

# Mikrosvět (IV)

**Higgsovy bosony, částice jejichž existenci se ani přes velké úsilí vědců zatím nepodařilo prokázat, jsou hlavním tématem předposledního dílu seriálu o současném stavu fyziky vysokých energií.**

## Úvod

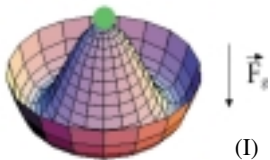
Tento díl seriálu se od těch předcházejících v jedné věci zásadně liší. Je totiž věnován typu částice, který, ač dávno předpovězen, nebyl dosud objeven. Tato situace představuje značný problém, neboť na existenci tohoto druhu částic stojí jeden se základních pilířů standardního modelu (SM)<sup>1</sup> - tzv. Higgsův mechanismus, jehož funkci si později názorně předvedeme.

Minulý díl, věnovaný kvarkům, otevřel téma použití symetrií ve fyzice částic. V nastoupené cestě budeme pokračovat a začneme pojmem, který je částicovým fyzikům (a nejen jim) velmi blízký.

## Spontánní narušení symetrie

Představme si kuličku nacházející se na vrcholku kruhového sombrero, to vše v homogenním gravitačním poli :

Pozice kuličky je sice rovnovážná a krásně symetrická, ale tato rovnováha je labilní a k pádu kuličky stačí libovolně malé silové působení (vychýlení). V momentě, kdy „se rozhodne“ že kulička začne padat, dojde k tzv. **spontánnímu narušení symetrie**, tj. její původně symetrická pozice se pádem naruší.



Tento klasický příklad se sombreroem využijeme pro popis situace v kvantové teorii. Kvantový systém se může nacházet, v závislosti na energii, v různých stavech, tak jako se např. elektron atomu vodíku nachází na různých energetických hladinách. Stavů systému (může jím být třeba celý vesmír) s nejnižší energií, tzv. **základnímu stavu**, říkáme **vakuum**.<sup>2</sup> Tímto stavem bude v případě elektronu ve vodíkovém atomu tzv. stav 1s.

Nyní předpokládejme, že poloha kuličky na sombrero symbolicky popisuje energii určitého kvantového systému. Pak nejnižší položené body sombrero popisují množinu různých základních stavů takového systému. Uvažujme nyní situaci, kdy se kulička nachází na vrcholku sombrero a my kuličku postupně odebíráme energii tak, aby se do-

stala do základního stavu. Žádné z minim však již nebude mít tak symetrický popis jako vrcholek sombrero a to znamená, že ačkoliv popis sombrero je symetrický, jeho základní stavy (vakua) již tuto symetrii nemají.

Funkce popisující sombrero má velmi jednoduché vyjádření v cylindrických souřadnicích  $(r, \varphi, z)$ :

$$(1) z = f(r, \varphi) = -r^2 + 1/16r^4$$

a její symetričnost (vzhledem k vertikální ose z procházející vrcholem) je dána tím, že nezávisí na úhlu  $\varphi$ .

Jak ale souvisí sombrero s Higgsovými bosony?

## Částice?

Představme si, že se kulička nachází na dně „údolí“ sombrero, tj. systém je v základním stavu. Nyní mu začneme dodávat energii. Z počátku se nebude dít nic, protože on je to systém kvantový, a jako takový přijme jen určitou dávku energie, takže energii námi dodávanou odmítne. Pak se však stane, že ji pohltní<sup>3</sup> a jak je známo již z minulého století, mezi energií a hmotou existuje vztah

$$(2) E=mc^2 \text{ (přičemž my pokládáme } c=1 \text{)}.$$

To znamená, že náš systém přešel ze základního stavu do prvního excitovaného, což můžeme interpretovat také tak, že se objevila nová částice s hmotností  $m$ . V naší kuličkové abstrakci to znamená, že jsme se odpoutali ode dna sombrero a postoupili o vrstevnici výše (viz obr. I).

