

Higgsův boson objeven?

Jiří Chýla

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

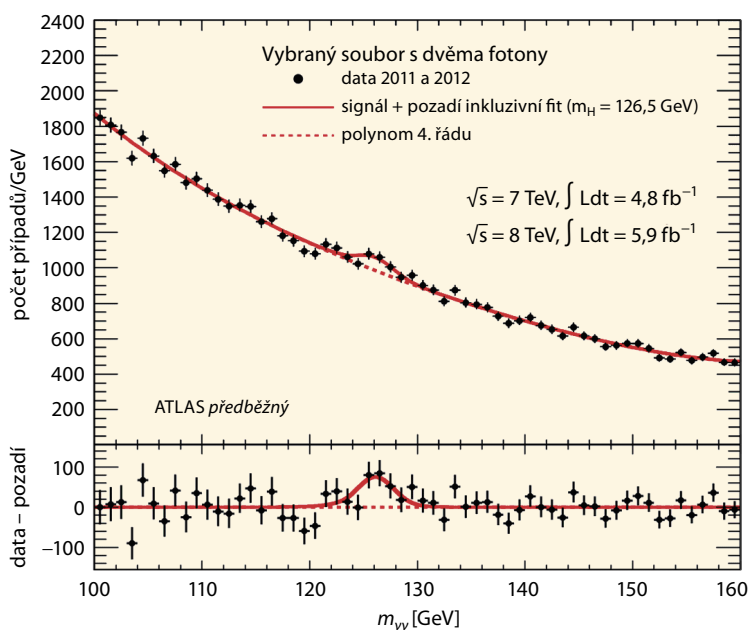
Ve středu 4. července 2012 proběhl v CERN napjatě očekávaný seminář, na němž dva experimenty na urychlovači LHC – ATLAS a CMS – oznámily objev částice, jejíž vlastnosti jsou konzistentní s vlastnostmi Higgsova bosonu. Jak událost charakterizoval generální ředitel CERN Rolf-Dieter Heuer, je to historický milník, ale teprve jeho začátek. Na experimentu ATLAS se podílí také početná skupina českých fyziků z Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR, Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy a Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské a Ústavu technické a experimentální fyziky Českého vysokého učení technického. Tyto instituce stály u zrodu kolaborace ATLAS a na vývoji, konstrukci a provozu detektoru ATLAS pracují již od roku 1995.

Svědectví pro existenci částice s hmotností okolo 126 GeV (ATLAS 126,6 GeV, CMS 125,3 GeV), tj. 133krát větší, než je hmotnost protonu, je přesvědčivé a opírá se o kombinaci dat z roku 2011 a 2012. Náznaky existence bosonu s touto hmotností, které byly patrné již v datech z roku 2011, byly plně potvrzeny v datech nabraných od počátku dubna do poloviny června roku 2012. Oba experimenty přitom pozorují zhruba stejný přebytek případů, kdy se ve srážkách dvou protonů produkuje dva fotony (a v menší míře i dva páry opačně

nabitých leptonů) ve srovnání s tím, co bychom očekávali, kdyby Higgsův boson neexistoval. Skutečnost, že dva nezávislé experimenty (a každý ve dvou nezávislých analýzách, tj. de facto čtyři nezávislé analýzy) vidí stejný efekt, je silným argumentem, že nejde o statistickou fluktuaci, ale o reálný jev. Pokud se potvrdí, že jde skutečně o Higgsův boson, bude to triumf dnešního tzv. standardního modelu (SM). Podrobněji je SM popsán v článku [1]. Pokud by se ukázalo, že pozorovaná částice nemá přesně ty vlastnosti, které má mít Higgsův boson ve SM, byl by její objev ještě závažnější, neboť by mohlo jít o Higgsův boson v některé variantě rozšířeného SM, například té, která postuluje existenci supersymetrických partnerů částic SM. Anebo by mohlo jít o projev „nové fyziky“, kterou si zatím nedovedeme ani představit.

