Nobelova cena za fyziku 2013

Václav Kohout[1], Nakladatelství Fraus

Nobelovu cenu za fyziku letos získali François Englert a Peter Higgs za teoretický objev mechanismu, který přispěl k našemu pochopení původu hmotnosti subatomárních částic a který byl nedávno potvrzen objevem předpovídané fundamentální částice v experimentech ATLAS a CMS na urychlovači LHC (Large Hadron Collider) ve švýcarském CERNu. Definitivní potvrzení teorie a objev Higgsova bosonu umožnil doplnění posledního chybějícího článku do standardního modelu částicové fyziky.

Obr. 1 – Nobelova cena – líc a rub medaile

Higgsův boson na scéně

Před čtyřiceti lety, 27. července 1964, uveřejnil skotský fyzik Peter Higgs (*1929) v časopise Physics Letters krátký článek, z něhož postupně vykrystalizoval jeden z největších problémů moderní fyziky. Higgs v článku předestřel teoretický koncept mechanismu, jímž elementární částice ve standardním modelu nabývají své hmotnosti. Zprostředkující částice, která ostatním částicím „přiděluje hmotnost“, byla později, když se ukázalo, že popis tohoto mechanismu je pravděpodobně správný, nazvána Higgsův boson. Po prvním Higgsově krátkém článku následovaly ještě v létě roku 1964 další dva, které byly podrobnější. V srpnu navíc publikovali v tomtéž periodiku François Englert (*1932) a Robert Brout (1928–2011) z Univerzity v Bruselu své výpočty na základě Feynmanových diagramů. Tyto výpočty vedly v zásadě ke stejným závěrům, k jakým dospěl Higgs. Téměř o 50 let později, 4. července 2012, byl v CERNu oznámen objev nové částice s odpovídajícími parametry.

K definitivnímu potvrzení existence Higgsova bosonu došlo letos 14. března 2013. Důkaz existence této částice si vyžádal jak neobyčejné úsilí vědců, tak i obrovské materiální prostředky. Jeho objevem a následným změřením jeho vlastností však fyzika získává důležitá data pro porozumění tajemství hmoty a energie, stejně jako přírodních zákonů, které panovaly ve velmi raném vesmíru.

Obr. 2 – François Englert a Peter Higgs se setkali v CERNu, když byl světu oznámen objev Higgsova bosonu dne 4. července 2012.

1 kohout@fraus.cz

Co předcházelo

Když na konci 40. let minulého století formulovala skupina fyziků kvantovou elektrodynamiku (QED, spojující do konzistentní teorie rovnice Maxwellovy klasické teorie elektromagnetického pole s kvantovou mechanikou a speciální teorií relativity), byli fyzici nadšeni její elegancí a symetričností. Bylo sice nutné vyřešit problémy s výskytem nekonečných koeficientů, ale to se podařilo pomocí metod renormalizace a regularizace. Ty jsou klíčové při sjednocování interakcí. Co je však podstatné, nejde jen o skvostnou eleganci této teorie. Experimentátoři potvrdili, že se její předpovědi velmi přesně shodují s výsledky měření. Fyzici byli povzbuzeni tímto úspěchem a hledali další příklady, kde by jim symetrie pomohla. Již v roce 1956 vytvořil Julian Schwinger princip kalibrační symetrie pro elektromagnetickou a slabou interakci současně. Předpokládal totiž, stejně jako nestor nukleární fyziky Enrico Fermi, že obě interakce v sobě skrývají nějaký hlubší vztah, který dosud nebyl objeven. Jeho úsilí završil Sheldon Glashow, jenž na prahu 60. let minulého století formuloval teorii, která obě interakce – elektromagnetickou a slabou – spojovala do konzistentního rámce. Tato teorie ovšem počítala s třemi novými částicemi, s nosiči slabé interakce W^+ a W^- a jejich neutrálním partnerem, částicí Z^0. Glashow předpokládal, že půjde o těžké bosony, neboť slabá interakce má krátký dosah. Jejich hmotnosti ale teorie vyčíslit nedokázala. I když tedy Glashowova teorie naplňovala ideu symetričnosti, která souzní se standardním modelem částic, řada fyziků ji sice nezatracovala, ale přistupovala k ní se skepsí. Že šlo o správný krok, potvrdil přelomový experiment v laboratořích CERN, objev částic W a Z v roce 1983. Hned v následujícím roce 1984 za tento objev obdrželi Nobelovu cenu Carlo Rubbia a Simon van der Meer.