Jakou roli vlastně hraje sombrero? V případě kuličky v gravitačním poli popisoval tvar sombrero (1) funkční závislost potenciální energie kuličky na její poloze. V kvantovém případě spojíme energii kuličky nikoliv s její fyzickou polohou, ale s hodnotou určitého, tzv. **Higgsova**, pole. Podstatné je, že podobně jako v případě kuličky v sombrero, kde energetického minima kulička dosáhla při nenulových hodnotách souřadnic, bude minimální energie systému dosaženo při nenulové hodnotě Higgsova pole, jehož hlavní roli si předvedeme v následující kapitole.

## Problém renormalizace

Jak jsme si již řekli<sup>1</sup>, požadavek renormalizovatelnosti teorie přiměl fyziky k opuštění Fermiho modelu slabé interakce a vedl ke vzniku SM.

Nyní tento požadavek opět využijeme. Funkcím, které umožňují popis dynamického chování fyzikálních modelů, tj. nalezení základních pohybových rovnic, se ve fyzice říká **lagrangiány** (resp. **hamiltoniány**). Jejich tvar je v případě realistických modelů většinou značně složitý. Podstatné ovšem je, že lagrangiány těch teorií, které mají být renormalizovatelné, musí splňovat určitou sy-

metrii. A právě tento požadavek byl v historii SM kamenem úrazu, neboť všechny vhodné funkce popisovaly dynamiku teorií obsahujících jen nehmotné částice.

Vhodnou změnou lagrangiánu (na první pohled ne zcela fyzikální a navíc odkoukanou od fyziků zabývajících se pevnými látkami :-)) se ovšem P. W. Higgsovi podařilo dosáhnout toho, že výsledná teorie sice obsahuje o částici navíc - tzv. **Higgsův boson** (**higgs**)- ale zároveň se některé, původně nehmotné, částice „zhmotní“.<sup>4</sup>

Tento děj si můžeme demonstrovat na případě večírku fyziků, kteří v něm představují Higgsovo pole (jeho hodnota je, jak jsme si již řekli v předchozí kapitole, nenulová):



Pak najednou přichází známá osobnost



fyzikové zpozorní, populární osobnost vchází dále, její obdivovatelé se kolem ní kumulují,



čímž se stává pohyb částice-osobnosti pomalejším. To, jak již víme<sup>1</sup>, znamená, že se její hmotnost efektivně změnila a tak např. původně nehmotná částice se najednou tváří jako bumbříček...

Nyní si představme, že stačí aby někdo u dveří vykřikl: „Pozor, velký profesor přichází!“



a jeho obdivovatelé se začnou shlukovat i bez jeho přímé přítomnosti:



připravujíc se tím na diskusi. Tyto shluky pak můžeme interpretovat jako kvanta Higgsova pole - Higgsovy bosony.

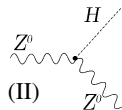
### A co na to experiment?

Dalo by se zjednodušeně říci, že bez Higgsova bosonu není hmotných částic<sup>5</sup>, a proto je jeho nalezení jedním ze základních úkolů částicových fyziků.

V našem seriálu jsme se již několikrát zmínili o urychlovači LEP v evropské laboratoři CERN. V první fázi experimentů, které na něm probíhaly (1989-95), se měřily vlastnosti  $Z^0$  a ověřovaly parametry SM, pátrání po Higgsově bosonu bylo neúspěšné. Počáteční hodnota energie byla zhruba 91 GeV, tak aby bylo možno produkovat částice  $Z^0$ .

V roce 1995 nastala druhá fáze experimentů, zaměřená jednak na studium produkce párů  $Z^0Z^0$  a párů  $W^+W^-$ , jednak na nalezení Higgsova bosonu a případně i některých dalších hypotetických částic.<sup>6</sup>

