



# Je to opravdu on, Higgsův boson

Jiří Chýla

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 2, 182 21 Praha 8; chyla@fzu.cz

**V**e čtvrtek 14. března vydala Evropská laboratoř částicové fyziky CERN v Ženevě tiskovou zprávu [1], v níž shrnula nejnovější výsledky z experimentů na urychlovači LHC, které byly v týdnu od 2. do 9. 3. 2013 přeneseny na pravidelné jarní konferenci *Setkání v Moriondu* v italském zimním středisku La Thuile. Šlo především o výsledky zkoumání procesů, v nichž se rodí Higgsův boson, jehož objev [2] byl ohlášeno 4. 7. loňského roku dvěma mezinárodními kolaboracemi ATLAS a CMS. Na té první se významným způsobem podílejí i čeští fyzikové z Akademie věd, Univerzity Karlovy a Českého vysokého učení technického. Podrobněji jsou význam a role, kterou hraje Higgsův boson ve standardním modelu elementárních částic, i způsob, jak se Higgsův boson hledá, rozebrány v článku *Higgsův boson objeven?* [3]. V polovině února byl na zhruba dva roky provoz LHC přerušeno a letošní *Setkání v Moriondu* bylo první vhodnou příležitostí prezentovat výsledky získané na úplném souboru dat nabraných v letech 2011 a 2012. Je dobré připomenout, že tento soubor je více než pětikrát četnější než soubor dat z loňského července, na němž byl objeven Higgsova bosonu ohlášeno. Dříve než se pokusím vysvětlit, co přinesly nové výsledky, krátce připomenou, proč se LHC zastavuje na dva roky zrovna v době, kdy by bylo užitečné dále podrobně zkoumat vlastnosti nové částice.

## Proč přestávka zrovna teď

Na úplném začátku provozu LHC došlo v září 2008 k jeho vážné poruše [4, 5]. Způsobilo ji roztavení jednoho spoje (jichž jsou v LHC tisíce) na vodiči mezi dvěma supravodivými magnety, jimiž protékal v tom okamžiku proud 8,7 kA. K tomu, aby bylo možné udržet protony na (zhruba) kruhové dráze o obvodu 27 kilometrů při jejich plánované energii 7 000 gigaelektronvoltů (GeV), je potřeba silné magnetické pole, jehož je možné dosáhnout jen v elektromagnetu, jímž prochází proud téměř 12 kA a vodiče jsou ochlazeny na  $-271$  °C, tedy na teplotu velmi blízkou absolutní nule. Při tak obrovských proudech stačí i nepatrná nedokonalost v místě spoje mezi dvěma částmi vodiče a na spoji vznikne odpor, kterým se spoj okamžitě zahřeje a roztaví. Vyšetřování příčiny havárie ukázalo, že při proudu 8,7 kA v jednom spoji mezi magnety vznikl odpor, který způsobil roztavení spoje a následný elektrický oblouk, který prorazil obal, v němž bylo udržováno chladicí médium, a obrovský tlak zahřátého hélia protřhl i vnější

ochrannou vrstvu a deformoval i samotné 35 tun těžké magnety v blízkosti místa nehody. Aby bylo možné LHC provozovat, byl proto po opravě [5], která trvala téměř rok, snížen elektrický proud procházející supravodivými magnety na hodnotu, která omezila maximální energii každého ze svazku protonů, nejprve na 3 500 GeV a v roce 2012 na 4 000 GeV.

Během dvouleté přestávky budou na celém obvodu LHC instalovány bezpečnostní prvky, které zajistí, že v případě podobného problému s nějakým spojem, což nelze vzhledem k jejich počtu vyloučit, bude včas (což znamená během zlomku vteřiny) detekován a ošetřen tak, aby urychlovač nebyl poškozen. Teprve poté bude možné zvýšit energii svazků protonů na plánovaných 7 000 GeV.

Tato vyšší energie je důležitá z řady hledisek. Jedním z nich je právě podrobnější zkoumání vlastností nové objevené částice (o tom dále), ale také pro hledání signálů „nové fyziky“, tj. nových částic a jevů, které se vymykají rámci tzv. standardního modelu elementárních částic. Mám tím na mysli například různá supersymetrická rozšíření standardního modelu, projevy extra rozměrů prostoru a další exotické možnosti. Všechny tyto jevy vyžadují co nejvyšší energie srážejících se protonů, a proto je zvýšení energie svazků protonů v LHC na plánovaných 7 000 GeV tak důležité.