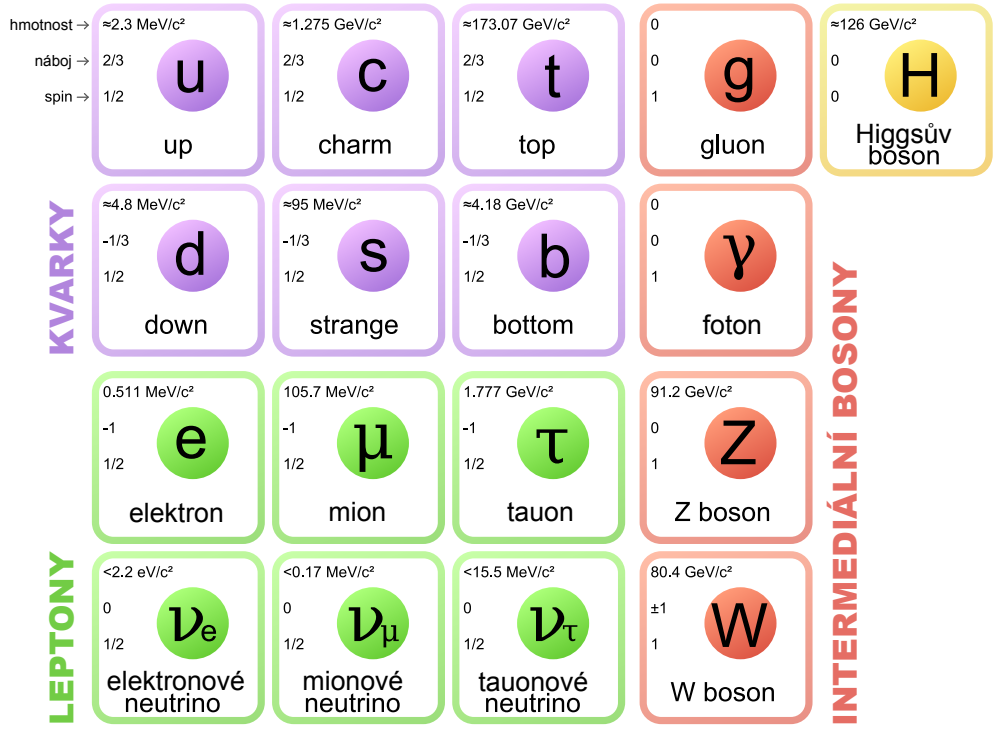
Glashowova teorie byla sice v zásadě správná, ale problémem zůstávala hmotnost částic. Později jeden z fyziků poznamenal, že si Glashow pouze neuvědomil, že symetrická teorie může vést i k nesymetrickým řešením. Částicoví fyzikové, inspirováni termodynamikou a moderními teoriemi chaosu, si totiž začali uvědomovat princip nyní označovaný jako „spontánní narušení symetrie“. Vyplývalo z něj například to, že těžké částice mohou způsobovat, že se prázdný prostor stane nesymetrickým. Peter Higgs, jenž se původně zabýval teorií silné interakce, v článku z roku 1964 navrhl zvláštní řešení, podle kterého nosiče interakce zřejmě umí tyto těžké částice pohltit, čímž samy získávají hmotnost, zatímco foton zůstává vždy nehmotný. Tato myšlenka sehrála svou roli, když dvojice fyziků, Steven Weinberg a Abdus Salam, formulovala konečnou podobu teorie elektroslabé interakce. Weinberg zde navíc jednoduchou modifikací Higgsova mechanismu dal hmotnost také např. elektronu a dalším elementárním fermionům, a tím pomohl na svět současnému standardnímu modelu. Za konzistentní teorii slabé interakce byli její autoři (Glashow, Weinberg, Salam) odměněni Nobelovou cenou v roce 1979.

Standardní model, který přinesl řád

Představa, že svět může být vysvětlen pomocí několika málo stavebních kamenů, je velmi stará. Již 400 let př. n. l. předpokládal řecký filozof Démokritos, že se vše skládá z atomů (atomos – řecky nedělitelný). Dnes však víme, že atomy nejsou nedělitelné. Skládají se z elektronů, které se vyskytují kolem atomového jádra složeného z neutronů a protonů, ty se skládají z menších částic zvaných kvarky. Podle standardního modelu jsou dále nedělitelné pouze elektrony a kvarky. Atomové jádro se skládá ze dvou druhů kvarků, up-kvarků a down-kvarků. K tomu, aby existovala veškerá hmota ve vesmíru, jsou tedy potřebné pouze tři částice – elektrony, up-kvarky a down-kvarky. Během 50. a 60. let 20. století byly v kosmickém záření a v nově postavených výkonných urychlovačích neočekávaně pozorovány další nové částice, takže standardní model musí umět popsat i exotičtější sourozence elektronů a kvarků, kterými jsou miony, tauony, jejich neutrina a odpovídající antičástice.