Higgsův boson ve standardním modelu

Hovoříme-li o Higgsově bosonu, je tím obvykle myšlen Higgsův boson ve standardním modelu. Ten shrnuje naše současné znalosti o základních stavebních kamelech hmoty a silách mezi nimi působících. Těmi kameny jsou fundamentální fermiony se spinem $\frac{1}{2}$, které existují ve třech generacích a dělí se na kvarky a leptony. Mezi nimi působí tři síly (gravitace není v SM zahrnuta): elektromagnetická, slabá a silná. Všechny tři jsou popsány v rámci tzv. kalibračních teorií, jež se vyznačují tím, že síly mezi fundamentálními fermiony jsou zprostředkovány „výměnou“ částic se spinem 1, tzv. intermediálních vektorových bosonů, česky nosičů sil. Důvod, proč ve SM vystupuje i Higgsův boson, souvisí se skutečností, že na rozdíl od nosičů elektromagnetických sil (fotonů) a silných sil (gluonů), které jsou nehmotné, mají nosiče slabých sil (bosony W^+ , W^- a Z) konečnou a velkou hmotnost (80, resp. 91 GeV). V důsledku toho mají slabé síly velmi krátký dosah, zhruba tisícinu poloměru protonu. Pokud by byly i bosony W^+ , W^- a Z nehmotné, žádný Higgsův boson bychom nepotřebovali a SM by byl plně matematicky i fyzikálně konzistentní. Problém vzniká, pokud chceme do takového zjednodušeného SM zavést nenulové hmotnosti bosonů W^+ , W^- a Z . Přidáme-li „rukou“ pouze běžný hmotový člen, zjistíme, že teorie bude dávat pro některé procesy matematicky i fyzikálně nesmyslné předpovědi. Primární role Higgsova bosonu je v tom, že v důsledku jeho interakce s bosony W^+ , W^- a Z tyto nesmyslné předpovědi zmizí a SM je konzistentní i pro hmotné bosony W^+ , W^- a Z . Obvyklé tvrzení, že Higgsův boson, resp. Higgsovo pole je zodpovědné za hmotnosti kvarků, leptonů a bosonů W^+ , W^- a Z , je nesprávné a matoucí. Podrobněji je role Higgsova bosonu ve SM rozebrána v textu [2].



Obr. 1 Rozdělení invariantní hmotnosti $m_{\gamma\gamma}$ párů fotonů v experimentu ATLAS. Data pocházejí z let 2011 a 2012. Plná červená čára popisuje celkové rozdělení, červená přerušovaná čára rozdělení invariantní hmotnosti fotonů, které nevznikají rozpadem Higgsova bosonu a které představují tzv. pozadí, jemuž dobře rozumíme. V dolní části obrázku je rozdíl mezi plnou a přerušovanou červenou čarou, na němž je patrný pík při invariantní hmotnosti 126 GeV.

Zde je třeba připomenout, že práce z roku 1964, kde Higgs svůj boson zavedl, se standardního modelu netýkala a ani týkat nemohla, neboť v té době standardní model v dnešní podobě neexistoval. To, co Higgs v této práci postuloval, byl prototyp Higgsova bosonu (pro odborníky: Higgsův boson v abelovské kalibrační teorii) – Higgsův boson v realistickém SM zavedl až Weinberg v práci z roku 1967, za niž dostal spolu s Glashowem a Abdusem Salamem v roce 1979 Nobelovu cenu za fyziku. Je také důležité zmínit, že současně s Higgsem na stejnou základní myšlenku, jak konzistentně zavést hmotné nosiče sil, přišli také Robert Brout a Francois Englert. V jistém smyslu byli tito teoretikové podstatně blíže Higgsovu bosonu v dnešním SM než Higgs sám. Dostane-li Peter Higgs Nobelovu cenu, měl by ji dostat i Francois Englert (Robert Brout již bohužel nežije).

Jak se hledá Higgsův boson?

Higgsův boson je elektricky neutrální nestabilní částice, která se rozpadá za nepředstavitelně krátkou dobu zhruba tisícinu miliardtiny miliardtiny (10^{-21}) sekundy. Jeho existenci a vlastnosti proto můžeme prokázat jedině studiem vlastností částic, na něž se rozpadá. Higgsův boson se ve SM rozpadá pěti základními módy:

- na $\gamma\gamma$, tj. na dva fotony,
- na páry neutrálních nebo opačně nabitých nosičů slabých sil ZZ , resp. W^+W^- ,
- na pár těžkých leptonů $\tau^+\tau^-$
- a na pár kvarku b a jeho antikvarku.

