

HIGGSOV BOZON

TOMAŽ PODOBNIK

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani
Institut »Jožef Stefan«

PACS: 12.15.-y, 14.80.Bn

Standardni model elektrošibke in močne interakcije je trenutno veljavna fizikalna teorija mikroskopskega sveta. V okviru modela imajo posredniki šibke interakcije (sile) – delci W^+ , W^- in Z^0 – maso zaradi spontanega zloma simetrije. Mehanizem spontanega zloma lahko ponazorimo s preprostimi prisposodobami iz makroskopskega sveta. Poleg tega, da mehanizem razloži maso posrednikov šibke sile, napoveduje tudi obstoj dodatnega delca – Higgsovega bozona. Delec z lastnostmi, ki se dobro ujemajo z napovedanimi lastnostmi Higgsovega bozona, sta leta 2012 neodvisno odkrili mednarodni skupini ATLAS in CMS v Evropski organizaciji za jedrske raziskave CERN, s čimer sta potrdili hipotezo o spontanem zlomu simetrije kot izvoru mase. Dva izmed avtorjev hipoteze, François Englert in Peter Higgs, sta lani prejela Nobelovo nagrado za fiziko.

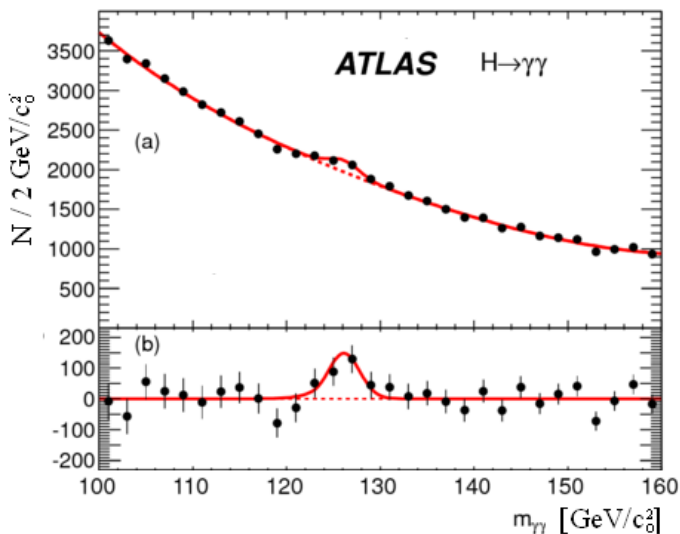
THE HIGGS BOSON

The Standard Model is a theory of the electroweak and strong interactions, mediating the dynamics of the known subatomic particles. According to the Model, the mediators W^+ , W^- , and Z^0 of the weak interactions gain mass by the mechanism of spontaneous symmetry breaking – by interaction with the Higgs field. The mechanism can be illustrated by simple allegories. Apart from explaining the mass of $W^\pm$ and Z^0 , the hypothesis of spontaneous symmetry breaking predicts existence of a condensate of the Higgs field, the so-called Higgs boson. In 2012, the ATLAS and CMS experiments at the Large Hadron Collider at the European Organization for Nuclear Research CERN reported independently that they found a new particle with properties as expected for the Higgs boson. This is a strong evidence for the hypothesis of spontaneous symmetry breaking, and two of its authors, François Englert and Peter Higgs, were awarded the Nobel Prize in Physics for 2013.

Koncept mase v fiziki osnovnih delcev

V skladu z drugim Newtonovim zakonom je pospešek telesa premo sorazmerno s silo na telo. Sorazmernostni koeficient med obema količinama je masa telesa, ki je mera za vztrajnost: ob enakih silah na dve telesi je pospešek telesa z večjo maso manjši od pospeška telesa z manjšo maso.

Če hočemo določiti maso telesa iz kvocienta sile na telo in iz pospeška telesa, moramo torej izmeriti pospešek in poznati silo. Magnetna sila na telo je na primer odvisna od električnega naboja telesa, od njegove hitrosti in od gostote magnetnega polja, medtem ko pospešek telesa določimo iz ukrivljenosti njegovega tira.