## Jak se pozná Higgsův boson

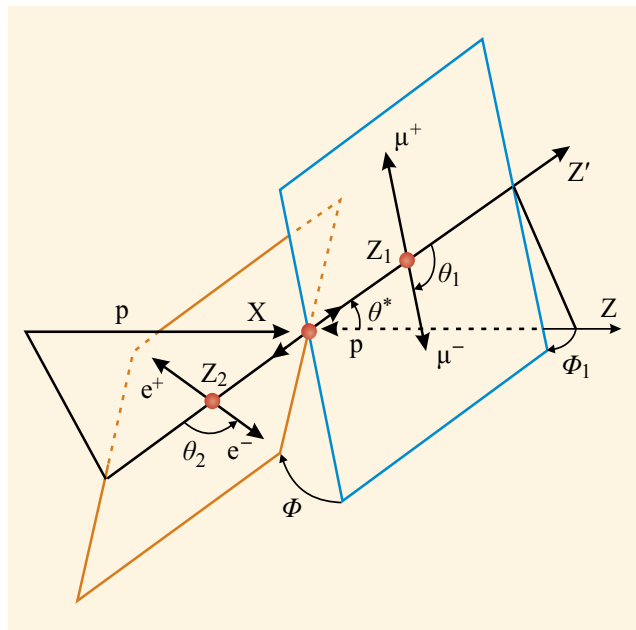
A nyní k tomu, co přineslo *Setkání v Moriondu* a na ně navazující publikace, pokud jde o vlastnosti částice, jejíž objev byl oznámen vloni v červenci. Především je nutné zdůraznit, že oba experimenty, CMS a ATLAS, dávají pro všechny změřené vlastnosti zcela konzistentní, tj. velmi blízké, ale ne identické výsledky. To je velmi důležité, neboť obě experimentální zařízení mají gigantické rozměry a cesta od zpracování „surových“ informací o samotné srážce dvou protonů až k výpovědi o hmotnosti pozorované částice je nepředstavitelně dlouhá a snadno by se do ní mohla vloudit „chybička“. Ředitelství CERNu proto pochopitelně uvolní pro publikaci jen takové výsledky, kde oba experimenty dávají v mezích chyb stejné výsledky. To je také případ výsledků, o nichž bude dále řeč.

Elementární částice standardního modelu, tj.

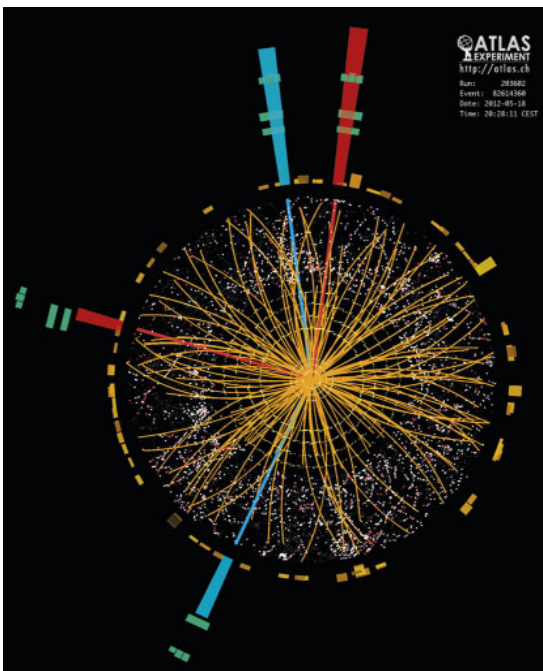
- kvarky,
- leptony,
- kalibrační bosony,
- Higgsův boson,

stejně jako všechny částice mikrosvěta, jsou charakterizovány třemi základními veličinami: hmotností, spinem a paritou, a dále pak hodnotami elektrických, slabých a silných nábojů, které určují jejich elektromagnetické, slabé a silné interakce. Částice, která byla objevena vloni, je elektricky neutrální a má hmotnost 126 GeV, tzn. je 134krát těžší než proton. V tomto ohledu nepřinesly poslední výsledky nic převratného. To, co přinesly nového, je informace o měření hodnoty spinu a parity, dvou veličin, pro něž předpovídá standardní model pro Higgsův boson konkrétní hodnoty, které dobře souhlasí s pozorováním.