Kromě částic hmoty existují ještě intermediální (zprostředkující, výměnné) částice pro každou ze čtyř přírodních interakcí – gravitaci, elektromagnetickou, slabou a silnou interakci. Pro upřesnění dodejme, že graviton byl pouze předpovězen, nikoli experimentálně prokázán. Gravitace a elektromagnetické působení jsou nejznámější, jejich přitažlivé či odpudivé účinky můžeme pozorovat na vlastní oči. Silná interakce působí mezi kvarky a drží pohromadě protony a neutrony v atomovém jádře, zatímco slabá interakce je odpovědná za radioaktivní rozpad beta, který hraje nezbytnou úlohu například při jaderných procesech v nitru Slunce. Standardní model částicové fyziky spojuje

základní stavební kameny přírody a zahrnuje intermediální částice tří ze čtyř nám známých interakcí (čtvrtá částice, graviton, není součástí standardního modelu). Dlouho bylo záhadou, jak tyto interakce ve skutečnosti fungují.



Obr. 3 – Standardní model částicové fyziky, první tři sloupce obsahují částice hmoty, čtvrtý sloupec je tvořen intermediálními bosony a v pátém sloupci je Higgsův boson.

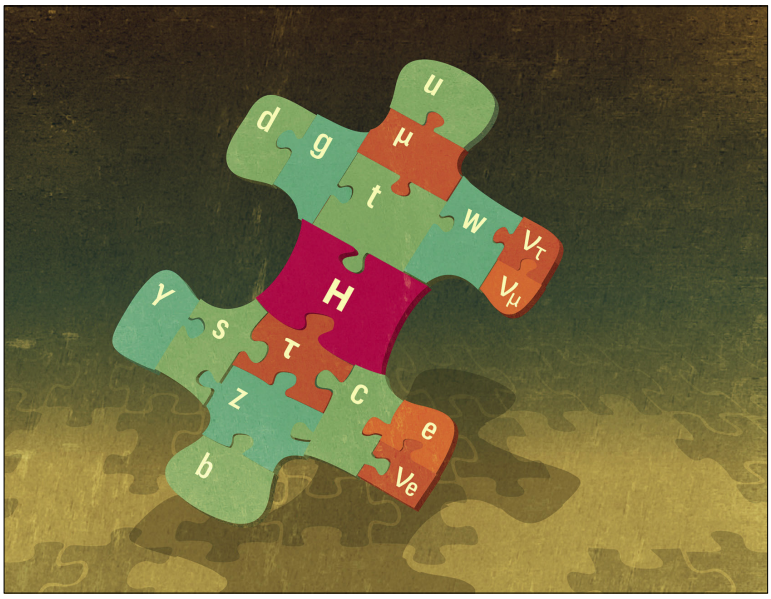
Neviditelná pole vyplňují prostor

Prostor je prostoupen mnoha neviditelnými poli. Gravitační pole, elektromagnetické pole, gluonové pole a všechna ostatní pole vyplňují prostor, nebo spíše čtyřrozměrný časoprostor, ve kterém se vše odehrává. Standardní model je kvantovou teorií pole, ve kterém jsou pole a částice základními stavebními kameny vesmíru. V kvantové fyzice je vše tvořeno souborem vibrací kvantových polí. Tyto vibrace tvoří malé „balíčky“, kvanta, která se nám jeví jako částice. Existují dva druhy pole – hmotné pole s částicemi hmoty a silové pole s intermediálními částicemi, které zprostředkovávají silové působení. Higgsův boson je také vibrací příslušného pole, často označovaného jako Higgsovo pole.

Bez tohoto pole se standardní model hroutí jako domeček z karet, protože kvantová teorie pole dává nekorigovatelné nekonečné hodnoty a nikdy nepozorované symetrie. Až poté, co Peter Higgs a François Englert s Robertem Broutem ukázali, že Higgsovo pole může narušit symetrii standardního modelu bez poškození teorie jako celku, byl model akceptován.

Co způsobuje Higgsovo pole

Dnes už nikoho nepřekvapí skutečnost, že v kvantové fyzice není ani vakuum zcela prázdné, naopak. Kvůli principu neurčitosti se hemží přechodně existujícími částicemi, jež se neustále objevují a mizí. Higgsovy bosony mají schopnost „vtisknout“ prázdnému prostoru určitou strukturu, tzv. Higgsovo pole. Lze si ho představit například jako vlny na vnitřní vrstvě desky z vlnité lepenky. Zatímco nehmotné částice se pohybují podélně, jakoby po drážkách lepenky, nosiče slabé interakce (výše zmíněné částice W a Z) „drncají“ přes hrboly, které vrásnění způsobuje. K jejich překonání potřebují energii, kterou získávají od Higgsova pole a stávají se tak těžšími. Je to poněkud