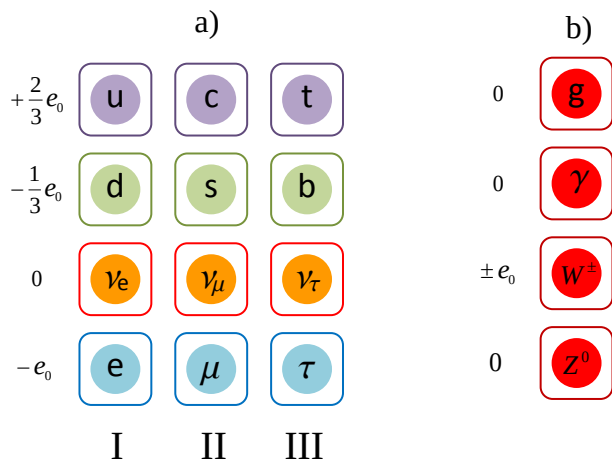
Slika 1. Porazdelitev zaznanih fotonskih parov po invariantni masi $m_{\gamma\gamma}$ [1]. a) Pike s črticami, ki označujejo pričakovane statistične fluktuacije, prikazujejo izmerjeno porazdelitev, polna gladka krivulja prikazuje pričakovano porazdelitev, črtkana krivulja pa pričakovano porazdelitev brez prispevka razpadov Higgsovega bozona v dva fotona (ozadja). b) Izmerjena in pričakovana porazdelitev z odštetim ozadjem. Masa Higgsovega bozona približno sovпада z vrhom porazdelitve.

Tako lahko določimo maso protonov (vodikovih jeder) in elektronov, za nevtralne ali za kratkožive delce pa metoda odpove. Njihovo maso m določimo npr. iz energije E , ki se sprosti pri njihovem razpadu,

$$m = \frac{E}{c_0^2}, \quad (1)$$

pri čemer je c_0 hitrost svetlobe v vakuumu. Slika 1a) prikazuje porazdelitev parov fotonov (paketov elektromagnetnega valovanja) po invariantni masi $m_{\gamma\gamma} = E_{\gamma\gamma}/c_0^2$ [1], pri čemer je $E_{\gamma\gamma}$ skupna energija fotonskega para v njegovem težiščnem sistemu. Enota GeV/c_0^2 približno ustreza masi $0,938 \text{ GeV}/c_0^2$ vodikovega atoma. Na območju mas okoli $125 \text{ GeV}/c_0^2$ je izmerjeno število razpadov večje od pričakovanega, kar je mogoče razložiti s tvorbo Higgsovih delcev in njihovimi razpadi v dva fotona. Slika 1b) prikazuje razliko med izmerjeno in pričakovano porazdelitvijo brez tvorbe Higgsovih delcev (ozadjem). Položaj vrha te porazdelitve določa maso $m_H \simeq 126,5 \text{ GeV}/c_0^2$ Higgsovega delca, širina vrha pa je posledica omejene natančnosti pri rekonstrukciji energije $E_{\gamma\gamma}$ (prispevek k širini porazdelitve zaradi kratkega razpadnega časa Higgsovih delcev je v danem primeru zanemarljiv).