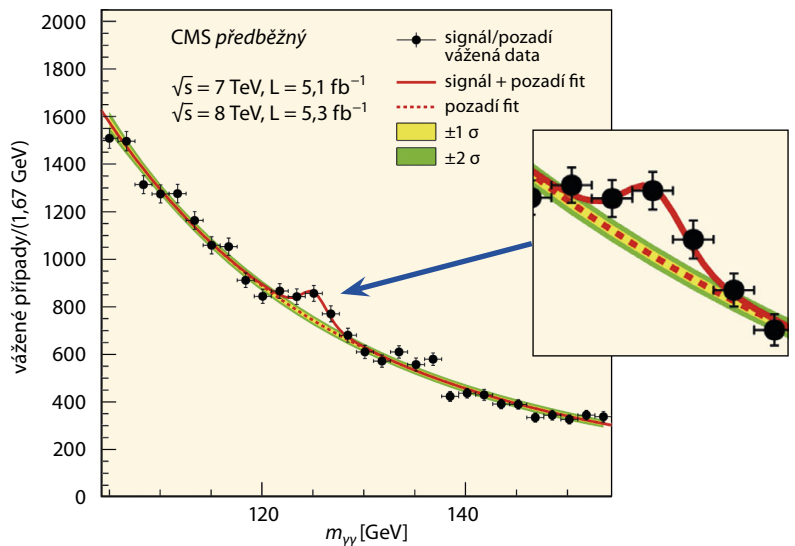
Protože 126 GeV je menší než dvojnásobek hmotnosti bosonů W a Z , musí být jeden z dvojice ZZ a W^+W^- virtuální. Protože i bosony Z a W se rozpadají (ještě asi 500krát rychleji než Higgsův boson) několika různými způsoby, je počet koncových stavů, které můžeme skutečně detegovat, značný. Svědectví o existenci bosonu s hmotností 126 GeV pochází v obou experimentech primárně z prvního módu, tj. rozpadu na dva fotony, a v menší míře i z rozpadu na ZZ , v němž se oba bosony Z dále rozpadají na páry elektron-pozitron nebo kladně a záporně nabitý mion. V dalším jen naznačím, co vlastně experimenty ATLAS a CMS v případě rozpadu na dva fotony pozorovaly.

Metoda, jak v tomto módu rozpadu hledat Higgsův boson, je v principu jednoduchá. Vezmeme každou srážku dvou protonů, při níž vznikají dva fotony, změříme jejich energie E_1 a E_2 a úhel φ mezi nimi. Omezíme se pro jistotu na vysoké energie fotonů (v případě ATLAS větší než 40 a 30 GeV) a spočteme tzv. **invariantní hmotnost** páru fotonů:

$$m_{\gamma\gamma} \equiv 4E_1E_2(1 - \cos \varphi).$$

Tuto veličinu vyneseme do histogramu a hledáme v něm pík, jenž signalizuje existenci částice s hmotností odpovídající poloze píku. Tímto způsobem se hledají částice již přes padesát let.

Experiment ATLAS zaznamenal 59 tisíc případů produkce dvou fotonů, jejichž invariantní hmotnost $m_{\gamma\gamma}$ ležela v intervalu 100–160 GeV. Rozdělení invariantní hmotnosti těchto případů je na obrázku 1, převzatém z prezentace Fabioly Gianotti, mluvčí experimentu ATLAS, na semináři v CERN 4. 7. 2012 [3]. Pík nad pozadím při hodnotě $m_{\gamma\gamma} = 126$ GeV signalizuje



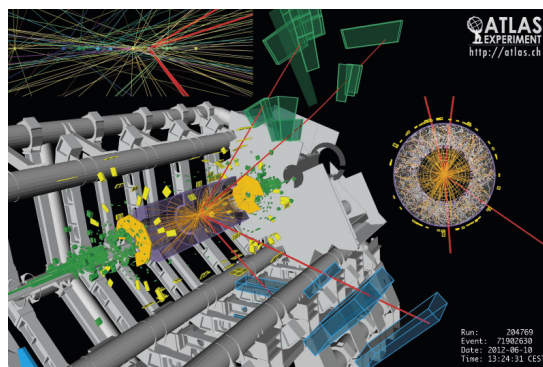
Obr. 2 Stejně rozdělení jako na obr. 1, ale v experimentu CMS. Převzato z [4].

existenci bosonu s touto hmotností. Podle standardního modelu by mělo být produkováno zhruba 500 Higgsových bosonů s hmotností 126 GeV rozpadajících se na dva fotony. Efekt pozorovaný experimentem ATLAS odpovídá 160 takovým případům, což je kompatibilní s očekáváním s ohledem na efektivitu detekce takových případů.

Na první pohled se může zdát pík při 126 GeV nevýrazný, přesto podrobnější analýza tohoto píku společně s podobným, ale méně výrazným efektem v případě rozpadu Higgsova bosonu na pár bosonů Z s jejich následným rozpadem na dva páry opačně nabitých leptonů ukazuje, že pravděpodobnost, že tyto efekty jsou důsledkem statistické fluktuace pozadí, je velmi malá, zhruba taková, jako hodit v kostkách šestku osmkrát po sobě. To by jistě nikdo za náhodu nepovažoval a hledal by příčinu ve vnitřním uspořádání kostky. Je velmi důležité, že praktický stejný efekt vidí i experiment CMS, viz obrázek 2. Právě tato shoda dvou zcela nezávislých experimentů dodává jejich výsledkům věrohodnost.

Do Vánoc bude jasno

Základní vlastnosti pozorované částice, tj. její hmotnost, spin a pravděpodobnost rozpadu na dva fotony, jsou takové, jaké očekáváme u Higgsova bosonu ve SM, ale zatím z nich jednoznačně neplyne, že to Higgsův boson skutečně je. K tomu, abychom získali jistotu, že jde o Higgsův boson, bude třeba mnohem více dat, než mají oba experimenty dosud k dispozici.