Spin je veličina, která charakterizuje „vnitřní“ moment hybnosti a nemá pro elementární částice standardního modelu dobrý klasický analog. Ten má z matematického hlediska podobná veličina, tzv. orbitální moment hybnosti, který v klasické fyzice charakterizuje pohyb částice po orbitě, například elektronu kolem jádra v Bohrově poloklasickém modelu atomu. Přesto není zcela nesmyslná analogie spinu s dětskou káčou. Tu můžeme roztočit i zpomalit a její osu rotace libovolně naklonit. Například elektron je takovou „kvantovou“ káčou, která má ovšem velmi podivné vlastnosti: nelze ji zpomalit ani zrychlit, „točí se“ pořád stejně, odborně řečeno má jednou pro vždy stejný, od přírody daný spin. Navíc, a to je klíčové a netriviální, všechny elektrony mají stejný spin, tzn. „točí se“ stejně rychle. V jistých jednotkách říkáme, že mají spin 1/2. Tuto hodnotu spinu mají všechny kvarky a leptony, kterým říkáme souhrnně fermiony. Projevem spinu je u elektricky nabitých částic jejich mag-



**Obr. 1** Kinematika rozpadu Higgsova bosonu X na dva neutrální intermediální vektorové bosony  $Z_1$  a  $Z_2$  v jeho těžištové soustavě. Boson  $Z_1$  se dále rozpadne na pár kladně a záporně nabitého mionu, boson  $Z_2$  na pár elektron-pozitron. Úhly  $\Phi$  a  $\Phi_1$  popisují orientaci rovin rozpadu bosonů  $Z_1$  a  $Z_2$ , úhly  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  úhly záporně nabitého mionu a elektronu vůči směru letu mateřského bosonu. Ze závislosti rozdělení případů rozpadu Higgsova bosonu na čtyři nabitě leptony na úhlech  $\Phi$ ,  $\Phi_1$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  lze určit jeho spin a paritu. Tyto veličiny nezávisěji na úhlu  $\theta^*$ , který určuje směr výletu bosonů  $Z_1$  a  $Z_2$  vůči ose srážky dvou protonů.



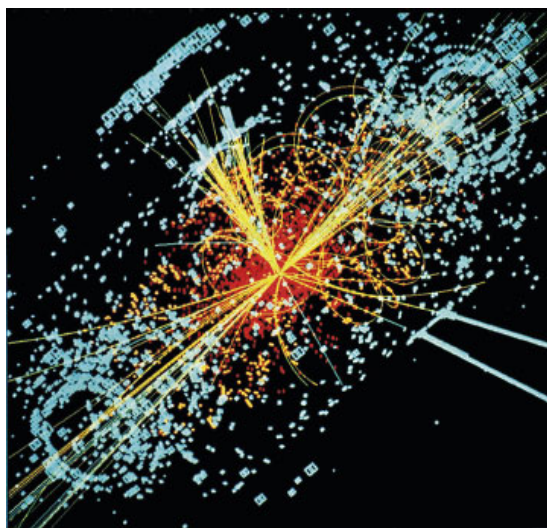
**Obr. 2** Počítačové zpracování (v rovině kolmé na směr srážejících se svazků protonů) konkrétního případu rozpadu Higgsova bosonu na dva bosony Z s jejich následnými rozpady na dva páry elektronů (červené sloupce) a pozitronů (modré sloupce). Zakřivené hnědé dráhy jsou záznamy průchodu elektricky nabitých částic vnitřním dráhovým detektorem, který se nachází v magnetickém poli. Výška barevných sloupců kvantifikuje změřené energie elektronů a pozitronů. Z měření rozdělení takovýchto rozpadů na úhlech mezi vyznačenými směry výletu elektronů a pozitronů lze stanovit spin a paritu Higgsova bosonu.

netický moment, který hraje důležitou roli ve fyzice pevných látek.