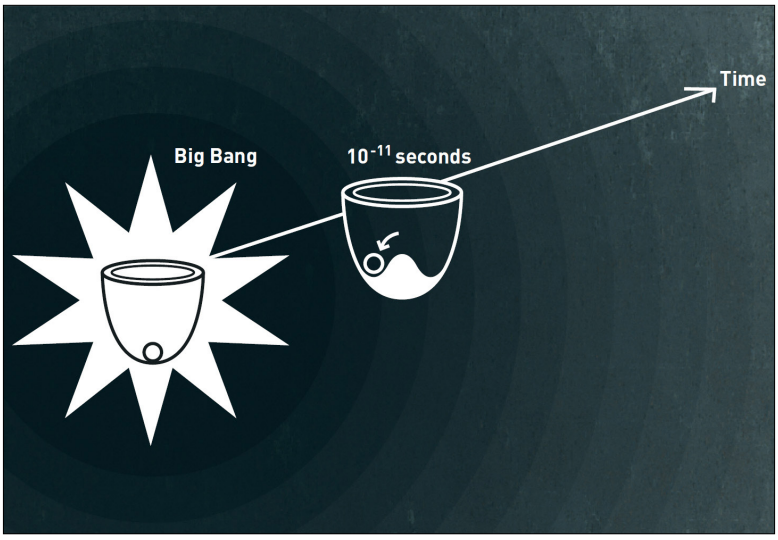
Obr. 4 – I když objev Higgsova bosonu uzavřel skládačku standardního modelu, určitě není standardní model konečnou podobou velkého kosmického puzzle.

krkolomná představa. Fyzici jsou si ale takřka jisti, že je správná. Bez Higgsova pole by totiž byly nehmotnými nejen fotony, ale i částice W a Z.

Higgsovo pole je pro nás jako vzduch, jako voda pro rybu, bez něj bychom nemohli existovat, protože částice získávají svou hmotnost pouze v kontaktu s Higgsovým polem. Částice, které neinteragují s Higgsovým polem, nezískávají hmotnost, ty, které s ním interagují slabě, jsou lehké, a ty, které interagují silně, jsou těžké. Pro vznik a existenci atomů a molekul mají klíčovou roli elektrony, které také získávají hmotnost z tohoto pole. Pokud by náhle zmizelo, veškerá hmota by zkolabovala, jak by se nehmotné elektrony naráz rozptýlily rychlostí světla.

Symetrie všude kolem nás

Higgsovo pole narušuje vnitřní symetrii světa. Příroda symetriemi oplývá, tváře jsou pravidelně tvarované, květy a sněhové vločky vykazují různé druhy geometrické symetrie. Fyzika odhaluje další druhy složitějších symetrií popisujících náš svět. Jedna taková relativně jednoduchá symetrie říká, že výsledky laboratorního experimentu nezávisí na tom, zda ho provádíme ve Stockholmu nebo v Paříži, nezáleží ani na tom, v kolik hodin experiment provádíme. Einsteinova speciální teorie relativity zabývající se symetriemi v prostoru a čase se stala vzorem pro mnoho jiných teorií i pro standardní model fyziky částic. Rovnice standardního modelu jsou symetrické, a to obdobným způsobem, jako míč, který vypadá stejně, ať se na něj díváte z jakéhokoli úhlu. Principy symetrie přinesly i další, poněkud nečekané výsledky. Již v roce 1918 německá matematička Emmy Noetherová ukázala, že zákony zachování ve fyzice, jako jsou zákony zachování energie, zachování hybnosti a zachování elektrického náboje, vyplývají také ze symetrie.



Obr. 5 – Vesmír pravděpodobně vznikl symetrický a neviditelné Higgsovo pole mělo symetrii, která odpovídá stabilní pozici koule v uprostřed kruhové mísy. Ale již 10^{-11} sekundy po Velkém třesku Higgsovo pole symetrii narušilo, když se nejnižší energetická úroveň vychýlila mimo symetrický centrální bod.

Náš vesmír pravděpodobně vznikl jako zcela symetrický. V době Velkého třesku byly všechny částice nehmotné a všechny síly byly sjednoceny do jedné prapůvodní síly. Tento původní řád již neexistuje – jeho symetrie pro nás byla skryta. Něco se stalo jen 10^{-11} sekundy po Velkém třesku. Higgsovo pole ztratilo svou původní rovnováhu. Jak se to stalo?

