožné s neutrinem z rozpadu mionu ($\equiv \nu_\mu$), nebyla hypotéza

$$(5) \quad \nu_e \neq \nu_\mu$$

přijímána právě s nadšením. Vyžadovala totiž smířit se s existencí nejen μ , ale celého páru „nepotřebných“ leptonů (μ , ν_μ) vedle leptonů „potřebných“ (e , ν_e). Přestože předpoklad existence zachovávajícího se mionového čísla přirozeně vysvětloval i zákaz dalších, nikdy nenalezených procesů, např.

$$(6) \quad \begin{aligned} \mu &\rightarrow e + e + e, \\ \mu &\rightarrow e + \gamma + \gamma, \end{aligned}$$

zůstávalo jeho přímé ověření otázkou zásadní důležitosti.

*) Symbolem $\bar{\nu}$ značíme antineutrino, tj. antičástici k neutrinu.

**) Dnes se tato hodnota blíží 10 miliardám.

Potvrzení hypotézy (5) je v *principu* snadné. Stačí k tomu např. zjistit, že probíhá reakce



což je proces zcela analogický inverznímu β -rozpadu



jehož prokázáním Reines a Cowan již v polovině padesátých let podali přímý experimentální důkaz existence neutrin*). Jako intenzivní zdroj ν_e jim posloužil jaderný reaktor, v němž probíhá obrovské množství rozpadů (3). Pro náš účel jsou však tato neutrina nepoužitelná, protože jejich energie je mnohonásobně nižší než práh reakce (7).

Přímé ověření hypotézy (5) tedy volalo po intenzivním**) svazku vysokoenergetických neutrin. Takový svazek by poskytoval možnost studia i celé řady dalších zásadních problémů souvisejících zejména s fyzikou slabých interakcí. Blíže se těmito otázkami zde zabývat nemůžeme. Byly to však právě ony, které se staly koncem padesátých let středem pozornosti úvah během půlhodinových „přestávek na kávu“ v Pupinově laboratoři, na nichž se každodenně setkávali profesori a doktorandi – mezi nimi i letošní laureáti – k neformálním diskusím. Opakovaně se zde k těmto otázkám vraceli zejména Lee a Yang (nositelé Nobelovy ceny v r. 1957). Byl to však nakonec mladíček Schwartz, kdo si v roce 1959 první plně uvědomil nejen přednosti intenzivních vysokoenergetických neutrinových svazků, ale také jejich realizovatelnost na urychlovačích***). V následujících letech se pak spolu s Ledermanem a Steinbergerem (tehdy již renomovanými odborníky v oblasti slabých interakcí) zaměřili na realizaci takového svazku aby ho využili zejména pro testování hypotézy (5).

V *principu* jde o jednoduchou záležitost: Při srážkách protonů s jádry vznikají piony. Za 10^{-8} s se podstatná část π^\pm rozpadne – tím vznikne μ a ν (viz (1)). Zbrzdíme-li μ dříve, než se rozpadnou (zde nám vycházejí vstříc svou dlouhou dobou života $\sim 10^{-6}$ s), můžeme prostým odstíněním (absorpční délka je pro neutrina o mnoho řádů větší než pro ostatní částice) obdržet prakticky čistý****) svazek $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$. Tímto svazkem můžeme bombardovat další terč. Je-li $\nu_\mu = \nu_e$, měl by proběhnout prakticky stejný počet reakcí



jako reakcí



*) O čtvrt století dříve (1931) PAULI postuloval jejich existenci, protože se nechtěl smířit s narušením zákona zachování energie zdánlivě pozorovaného při β -rozpadech.

**) Nezapomínejme, že pravděpodobnost procesů vyvolaných slabými interakcemi je typicky o 15 i více řádů menší než např. pravděpodobnost pohlčení neutronu jádrem.

***) K podobným závěrům nezávisle došel také B. PONTECORVO, pracující v SÚJV Dubna.

****) Nepatrné příměsi $\nu_e + \bar{\nu}_e$ se vyhnout nelze, neboť zhruba na každých 10^4 rozpadů (1) připadá 1 rozpad $\pi \rightarrow e + \nu$. Pro úplnost dodejme, že při bombardování jader protony vznikají i K mezony, které se pak stávají také zdrojem neutrin. Převážná část z nich pochází z rozpadů $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$, $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$, a jsou tedy opět mionového typu.

$$\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+ .$$

V opačném případě reakce (10) probíhat nebudou.

Odlišit vysokoenergetické μ od e je relativně snadná experimentální záležitost. Provéření hypotézy (5) naznačenou cestou by proto mělo být jednoznačně průkazné.