Jsou ovšem i částice, které se „netočí“, tzn. mají spin nula. K těm patří například piony a kaony, které jsou ve standardním modelu vázané stavy kvarku a antikvarku, a spin nula má také Higgsův boson. Kalibrační bosony standardního modelu mají spin 1 a tato jejich společná vlastnost je výchozím bodem ve snahách sjednotit všechny tři síly standardního modelu, tj. elektromagnetickou, slabou a silnou sílu, do jedné „jednotné“ teorie. Částice s „celočíselným“ spinem se souhrnně nazývají bosony. Základní rozdíl mezi fermiony a bosony je v tom, že fermiony splňují Pauliho vylučovací princip, zatímco bosony nikoliv. Tato skutečnost je klíčová pro existenci struktury atomů a molekul a nemá v klasické fyzice naprosto žádnou analogii.

Ještě dál od klasických představ o popisu částic je pojem „parita“. Ta souvisí s popisem objektů při změně orientace prostorových os, jinými slovy zrcadlení. Když se podíváme do zrcadla, vypadá naše levá ruka jako pravá a obráceně, srdce máme na pravé straně hrudi a podobně. Zrcadlový obraz objektu je obvykle jiný než vzor, ale existují i objekty, jejichž zrcadlový obraz je s předlohou stejný, například přesná koule v klidu. V mikrosvětě, kde platí kvantové zákony, jsou částice popisovány tzv. vlnovou funkcí, což je matematický objekt, který každému bodu v našem trojrozměrném prostoru přiřadí nějaké číslo. V takovém případě se můžeme ptát, jak souvisí hodnota vlnové funkce v daném bodě o souřadnicích  $(x, y, z)$  s hodnotou v bodě, který má všechny tři souřadnice opačné, tj.  $(-x, -y, -z)$ . Pokud je tato hodnota stejná (pro všechny takové dvojice), říkáme, že parita částice je kladná, pokud

» Higgsův boson standardního modelu má spin nula a kladnou paritu – stejně jako detekovaná částice 126 GeV. «



**Obr. 3** Příklad simulovaných dat modelovaných na detektoru částic CMS na Large Hadron Collideru (LHC) v CERNu. Po srážce dvou protonů se Higgsův boson rozkládá do dvou proudů hadronů a dvou elektronů. Čáry reprezentují možné cesty částic produkovaných proton-protonových kolizí v detektoru. Energie těchto částic je zobrazena modře. Zdroj: Wikipedie, CERN.

má opačné znaménko, říkáme, že parita takové částice je záporná. Higgsův boson musí mít paritu kladnou, na rozdíl od již zmíněných pionů a kaonů, které mají paritu zápornou.

Higgsův boson standardního modelu má tedy spin nula a kladnou paritu a tyto hodnoty byly také s rozumnou přesností stanoveny pro částici s hmotností 126 GeV. Právě k tomu bylo potřeba nashromáždit co nejvíce dat. Z těch, které byly k dispozici loni v létě, to ještě neplýnou. Nejvhodnější pro stanovení spinu a parity bosonu s hmotností 126 GeV je měření a analýza jeho rozpadu na dva bosony Z (jeden reálný a jeden virtuální), které se dále rozpadají na páry elektron-pozitron nebo kladně a záporně nabitý mion. V koncovém stavu po rozpadu bosonů Z jsou tedy dva kladně a dva záporně nabitě leptony a z jejich úhlového rozdělení, jež závisí celkem na čtyřech úhlech na obrázku označených  $\Phi$ ,  $\Phi_1$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , lze spin i paritu v principu stanovit. Takových případů ovšem není mnoho, experiment ATLAS jich zaznamenal zatím jen 35. Vzhledem k tomu, že rozdělení závisí na čtyřech úhlech a rozdíly mezi úhlovými rozděleními charakterizujícími různé hodnoty spinu a parity nejsou nikterak dramatické, není záležitost jednoduchá a je třeba definovat vhodnou veličinu kombinující závislosti na všech čtyřech úhlech. Nebudu tuto veličinu specifikovat, neboť je poměrně komplikovaná, jen poznamenám, že data byla srovnávána s úhlovými rozděleními pro následujících šest možností spinu  $J$  a parity  $P$ :  $J^P = 0^+, 0^-, 1^+, 1^-, 2^+, 2^-$  a jednoznačně nejlepší popis dostáváme pro spin 0 a kladnou paritu, tedy to, co očekáváme u Higgsova bosonu. Chtěl bych ovšem zdůraznit, že statistická analýza dat je netriviální a tento závěr není na první pohled z jednotlivých rozdělení zjevný.