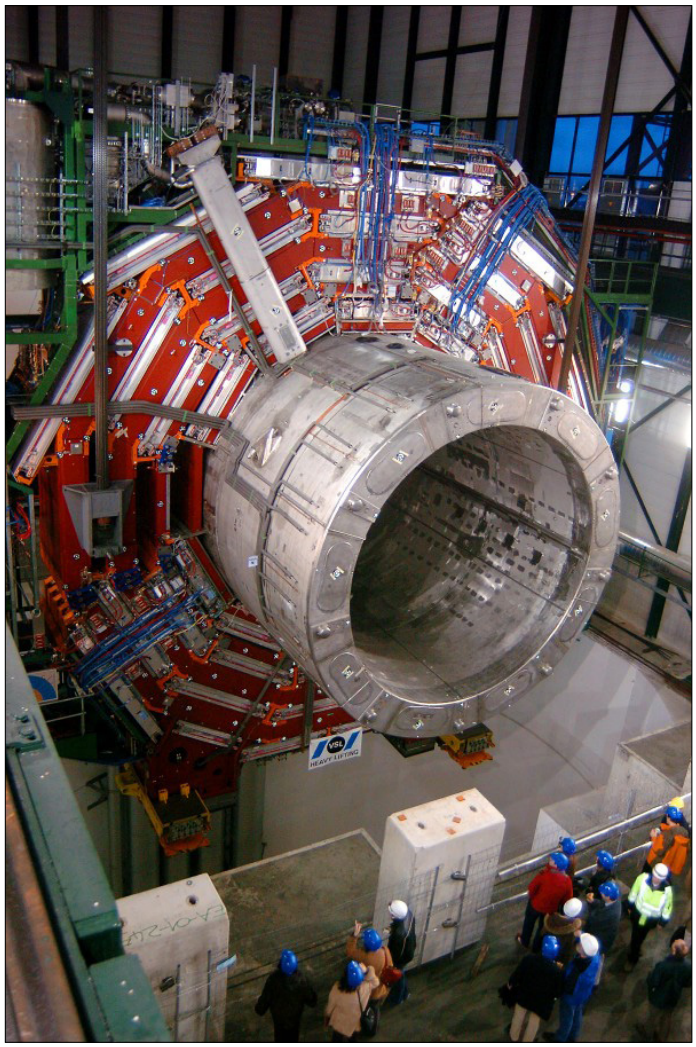
Všechno začalo symetricky. Tento stav může být popsán pomocí polohy míče ve středu kruhové misky, tj. v nejnižším energetickém stavu. Při postrčení se míč ze středu vychýlí, ale po chvíli se vrátí

dolů do nejnižšího místa. Pokud však vznikne uprostřed mísy výstupek, takže mísa nyní vypadá spíše jako mexický klobouk, bude poloha uprostřed stále symetrická, ale zároveň se stane nestabilní. Kulička se skutálí dolů v libovolném směru. Klobouk je stále symetrický, ale jakmile se míček skutálel, jeho pozice mimo střed skryje symetrii. Podobným způsobem Higgsovo pole porušuje symetrii a stabilní energetická úroveň ve vakuu se nachází mimo symetrickou nulovou polohu. Toto spontánní narušení symetrie je také popisováno jako fázový přechod v Higgsově poli, obdobně jako když voda zmrzne na led.

Hon na Higgsův boson

Zda Higgsovo pole skutečně existuje, můžeme ověřit tak, že najdeme jeho nositele, Higgsovy bosony. Z výpočtů vychází tyto částice velmi těžké, s klidovou energií nejméně 115 GeV, takže jejich experimentální zachycení vyžaduje obrovské energie. „Hon na Higgsův boson“ byl označen za prvořadý úkol experimentální fyziky prvního desetiletí 21. století.

Oba noví laureáti Nobelovy ceny za fyziku, Francois Englert a Peter Higgs, si nejspíš neuměli ani představit, že se jejich teorie potvrdí ještě za jejich života. Je za tím skryto obrovské úsilí experimentálních fyziků z celého světa. Při hledání Higgsova bosonu po dlouhou dobu soutěžily dvě laboratoře – Fermilab u Chicaga v USA a CERN na francouzsko-švýcarské hranici. Když byl v americkém Fermilabu před pár lety ukončen provoz supervýkonného urychlovače Tevatron, stal se CERN jediným místem na světě, kde pátrání po Higgsově bosonu pokračovalo.