Postupem doby se LEP „vypracoval“ a energie svazků dosáhla až 208 GeV.<sup>7</sup> No a právě závěr existence tohoto urychlovače byl velice zajímavý (léto 2000). Díky dosažené energii bylo (v principu!) možno pozorovat produkci Higgsovy částice až o hmotnosti 115 GeV. Přítom při energiích nad 206 GeV se skutečně začaly pozorovat případy, které se daly vysvětlit jako rozpad virtuální částice  $Z^0$  na tutéž částici s menší energií a Higgsov bosen  $H$  s klidovou hmotností 115 GeV. Pokud by toto vysvětlení bylo správné, znamenalo by to, že LEP při nejvyšších energiích srážek těsně dosáhl prahu produkce Higgsova bosonu v uvažovaném typu procesu<sup>8</sup>:



Kombinace výsledků všech čtyř experimentů běžících na LEP (ALEPH, DELPHI, OPAL, L3)<sup>9</sup> dovoľovala tvrdit, že s pravděpodobností zhruba 95% je pozorován Higgsov bosen s vlastnostmi určenými SM a s hmotou 115 GeV, zatímco s pravděpodobností zbývajících 5% může jít o souhrn okolností a efekt pozadí. Tato čísla byla dosti významná, ale nestačila k prohlášení daného pozorování za objev Higgsova bosonu. Ve fyzice částic je totiž zvykem prohlásit pozorování určitého efektu za skutečný objev teprve tehdy, když pravděpodobnost, že jde o vliv pozadí, klesne pod hodnotu tzv. 5  $\sigma$ , tj.  $5,7 \times 10^{-7}$  což je asi půl desetitisíciny procenta.

Za těchto okolností vedení CERN prodloužilo chod LEP a nabírání dat do 2. listopadu 2000, tedy zhruba o 1 měsíc. Odhad situace založený na výpočtech byl přítom takový, že zvýšení objemu dat dovolí buď existenci Higgsova bosonu s hmotou 115 GeV vyloučit nebo zvýšit pravděpodobnost, že jde o skutečné pozorování efektu, na zhruba 99,5%.

Po měsíci práce byly na začátku listopadu zveřejněny první předběžné výsledky. Ukázalo se, že případů, u nichž byla vysoká pravděpodobnost, že jde o produkci a následný rozpad Higgsova bosonu, *přibýlo* a pravděpodobnost, že jde skutečně o Higgsovu částici, se přiblížila oněm 99,5%. Proto se začalo uvažovat o možnosti, že by vedení CERN prodloužilo chod urychlovače LEP o celý rok, tj. nabírání dat by pokračovalo až do konce roku 2001. To by však znamenalo vážný zásah do naplánovaného programu, ovlivnilo by to průběh přípravy experimentů nové generace na LHC<sup>10</sup> a v neposlední řadě by to odčerpalo i značné finanční prostředky. Případná odměna byla ovšem více než lákavá - předběžné odhady ukazovaly, že pokud by experimenty pracovaly ještě po dobu 7-8 měsíců při nejvyšší dostupné energii, tj. přes 206 GeV, bylo by pro Higgsovu částici s předpokládanou hmotou 115 GeV možné dosáhnout požadované hranice 5  $\sigma$ . Dalším nezanedbatelným faktorem byla vidina Nobelovy ceny.

Proto došlo ke složitému rozhodovacímu procesu. Fyzikové spojení s programem LEP měli na rozdíl od svých kolegů z LHC jednoznačný zájem pokračovat. Ti ovšem namítali, že by to ohrozilo stanovený postup prací a dosažení zamýšlených cílů v plánovaných termínech<sup>11</sup>. Nezanedbatelná byla samozřejmě i otázka financí neboť nebylo jasné, zda se podaří zajistit pro tak zásadní změnu programu dostatečnou podporu členských zemí CERN. Několik poradních orgánů (LEP Committee, vědecká rada CERN) dospělo po dlouhých jednáních k závěrům, které prodloužení chodu LEP striktně neodmítly, ale také jej jednoznačně nepodpořily.

Za těchto okolností ředitel a nejvyšší vedení CERN rozhodlo o ukončení činnosti LEP a 8. listopadu 2000 bylo vydáno oficiální prohlášení, že LEP po 11 letech špičkového výzkumu končí svou existenci.