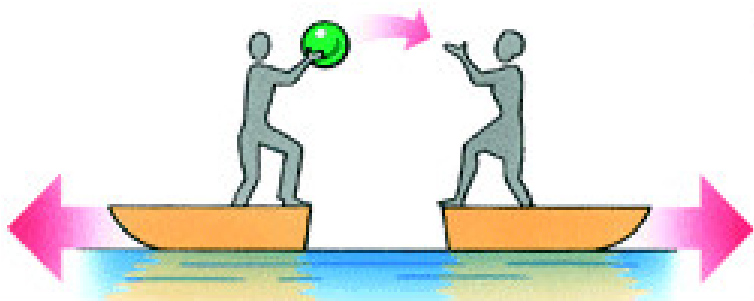
Kvantna teorija polja – teorija motnje



Slika 2. Standardni model osnovnih delcev in interakcij. a) Tri generacije osnovnih delcev (I, II in III). V vsaki generaciji je kvark z električnim nabojem $+2e_0/3$, kvark z nabojem $-e_0/3$, lepton z nabojem $-e_0$ in nevtralni lepton (nevtrino), pri čemer je e_0 osnovni naboj $1,6 \cdot 10^{-19}$ As. Za vsak kvark in lepton obstaja še ustrezeni antidelec. b) Posredniki močne, elektromagnetne in šibke sile (interakcije): 8 gluonov g , foton γ in šibki bozoni W^+ , W^- in Z^0 . Standardni model ne vključuje gravitacije.

Osnovni gradniki snovi so kvarki in leptoni (slika 2a): atome sestavljajo elektroni (leptoni e^-) in jedra iz protonov in nevtronov – vezanih stanj kvarkov u in d . V okviru kvantne teorije polja so sile posledica izmenjave posrednikov sil (slika 2b). To lahko ponazorimo s človekoma na čolnih (slika 3), ki na začetku mirujeta. Potem ko eden izmed njiju, ki v rokah drži težko žogo, to žogo vrže proti drugemu in jo drugi ujame, se čolna gibljeta vsaksebi. Sklepamo, da je med čolnoma delovala odbojna sila. Privlačno silo lahko ponazorimo z izmenjavo bumerangov namesto žog.

Enkratno izmenjavo žoge (slika 4a) imenujemo osnovni red delovanja sile. V višjih redih – pri večkratni izmenjavi žoge (slika 4b) – je učinek (sunek) sile sicer večji, vendar je večkratna izmenjava žog manj verjetna: v povprečju prispevek vsakega naslednjega reda k spremembi hitrosti (gibalne količine) čolnov pomeni le manjšo motnjo v primerjavi s prispevkom predhodnega reda. Delovanje sile med čolnoma lahko opišemo s teorijo motnje, če vsota prispevkov posameznih redov konvergira in je izračunana sprememba gibalne količine posameznega čolna zelo natančna že, če upoštevamo le nekaj najnižjih redov.



Slika 3. Čolna, ki na začetku mirujeta, se po izmenjavi žoge gibljeta vsaksebi.

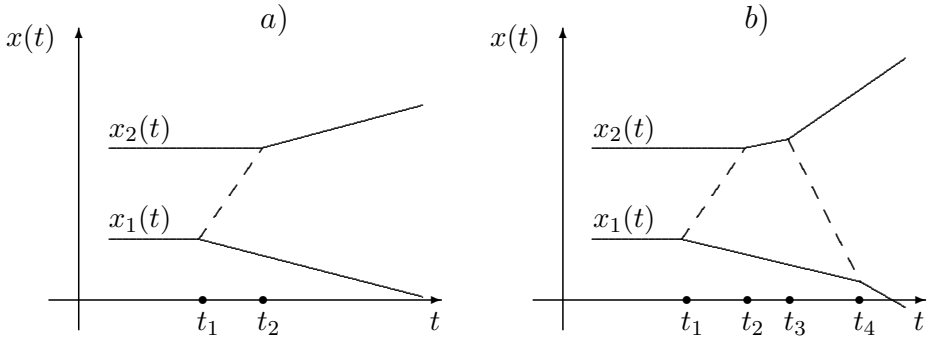
Sila med nevtrinom ν_e , ki je priletel v detektor Super-Kamiokande, in mirujočim elektronom e^- v vodi je tako posledica izmenjave posrednikov šibke sile Z^0 in $W^\pm$: vpadni nevtrino na primer izseva Z^0 , ki ga elektron absorbira, zato se mu spremeni hitrost. Če je hitrost elektrona po trku večja od hitrosti svetlobe v vodi, elektron seva svetlobo Čerenkova, ki jo zaznajo fotopomnoževalke na steni detektorja (slika 5).