Obr. 6 – LHC (The Large Hadron Collider) v CERN, experiment CMS

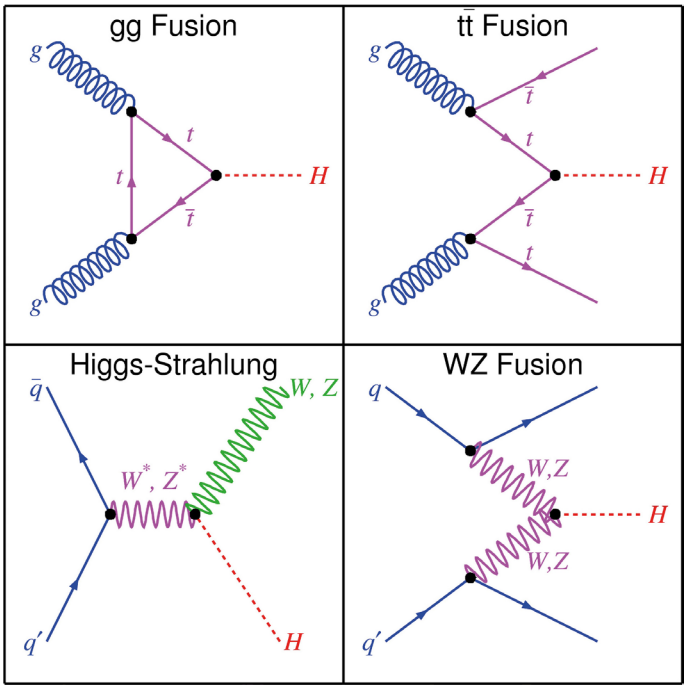
Mezinárodní organizace CERN (Conseil Européen pour la recherche nucléaire, Evropská organizace pro jaderný výzkum) byla založena v roce 1954 ve snaze znovu vybudovat moderní centrum evropské vědy a posílit vztahy mezi evropskými zeměmi po druhé světové válce. Cílem organizace je spolupráce evropských států v oblasti čistě vědeckého a základního výzkumu. Členy je v současné době dvacet států, Česká republika se účastní činnosti od roku 1993, a dalších přibližně sto národů z celého světa na projektech spolupracuje. Nejvelkolepějším dílem CERNu je urychlovač částic LHC (Large Hadron Collider). Je to pravděpodobně největší a nejsložitější stroj, který dosud lidé postavili.

Dvě výzkumné skupiny kolem 3 000 vědců se pídí po částicích s pomocí obrovských detektorů ATLAS a CMS. Detektory jsou umístěny 100 metrů pod zemí a mohou sledovat až 40 milionů srážek částic za sekundu. Tak často se částice mohou srážet, když jsou jejich svazky vyslány proti sobě do kruhového tunelu LHC dlouhého 27 kilometrů.

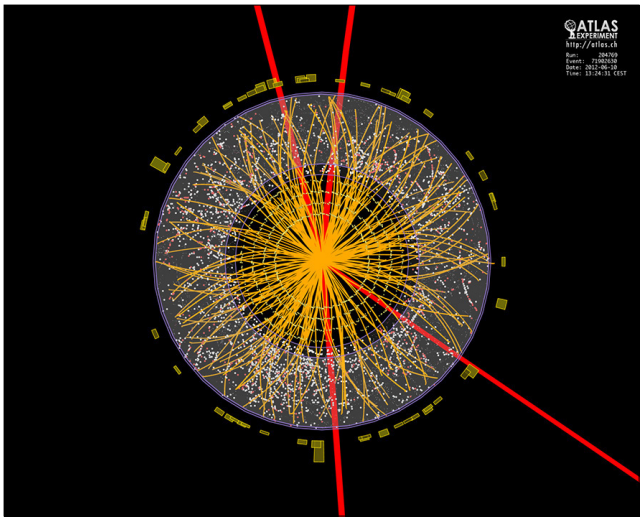
Protony jsou vstřikovány do LHC každých deset hodin, jeden svazek v každém směru. Není úplně jednoduché udržet 10^{14} protonů pohromadě a stlačit je do velice tenkého svazku, protože protony se díky svému kladnému

elektrickému náboji navzájem odpuzují. Pohybují se 99,999 99 procenty rychlosti světla a sráží se s energií přibližně 4 TeV na jeden svazek, 8 TeV v těžišťové soustavě (1 TeV = 10^{12} eV). Jeden TeV není příliš mnoho energie, víceméně odpovídá energii letícího komára, ale je-li tato energie soustředěna do jednoho protonu a tunelem urychlovače se řítí 500 biliónů těchto protonů, vyrovná se jejich energie energii vlaku v plné rychlosti. V roce 2015 bude navíc tato energie v urychlovači LHC ještě téměř zdvojnásobena.