S odpovědí na otázku týkající se existence Higgsova bosonu s hmotou blízkou 115 GeV tak musíme nějakou dobu počkat. Jelikož urychlovač LEP nám v tomto směru již nepomůže, je přirozené se ptát, co můžeme očekávat od jiných experimentů.

### (Snad) růžová budoucnost

Určitou naději objevit Higgsovu částici mají experimenty CDF a D0 na urychlovači Tevatron ve Fermilab v USA. Zde se srážejí svazky protonů a antiprotonů s energií 1 TeV. Po několikaleté rekonstrukci zahájil urychlovač v roce 2001 opět svou činnost

(Run II) a je naděje, že během následujících let nashromáždí takové množství dat, které umožní existenci Higgsovy částice v této energetické oblasti potvrdit či vyvrátit.

Pokud však chtějí být fyzikové z Fermilabu první, musí stihnout svůj objev do roku 2007, kdy by měl být (pokud vše půjde podle současných plánů) již třetím rokem v provozu cernský LHC. V té době by objem jím nabíraných dat měl pro potvrzení existence Higgsova bosonu již stačit. Na rozdíl od LEP, pro který bylo nalezení Higgsovy částice s hmotností 115 GeV na hranici jeho možností, nebude LHC ve svých možnostech ani zdaleka tak ohraničen.

Budoucnost experimentů fyziky vysokých energií, provozovaných na urychlovačích, se proto zdá jako velmi slibná a potvrzení existence Higgsova bosonu (či jeho alternativních kolegů) se snad stane jen jedním z očekávaných objevů. Další moderní urychlovače (např. TESLA, CLIC) by pak naše vyhlídky měly ještě podstatně vylepšit.

### A co dále?

První věta předešlého odstavce vyžaduje doplnění. Vzrušující okamžiky můžeme totiž očekávat i v oboru částicové fyziky spojené s výzkumem kosmického záření. Energie částic v něm obsažených bude totiž asi navždy nedosažitelná pozemským metodám. A tak poslední díl našeho seriálu věnujeme právě tomuto tajuplnému odvětví.

Nashledanou příště.

### Zdroje

- [www-hep.fzu.cz/~rames/outreach/text.html](http://www-hep.fzu.cz/~rames/outreach/text.html),
- [www.cern.ch](http://www.cern.ch) (obrázky Higgsova mechanismu).

Děkuji J. Formánkovi, M. Malinskému, J. Ramešovi a R&R. Sýkorovým za cenné připomínky při přípravě tohoto příspěvku.

TOMÁŠ SÝKORA, ÚČJF MFF UK ■  
tomas.sykora@mff.cuni.cz

<sup>1</sup>Mikrosvět II, VTM 6, 2001.

<sup>2</sup>Z této definice také vyplývá, že vakuum nemusí znamenat stav, který neobsahuje žádné částice.

<sup>3</sup>Tento jev tak můžeme přirovnat např. k fotoelektrickému efektu.

<sup>4</sup>Otázka, zda je tato konstrukce pouze matematickým trikem nebo jsme se skutečně přiblížili správnému popisu přírody, byla nasnadě a mnoho fyziků se snažilo a stále snaží o alternativní popis. Nicméně dosavadní předpovědi SM jsou ve velmi dobré shodě s pozorovanými daty.

<sup>5</sup>Existují ale i jiné „zhmotňující“ mechanismy.

<sup>6</sup>Jelich existence předpovídají tzv. **supersymetrické teorie**.

<sup>7</sup>Tato energie stačí na produkci 110 proton-antiprotonových párů (!). Uvědomme si, že hraniční energie LEP byla původně stanovena na 200 GeV. Její zvýšení bylo umožněno až zavedením nových technologií (např. nových typů supravodičů).

<sup>8</sup>Klidová hmota  $Z^0$  je 91.2 GeV;  $91.2+115=206.2$ .

<sup>9</sup>Pražští fyzikové se účastnili (a stále účastní) právě experimentu DELPHI.

<sup>10</sup>Mikrosvět, VTM 5, 2001.

<sup>11</sup>Nezapomínejme, že tunel LEP bude použit pro LHC...