Masa posrednikov šibke sile in mehanizem Brouta, Englerta in Higgsa (BEH)

V primerjavi z brezmasnimi fotoni – posredniki elektromagnetne sile – so posredniki šibke sile masivni, $m_{W^\pm} \simeq 80 \text{ GeV}/c_0^2$ in $m_{Z^0} \simeq 91 \text{ GeV}/c_0^2$. Najenostavnejša teorija šibke interakcije, ki vključuje masivne $W^\pm$ in Z^0 , je model Glashowa [2, str. 257], ki se v osnovnem redu (pri enkratni izmenjavi posrednikov sile) zelo dobro sklada z rezultati meritev številnih procesov. Na žalost pa v omenjenem modelu delovanja šibke sile ni mogoče opisati s teorijo motnje: vsota prispevkov k posameznemu procesu, ki vključujejo večkratno izmenjavo posrednikov sile, ne konvergira, razlog za to pa tiči prav v masi $W^\pm$ in Z^0 [2, str. 258].

Leta 1964 sta François Englert in Robert Brout razvila mehanizem za tvorbo mase $W^\pm$ in Z^0 [3], s katerim je mogoče dopolniti model Glashowa tako, da omogoča opis šibke sile s teorijo motnje. Neodvisno je istega leta Peter Higgs pokazal [4], da je tak mehanizem neločljivo povezan z obstojem masivnega nevtralnega delca. Mehanizem napoveduje relativno pogostost posameznih razpadnih načinov Higgsovega delca, ne napoveduje pa njegove mase, ki je prost parameter teorije.

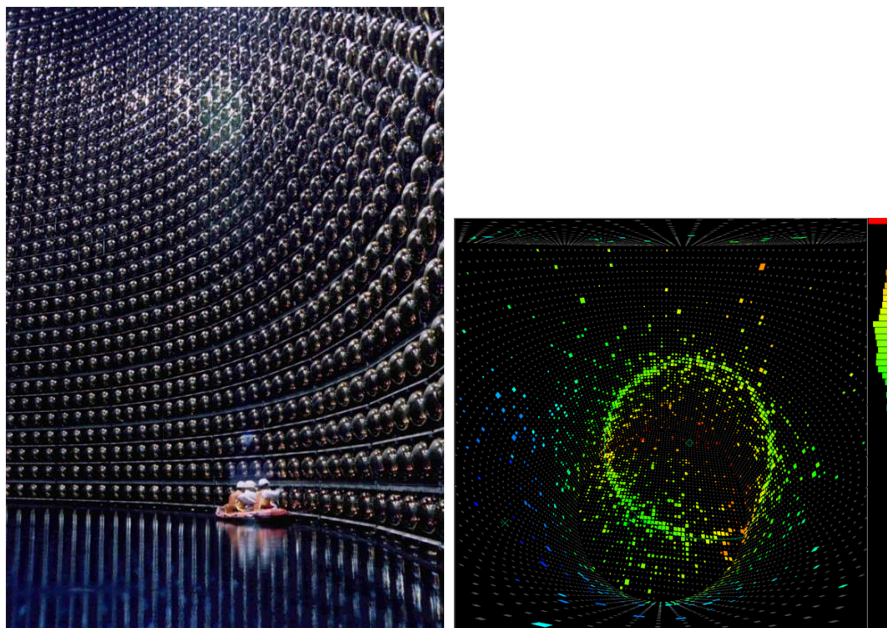
Ideje mehanizma so matematične narave: povezane so s simetrijo (invarianco) izraza za gostoto energije glede na rotacije v abstraktnem prostoru šibkega izospina. V bolj vsakdanjem jeziku je pglavitna ideja mehanizma ta, da brezmasni $W^\pm$ in Z^0 postanejo masivni zaradi sklopitve z dodatnim



Slika 4. Položaj prvega in drugega čolna, x_1 in x_2 , v odvisnosti od časa. a) Oba čolna na začetku mirujeta. Ob času t_1 človek na prvem (levem) čolnu vrže v smeri proti drugemu čolnu težko žogo, pri čemer se sam, skupaj s čolnom, začne premikati v nasprotni smeri. Let žoge ponazarja črtkana črta. Ob času t_2 človek na drugem čolnu ujame žogo in se skupaj s svojim čolnom začne gibati v smeri leta žoge. b) Enako kot v primeru a), le da ob času t_3 človek iz drugega čolna vrže žogo nazaj proti prvemu čolnu, kamor prileti ob času t_4 .