Cesta k tomuto cíli je ovšem značně komplikovanější, než by se mohlo na první pohled zdát. Naznačme si alespoň v hlavních rysech, jak byla realizována: Experiment se uskutečnil v Národní laboratoři v Brookhavenu, kde byl od r. 1960 v provozu nový urychlovač AGS*), poskytující intenzivní svazky vysokoenergetických protonů. Více než $3 \cdot 10^{17}$ protonů s energií 15 GeV dopadlo na beryliový terč. 21 m za ním byla umístěna mohutná, 13,5 m silná ocelová stěna**), která utlumila hadronový tok faktorem 10^{-24} . Detektorem (jiskrová komora obsahující 10 t hliníku) za ní postaveným však prošlo 10^{14} neutronů a vyvolalo v něm asi 51 reakcí. Z nich bylo pro další analýzu přijato pouze 34 případů, z nichž každý zanechal v komoře jedinou stopu, jejíž původce byl jednoznačně identifikován jako mion. Za 25 dní trvání experimentu však proletělo detektorem mnohonásobně více mionů kosmického záření než mionů vzniklých v reakcích (9). Přestože se toto pozadí podařilo potlačit faktorem 10^{-6} tím, že detektor byl citlivý pouze v kratičkých intervalech, kdy v něm mohla být neutrina z neutrinového svazku***), bylo z výše uvedených 34 případů zřejmě 5 simulováno miony kosmického záření. Všechny ostatní zdroje pozadí byly prakticky vyloučeny. Alespoň v 29 případech tedy proběhla v detektoru reakce (9). Pokud by mionové neutrino bylo identické s elektronovým, měl by být zaznamenán srovnatelný počet obdobných procesů s elektronem. Zjištěn však nebyl žádný. Tím byla hypotéza (5) jednoznačně potvrzena.

V čem spočívá hlavní význam toho všeho z dnešního hlediska?

1. Neutrinové svazky představují nástroj unikátních vlastností a možností k průzkumu struktury a dynamiky mikrosvěta. Dnes existují prakticky u všech významných urychlovačů pracujících s pevným terčem.
2. Zjištění, že leptony se vyskytují v (alespoň) dvou párech sehrálo zásadní úlohu na cestě k dnešnímu našemu chápání mikrosvěta — reprezentovanému tzv. standardním modelem. Po zrodu kvarkového modelu se brzy ukázalo, že také kvarky se sdružují do párů a vždy s odpovídajícím párem leptonů vytvářejí „rodinu“. Dnes víme, že takové rodiny existují (alespoň) tři****)

$$(11) \quad \begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

*) Alternating Gradient Synchrotron.

**) Materiál pocházel ze sešrotovaných válečných lodí.

***) Protony z AGS dopadaly každých 1,2 s na terč po 20–30 μ s v pulsech o délce 20 ns oddělených intervaly 220 ns. Během celého experimentu byl detektor citlivý jen pouhých 5,5 s!

****) τ -lepton byl objeven v r. 1974. Bezprostředně „nalézt“ t -kvark se dosud nepodařilo. O jeho existenci však nikdo nepochybuje.

Vzpomeneme-li si, že naivní kvarkový model vysvětloval všechny potřebné hadrony (p , n , π) jako složené z kvarků u , d (a jejich antičástic), mohli bychom snadno nabýt dojmu, že situace je horší než před čtvrt stoletím – že totiž vedle první „potřebné“ rodiny existují dvě další nikým nechtěné repetice. Není tomu tak. Současná představa o vzniku baryonové asymetrie vesmíru vyžaduje narušení tzv. CP-symetrie, což na druhé straně vyžaduje existenci (alespoň) tří rodin. V tomto smyslu by bez „nadbytečných“ rodin nemohlo dojít k vytvoření látkou dominovaného vesmíru a neměl by ani kdo číst nudné články o udělení Nobelových cen.

Místo bližšího výkladu této problematiky uvedu raději nakonec alespoň nejzákladnější údaje o laureátech samotných.

Leon M. Lederman se narodil 15. 7. 1922 v Buffalu (USA), vystudoval fyziku na Columbijské univerzitě, kde v r. 1951 získal PhD a v r. 1958 se stal profesorem fyziky. Nyní je ředitelem FNAL*) v Batavii.

Melvin Schwartz se narodil 2. 11. 1932 v New Yorku, vystudoval na Columbijské univerzitě fyziku a získal zde PhD v r. 1958. V r. 1966 se stal profesorem fyziky na Stanfordské univerzitě. Později akademickou dráhu opustil. Nyní řídí vlastní firmu „Digital Pathways“.

Jack Steinberger se narodil 25. 5. 1921 v Bad Kissingen v Německu. Ve třinácti letech emigroval se svým bratrem do USA (rodiče je následovali až v r. 1938). Přijal americké občanství. Studoval nejprve chemii na Chicagské univerzitě. Během války vstoupil do armády a pracoval v radiální laboratoři na MIT**) v Cambridgi. Po válce přešel zpět na univerzitu v Chicagu, kde se však již zaměřil na studium fyziky a v r. 1948 získal PhD. Následující rok pracoval na Californské univerzitě v Berkeley. Od r. 1950 byl profesorem fyziky na Columbijské univerzitě. Od r. 1968 pracuje v CERNu v Ženevě, kde je v současnosti mluvčím jednoho ze čtyř experimentů připravovaných na LEP***). Mimoto je profesorem na „Scuola Normale Superiore di Pisa“. Vždy se ochotně dělil o své zkušenosti s kolegy, nezatajil před nimi ani to, co je třeba činit, aby člověk obdržel Nobelovu cenu:

1. v mládí udělat dobrý experiment,
2. zůstat dlouho naživu.

Literatura

- [1] FORMÁNEK J.: *Slabé interakce silně přitahující Nobelovy ceny*. Pokroky MFA 31 (1986), 65–81.
[2] DANBY G., GALLARD J.-M., GOULIANOS K., LEDERMAN L. M., MISTRY N., SCHWARTZ M. and STEINBERGER J.: *Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos*. Phys. Rev. Letters 9 (1962), 36–44.

*) Fermi National Accelerator Laboratory

***) Massachusetts Institute of Technology

***) Large Electron Positron Collider