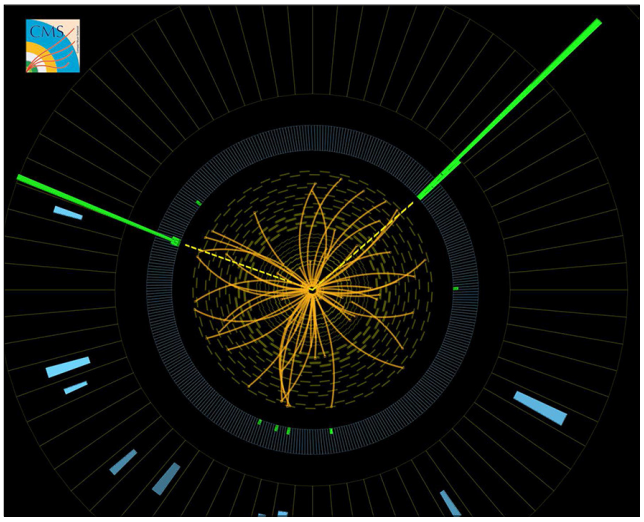
Částicové experimenty jsou někdy přirovnávány k rozbití dvojích švýcarských hodinek zároveň, s cílem zjistit, jak jsou zkonstruovány. Realita je však mnohem složitější, protože částice, které vědci hledají, jsou zcela nové, jsou vytvořeny až energií uvolněnou v průběhu srážky. Podle známého Einsteinova vzorce $E = m \cdot c^2$ je hmotnost prakticky ekvivalentní energii. To je kouzlem této rovnice, která umožňuje, aby při srážce dvou, i nehmotných částic, vznikaly nové objekty. Když se srazí dva fotony, vznikne elektron a jeho antičástice pozitron. Díky srážce dvou gluonů může vzniknout Higgsův boson. Ovšem pouze za předpokladu, že je energie srážky dostatečně vysoká. Pro popis interakcí vedoucích k Higgsovu bosonu je možné úspěšně použít Feynmannovy diagramy. Při jednom střetu dvou svazků částic dochází průměrně jen k dvaceti přímým čelním srážkám. Každá taková srážka má za následek bouřlivou explozi, při které se uvolní tisíce dalších částic. Ukázalo se, že Higgsův boson je více než stokrát těžší než proton, má hmotnost přibližně 125 GeV·c^{-2}, a to je jeden z důvodů, proč bylo tak těžké potvrdit jeho existenci. Higgsův boson navíc žije velmi krátce, asi 10^{-21} sekundy. Dnes je existence Higgsova bosonu prokázána v obou experimentech ATLAS a CMS, v každém z nich přibližně v tisícovce rozpadů na tři různé páry částic.



Obr. 7 – Feynmanovy diagramy znázorňující různé možnosti vzniku Higgsova bosonu



Obr. 8 – Pravděpodobný objev v detektoru ATLAS ukazuje stopy čtyř mionů (červeně), které byly vytvořeny rozpadem Higgsova bosonu s krátkou dobou života.



Obr. 9 – Higgsův boson mohl vzniknout a téměř okamžitě se rozpadl na dva fotony. Jejich stopy (zeleně) jsou zde vidět v detektoru CMS.

Kosmologické důsledky

Na celou problematiku Higgsova pole a Higgsova bosonu se můžeme podívat i z jiného úhlu. Objev elektroslabé interakce totiž ovlivnil i kosmologii. Astrofyzici si uvědomili, že ve velmi raném vesmíru byla doba, kdy symetrie ještě nebyla narušena a všechny interakce byly stejné. Tento stav dokonalé symetrie narušilo zřejmě právě Higgsovo pole. To sice může existovat v symetrickém stavu (bez výše popsaného obrazného vrásnění), ale jeho stav s nejnižší energií – což je stav přirozený – symetrii narušuje. V okamžiku, kdy došlo k tomuto narušení, se elektromagnetická a slabá interakce oddělily. Higgsovo pole zároveň „propůjčuje" jiným částicím jejich různé hmotnosti.

Tato představa, je-li správná, může mít dalekosáhlé důsledky. Pokud je totiž historie vesmíru pádem ze stavu dokonalé symetrie, lze se domnívat, že mnohé z toho, co dnes kolem sebe pozorujeme, je výsledkem náhody, nikoli nutnosti. To za prvé. A za druhé: Sjednocená teorie, která popíše vztahy mezi touto (ne)symetrií a dalšími silami, by zároveň identifikovala přírodní zákon nebo zákony, které vládly na počátku vzniku vesmíru. Porozumění hmotě a energii by se dostalo na novou úroveň včetně porozumění temné hmotě a temné energii, jejichž existence současnou kosmologii značně komplikuje.

Laureáti

François Englert

Narodil se v belgické židovské rodině. Aby přežil druhou světovou válku, musel tajit svůj původ. Žil v sirotčincích a dětských domovech. V roce 1955 dokončil studia na Svobodné univerzitě v Bruselu (ULB – *Université Libre de Bruxelles*) a stal se elektroinženýrem. V roce 1959 získal na této univerzitě PhD z fyziky. Poté pracoval tři roky na Cornellově univerzitě a nakonec se vrátil na ULB. V roce 1984 přesídlil na Univerzitu v Tel Avivu a od roku 2011 spolupracuje s Chapmanovou univerzitou v Kalifornii.