(Higgsovim) poljem. Za zelo preprosto ponazoritev mehanizma potrebujemo plastenko s pokrovčkom, v katerega zvrtno luknjico. V plastenko nalijemo za nekaj prstov vode, prižgemo vžigalico, na sredini stisnemo plastenko, da se nekoliko deformira, pristavimo plamen k njenemu ustju in jo spustimo, da deformacija izgine, pri čemer v plastenko posrka nekaj saj (prašnih delcev) plamena. Privijemo pokrovček in skozi luknjico vpihnemo v plastenko nekaj zraka, da je tlak v njeni notranjosti večji od okoliškega. S prstom pokrijemo luknjico tako, da ohranimo nadtlak, in pretrasemo plastenko, da postane zrak v njej nasičeno vlažen. Ko sedaj odmaknemo prst z luknjice na pokrovu, v plastenki nastane megla: zaradi prvotnega nadtlaka nekaj zraka uide iz plastenke, ob razpenjanju se zniža temperatura preostalega zraka v notranjosti, ki tako postane prenasičeno vlažen, zato del vodne pare kondenzira okoli prašnih delcev. Kapljice, ki pri tem nastanejo, imajo dosti večjo maso od kondenzacijskih jeder.

V opisanem poskusu so vodne pare v plastenki pred nastankom megle prispodoba za Higgsovo polje, razpenjanje in ohlajanje zraka je prispodoba za razpenjanje in ohlajanje vesolja v prvih trenutkih po velikem puku, lahki in drobni prašni delci so prispodoba za brezmasne fotone, kapljice okoli kondenzacijskih jeder pa za masivne W^+ , W^- in Z^0 . Opisani mehanizem zlomi simetrijo: v nasprotju z posredniki šibke sile se fotoni ne sklapljajo s Higgsovim poljem in ostanejo brezmasni.



Slika 5. Levo: detektor Super-Kamiokande med polnjenjem z vodo. Steklena steno detektorja tvorijo okna fotopomnoževalk (detektorjev svetlobe). Desno: svetloba Čerenkova v obliki obroča. Razmazanost vzorca je posledica trkov sevaljočega elektrona z drugimi elektroni in jedri v vodi.

Pri tem ne smemo pozabiti, da je še tako nazorna prispodoba za fizikalno teorijo le prispodoba in zato ne more v celoti zaobjeti ideje, zapisane v matematičnem jeziku enačb. Posebnost Higgsovega polja je v tem, da omogoča nastanek Higgsovih delcev – kondenzatov polja (kapljic) brez kondenzacijskih jeder. Higgsov delec je električno nevtralen in brez lastne vrtilne količine (bozon): v prispodobi si ga lahko predstavljamo kot kroglico, ki se ne vrti okoli svoje osi. Podobno kot izhlapijo kapljice megle v plastenki, Higgsovi delci v času 10^{-22} s razpadejo v kvarke, leptone in posrednike sil.

Od napovedi Higgsovega bozona do njegovega odkritja je minilo 48 let

Mednarodni skupini ATLAS in CMS sta leta 2012 odkrili nov nevtralni delec [1, 5] s približno 2,5-kratno maso železovega atoma in z lastnostmi, ki se skladajo z napovedanimi lastnostmi Higgsovega bozona (slika 1). Odkritje podpira hipotezo o izvoru mase s spontanim zlomom simetrije, zato sta François Englert in Peter Higgs leta 2013 prejela Nobelovo nagrado za fiziko (Robert Brout je umrl leta 2011).