Případ zaznamenaný detektorem ATLAS v roce 2012: může se jednat o rozpad Higgsova bosonu na 4 miony, jejichž dráhy jsou znázorněny červeně. Zdroj: CERN



Profesor Peter Higgs na tiskové konferenci uspořádané po semináři „Současný stav pátrání po Higgsově bosonu na LHC“, který proběhl 4. 7. 2012 v CERN. Zdroj: CERN

Šance získat je v brzké době existuje. Urychlovač LHC totiž pracuje skvěle a téměř již dosahuje plánovaného počtu srážek za vteřinu. Množství dat, cca půl milionu miliard srážek protonů s protony, jež bylo naměřeno za sedm měsíců roku 2011 (od počátku dubna do konce října), bylo získáno za pouhé dva měsíce roku 2012. V současném stavu je urychlovač schopen dodat experimentům za každých deset týdnů stejné množství dat, jako bylo nabráno dosud. Přitom ovšem podle původního plánu měl urychlo-

vač LHC skončit se srážkami protonů s protony koncem října a dalších cca 6 týdnů dodávat srážky iontů olova. Poté má být na zhruba rok a půl jeho provoz přerušen, aby bylo možné provést netriviální technické úpravy nezbytné k tomu, aby mohla být energie každého ze svazků zvýšena z dnešních 4 TeV na plánovaných 7 TeV.

Vzhledem k zásadní důležitosti vyjasnění povahy objevené částice, tj. zda jde skutečně o Higgsův boson standardního modelu, či o jinou částici, se krátce po semináři 4. 7. 2012 rozhodlo vedení CERN prodloužit provoz urychlovače LHC v proton-protonovém módu až do konce roku 2012 a se srážkami iontů olova začít až počátkem roku 2013. Díky tomu je reálná naděje, že před přestávkou provozu LHC bude získáno nejméně dvakrát tolik dat ze srážek protonů s protony jako dosud, čímž by se počet případů produkce pozorované částice oproti současnému stavu ztrojnásobil. To by mělo na odpověď, o jakou částici jde, stačit.

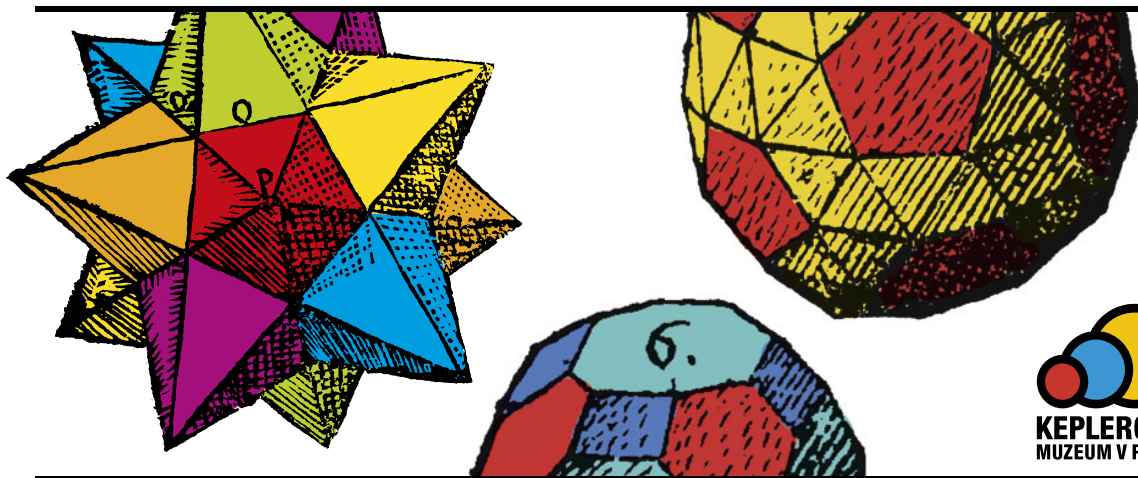
Literatura

- [1] J. Chýla: „Kvarky s barvou a vůní a co dál?“, Chem. listy **100**, 1055 (2006). http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2006_12_1055-1067.pdf
- [2] <http://www.ceskapozice.cz/magazin/scitech/k-cemu-vlastne-potrebuje-tajemny-higgsuv-boson>
- [3] F. Gianotti: <https://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=197461>
- [4] J. Incandela: <https://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=197461>

KEPLEROVO MUZEUM V PRAZE

KARLOVA 4, PRAHA 1

Otevřeno denně mimo pondělí od 10 do 18 hodin.



www.keplerovomuzeum.cz