`http://www.ulb.ac.be/sciences/physth/people_FEnglert.html`

Peter W. Higgs

Narodil se v Elswicku v Anglii, má anglického otce a skotskou matku. Střední školu navštěvoval v období druhé světové války v Bristolu. Doktorát z fyziky získal na Královské koleji v Londýně. V roce 1954 obhájil PhD, jeho práce se týkala vibračních stavů molekul. Začal pracovat na Edinburské univerzitě (1954–1956). Poté vystřídal několik míst (Imperial College, University College v Londýně). Zabýval se zejména matematikou a kvantovou teorií. V roce 1960 se vrátil na Edinburskou univerzitu, kde strávil nejdelší období svého života.

`http://www.ph.ed.ac.uk/higgs/`

Zdroje

[1] Compiled by the Class for Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences. *Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2013, The BEH-Mechanism, Interactions with Short Range Forces and Scalar Particles.* Stockholm: The Royal Swedish Academy of Sciences, 2013. Dostupné z <http://www.kva.se/Documents/Priser/Nobel/2013/fysik/sciback_fy_131017_FINAL.pdf>

[2] Jak by vypadal svět bez Higgsova bosonu. *Science World* [online]. c2013, poslední revize 23. 9. 2013 [cit. 2013-10-17]. Dostupné z <http://www.scienceworld.cz/neziva-priroda/jak-by-vypadal-svet-bez-higgsova-bosonu/>

[3] JEŽEK David. Nobelova cena za fyziku 2013: François Englert a Peter W. Higgs za Higgsův boson. *Deep in it* [online]. c2013, poslední revize 9. 10. 2013 [cit. 2013-10-17]. Dostupné z <http://diit.cz/clanek/nobelova-cena-za-fyziku-2013-za-higgsuv-boson>

[4] KAPOUN Jan. Příběh Higgsova bosonu. *Science World* [online]. c2011, poslední revize 25. 2. 2011 [cit. 2013-10-17]. Dostupné z <http://www.scienceworld.cz/neziva-priroda/pribeh-higgsova-bosonu-2285/>

[5] KULHÁNEK Petr. Udělení Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2013. *Aldebaran Bulletin* [online]. c2013, [cit. 2013-11-13]. Dostupné z <http://www.aldebaran.cz/bulletin/2013_32_char.php>

[6] Nobelova cena za Higgsův boson. *Science World* [online]. c2013, poslední revize 8. 10. 2013 [cit. 2013-10-17]. Dostupné z <http://www.scienceworld.cz/aktuality/nobelova-cena-za-higgsuv-boson/>

[7] Nobelova cena za fyziku 2013 - Peter W. Higgs a Francoise Englert. *Oborová brána Technika (TECH)* [online]. c2013, [cit. 2013-10-17]. Dostupné z <http://tech.jib.cz/novinky-a-akce/nobelova-cena-za-fyziku--2013-peter-w.-higgs-a-francoise-englert>

[8] RAMEŠ Jiří. *Nobelova cena za fyziku 2013* [online]. Praha: Fyzikální ústav Akademie věd ČR, 2013. [cit. 2013-10-17]. Dostupné z <http http://www.fzu.cz/novinky/nobelova-cena-za-fyziku-2013>

[9] ROSE Joanna. *The Nobel Prize in Physics 2013, Popular Science Background.* Stockholm: The Royal Swedish Academy of Sciences, 2013. Dostupné z <http://www.kva.se/Documents/Priser/Nobel/2013/fysik/pop_fy_en_13.pdf>

Zdroje obrázků

[1] http://www.converter.cz/nobel/

[2] http://www.tagesschau.de/multimedia/bilder/higgs-englert100~_v-videowebl.jpg

[3] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg

[4] http://www.kva.se/Documents/Priser/Nobel/2013/fysik/pop_fy_en_13.pdf

[5] http://www.kva.se/Documents/Priser/Nobel/2013/fysik/pop_fy_en_13.pdf

[6] http://www.lhc.ac.uk/resources/image/jpg/hi003694370.jpg

[7] http://www-zeus.physik.uni-bonn.de/~brock/feynman/vtp_ws0506/chapter09/higgs_feyn_pp.jpg

[8] http://cds.cern.ch/record/1459496

[9] http://cds.cern.ch/record/145945

[10] http://www.ulb.ac.be/sciences/physth/pics/englert_cern.jpg

[11] http://www.independent.co.uk/incoming/article7912730.ece/ALTERNATES/w620/pg-2-higgs-profile-getty.jpg