Slika 6. Odsek tunela s trkalnikom LHC. V notranjosti valjastih magnetov sta dve vakuumizirani cevi, po katerih v nasprotnih smereh krožijo protoni. Magnete od zunaj hladijo s tekočim helijem, hladilni sistem pa obdaja še izolacija (evakuiran sloj), ki preprečuje pritekanje toplote iz okolice.

Od napovedi Higgsovega bozona do podelitve nagrade za napoved je minilo 49 let, kar je drugo najdaljše obdobje za Nobelove nagrade za fiziko: več – 53 let – je minilo le od odkritja elektronskega mikroskopa Ernsta Ruske leta 1933 do podelitve nagrade leta 1986. Razlog za tako dolgo čakanje na nagrado je v čakanju na potrditev obstoja Higgsovega delca, razlog za čakanje na eksperimentalno potrditev pa je v zahtevnosti eksperimenta.

Higgsovih delcev, ki so nastali tik po velikem poku, že zdavnaj ni več, zato so jih morali ustvariti umetno. Ustvarili so jih s trki protonov v velikem hadronskem trkalniku LHC v Evropski organizaciji za jedrske raziskave CERN pri Ženevi. Projekt LHC je verjetno največji dosedanja znanstveni eksperiment. Od ideje do začetka delovanja trkalnika in detektorjev je poteklo več kot 20 let, pri projektu pa je sodelovalo in še sodeluje več kot 6000 znanstvenikov, tudi Slovencev. Za potrditev obstoja Higgsovega bozona je bilo treba 3 leta meriti in analizirati zabeležene trke.

Pred vstopom v LHC gruče protonov pospešijo v več stopnjah. V LHC, v katerem polovica gruč kroži v smeri urinega kazalca, druga polovica pa v nasprotni smeri, protone pospešijo do končne energije okoli 4000 GeV (4 TeV). Obroč trkalnika ima obseg okoli 27 km in poteka v tunelu okoli 100 m pod zemeljskim površjem. Tire protonov v obroču krivijo posebej oblikovani superprevodni magneti z gostoto magnetnega polja 4 T (slika 6). Načrtovanje, konstrukcija in preverjanje delovanja magnetov ter stabilno delovanje celo-

tnega sistema tvorijo velikanski tehnološki zalogaj. Med delovanjem trkalnika je temperatura magnetov okoli $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$ in že napaka v enem samem magnetu (od okoli 1600) ali v stiku med sosednjima magnetoma lahko ogrozi celoten projekt, vreden okoli 8 milijard švicarskih frankov.

Poti nasprotno krožečih gruč protonov se na štirih mestih križajo in del kinetične energije trkajočih protonov se lahko porabi za tvorbo novih delcev – v povprečju enkrat na vsakih 100 milijard trkov tudi za tvorbo Higgsovega bozona. Najprej je torej treba zagotoviti dovolj veliko število trkov: na vsakem izmed štirih mest se poti dveh gruč križata vsakih 25 ns in pri vsakem križanju pride hkrati tudi do 20 in več protonskih trkov (slika na naslovnici). Delci, ki pri trkih nastanejo, pustijo sledi v obliki električnih signalov v detektorjih, ki obdajajo območja križanja gruč (interakcijske točke). Prožilni sistem poskrbi, da se na računalniške diske zapišejo le signali trkov, pri katerih bi utegnil nastati Higgsov ali kakšen drug zanimiv delec. Iz zapisanih signalov nato rekonstruirajo tire posameznih delcev v detektorju (Higgsov delec, ki nastane pri trku dveh protonov, skoraj takoj spet razpade, detektor zazna le njegove razpadne produkte, na primer štiri visokoenergijske mione; slika na naslovnici).

Kljub filtriranju je delež trkov, pri katerih je v resnici nastal Higgsov bozon, med vsemi zapisanimi trki še vedno zelo majhen, količina vseh zapisanih podatkov pa tolikšna, da jih z računalniki, ki so bili na voljo pred dvajsetimi leti, ne bi mogli ne rekonstruirati ne ustrezno analizirati. Rekonstrukcija in analiza podatkov danes temelji na distribuiranem računalništvu (računalništvu v oblaku), pri katerem so tako diski s podatki kot procesorji porazdeljeni v več središčih po vsem svetu, med drugim tudi na Institutu »Jožef Stefan« v Ljubljani.