Posledním a velmi důležitým svědectvím, že jde o Higgsův boson, je skutečnost, že počet pozorovaných Higgsových bosonů dobře odpovídá předpovědi standardního modelu. Tak by tomu nemuselo být a případný odklon počtu detekovaných Higgsových bosonů od předpovědi standardního modelu je, resp.

bude hlavní metodou, jak zjistit, zda pozorovaná částice je přesně ten Higgsův boson, který předpovídá standardní model, nebo zda jde o jednu ze skupiny částic, které hrají podobnou roli v nějaké teorii, jež standardní model rozšiřuje. Například v té, kde jsou částice standardního modelu doprovázeny tzv. supersymetrickými partnery. Dosavadní data jsou konzistentní s předpovědí standardního modelu, byť experiment ATLAS vidí trochu silnější signál,  $1,65 \pm 0,33$ krát předpověď standardního modelu, a experiment CMS zase poněkud slabší,  $0,88 \pm 0,14$ krát předpověď standardního modelu. Kombinace dat obou experimentů vede na hodnotu konzistentní s jedničkou, tj. předpovědí standardního modelu. Podstatně přesnější změření síly signálu, které lze očekávat po znovuspuštění LHC počátkem roku 2015 v důsledku vyšší energie svazků a tím pádem podstatně většího počtu zaznamenaných případů produkce Higgsova bosonu, může přinést první signály něčeho nového, po čem fyzikové tak touží.

I kdyby se tedy časem ukázalo, že nejde přesně o Higgsův boson standardního modelu, nebojím se ho nazývat Higgsovým bosonem již dnes.

Čtenářům, které zajímají podrobnosti klikaté cesty vedoucí přes pojem spontánního narušení symetrie k Higgsovu bosonu, mohu doporučit velmi pěkný, byť techničtější článek Brouta a Englerta [6]. Ten byl, podobně jako texty [7, 8], napsán pro speciální číslo časopisu *Comptes Rendus Physique* nazvané *The Mystery of the Higgs Particle* [9]. V příspěvku [7] je popsán Higgsův boson dnešního standardního modelu, jenž představuje nejjednodušší způsob, jak zajistit matematickou a fyzikální konzistenci standardního modelu. Možnosti, jak tuto konzistenci zajistit bez existence Higgsova bosonu, jsou nastíněny v práci [8]. Cesta Petera Higgse k částici, která je po něm pojmenována, je poutavě popsána v jeho vzpomínkách [10].

## Literatura

- [1] Dostupné z WWW: <http://press.web.cern.ch/>.
- [2] Dostupné z WWW: <http://www.ceskapozice.cz/domov/veda-vzdelavani/tajemna-castice-je-na-svete>.
- [3] J. Chýla: „Higgsův boson objeven?“, Čs. čas. fyz. **62**, 218 (2012).
- [4] T. Kubeš: „Nový harmonogram spouštění urychlovače LHC“, Čs. čas. fyz. **59**, 56 (2009).
- [5] T. Kubeš: „Znovuspuštění urychlovače LHC“, Čs. čas. fyz. **60**, 134 (2010).
- [6] R. Brout, F. Englert: „Spontaneous broken symmetry“, C. R. Physique **8**, 973 (2007); dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070506002866>.
- [7] M. Davier: „The Higgs boson of the Standard Model“, C. R. Physique **8**, 986 (2007); dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070506002842>.
- [8] C. Grojean: „Higgsless approach to electroweak symmetry breaking“, C. R. Physique **8**, 1068 (2007); dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070506002878>.
- [9] *The Mystery of the Higgs Particle*. Speciální číslo C. R. Physique (2007), dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/16310705>.
- [10] P. Higgs: *My life as a Boson*; dostupné z WWW: <http://www.kcl.ac.uk/nms/depts/physics/news/events/MyLifeasBoson.pdf>.