Iskanje razpadov Higgsovega bozona v rekonstruiranih podatkih spominja na iskanje igle v kopici sena. Najprej je treba izbrati razpadne načine bozona (igle), kakršna sta na primer omenjena razpada v dva fotona ali v štiri mione, z največjim pričakovanim razmerjem med signalom in ozadjem (med številom igel in velikostjo kopice sena). Za izbrane razpade je učinkovitost ločevanja signala od ozadja povezana z natančnostjo izmerjenih lastnosti razpadnih produktov. Za zaznavo Higgsovega bozona med vsemi trki, pri katerih sta na primer nastala dva visokoenergijska foton, je ključen detektor za merjenje energije fotonov (elektromagnetni kalorimeter), s katerim lahko poleg energije fotonov določimo tudi točko njunega izvora (razpada bozona). Od natančnosti meritve omenjenih količin je namreč odvisna širina vrha izmerjene porazdelitve fotonovskih parov po njihovi invariantni masi (slika 1) in čim širši je vrh – signal za obstoj Higgsovega bozona, tem težje ga opazimo. Drugi razpadni načini so povezani s številnimi dodatnimi zahtevami, ki jih je bilo treba upoštevati in medsebojno uskladiti pri načrtovanju in izdelavi detektorjev. Večji izmed obeh detektorjev, ATLAS [6], je tako sestavljen iz več plasti (detektorskih komponent), ki obdajajo

interakcijsko točko in skupaj tvorijo valj osnovne ploskve premera 25 m in dolžine 46 m. Konstrukcija marsikatero komponente in pripadajoče elektronike, na primer omenjenih elektromagnetnih kalorimetrov, je zahtevala sprotni razvoj do tedaj neobstoječe tehnologije.

Veliko odkritje

Potrditve obstoja Higgsovega delca je veliko odkritje. Kaže na to, da si je narava izbrala mehanizem za tvorbo mase posrednikov šibke sile (mehanizem BEH), ki omogoča opis delovanja šibke sile v okviru teorije motnje. Eksperimentu, ki je pripeljal do odkritja, bi težko našli primerjavo v celotni znanstveni zgodovini. Poleg že omenjenih znanstvenih in tehnoloških ovir je bilo na poti do odkritja treba premagati tudi politične in sociološke ovire. Politične, ker je bilo treba prepričati države članice CERN-a in drugih sodelujočih institucij, da so ves čas načrtovanja, konstrukcije in meritev sproti potrpežljivo financirale projekt (vlada ZDA pri financiranju projekta superprevodnega supertrkalnika SSC, konkurenčnega projektu LHC, ni imela takega potrpljenja). Sociološkega, ker je bilo za obdobje 30 let, kar je večina človekove delovne dobe, treba prepričati več tisoč znanstvenikov, da so bili po svojih najboljših močeh pripravljeni sodelovati in prispevati vse svoje sposobnosti za en sam cilj.

Res zanimivo, da tako majhen delec, kot je Higgsov bozon, lahko privlači tolikšno pozornost.

LITERATURA

- [1] ATLAS Collaboration, *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, Phys. Lett., **B716** (2012) 1–29.
- [2] F. Mandl in G. Shaw, *Quantum Field Theory*, John Wiley & Sons, 1993.
- [3] F. Englert in R. Brout, *Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons* Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 321–323.
- [4] P. W. Higgs, *Broken symmetries, massless particles and gauge fields*, Phys. Lett. **12** (1964) 132–133.
- [5] CMS Collaboration, *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, Phys. Lett. **B716** (2012) 30–61.
- [6] ATLAS Collaboration, *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, JINST **3** (2008) p. S08003.

<http://www.dmfa-zaloznistvo.si/>