

Strle, F., 1999: *Lyme boreliosis*. *Zentralbl. Bacteriol.*, 286: 643-652.

Strle, F., 2000: *Patogeneza lymške borelioze*. *Klinični vidiki*. V: *Lymška boreliozia 2000. 2. slovensko posvetovanje o lymški boreliozii*. Ljubljana: Društvo za lymško boreliozo. 47-50.

Tomažič, J., Pikelj, F., Schwartz, B., in sod., 1996: *The Clinical Features of Tick-Borne Encephalitis in Slovenia*. *Antibiotica Monitor*, 12: 115-120.

Urlep, F., Lešničar, J., Jung, M., Krech, U., 1975: *Serološka preučitev akutnih febrilnih obolenj domnevne virusne etiologije v občini Mozirje poleti 1975*. *Zdravniški vestnik*, 1977, 46: 9-12.

Wormser, G. P., Dattwyler, R. J., Shapito, E. D., Halperin, J. J., Steere, A. C., Klempner, M. S., in sod., 2006: *The clinical assesment, treatment, and prevention of Lyme disease, human granulocytic anaplasmosis and babesiosis: clinical practice guidelines by the Infectious Diseases society of America*. *Clinical Infectious Diseases*, 43: 1089-1134.

Fizika • *Lov na Higgsov bozon*

Lov na Higgsov bozon

Janez Strnad

Iz ženevskega CERN-a je 4. julija prišla vest, da sta raziskovalni skupini, ki sta neodvisno druga od druge merili ob Velikem hadronskem trkalniku (LHC), zaznali nov delec. Za zdaj kaže, da ima delec lastnosti, kakršne pričakujejo od Higgsovega bozona. Nadaljnja raziskovanja bodo pričakovanje podprla ali ovrgla. Pozornost, ki jo je vest vzbudila, je razumljiva. Odkritje Higgsovega bozona bi overilo zadnjo napoved standardnega modela in povečalo zaupanje vanj.

Standardni model delcev so oblikovali v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. Napoved, da obstaja Higgsov bozon, ni dosti mlajša. Nastala je v okviru *elektrošibke teo-*

rije, ki je hkrati zajela elektromagnetno in šibko *interakcijo*. Teorijo sta predlagala leta 1967 neodvisno drug od drugega Steven Weinberg in Abdus Salam na podlagi dela Sheldona Glashowa iz leta 1961. Vsi trije so dobili Nobelovo nagrado leta 1979. V svetu teles elektromagnetna sila, ki na primer poganja elektromotorje, deluje na velikih razdaljah v primerjavi z razdaljami v svetu delcev. Ima *velik doseg*. Šibka sila povzroča radioaktivni razpad β atomskih jeder in nekaterih delcev in je veliko šibkejša od elektromagnetne. V svetu teles je neposredno ne zaznamo, ker sega le do zelo majhnih razdalj. Ima *kratek doseg*.

Delce snovi je mogoče razvrstiti na tri sorodne rodove. Vsak od njih vsebuje po dva *leptona*, »lahka« delca, in dva *kvarka*. V prvem rodu sta leptona elektron e^- in elektronski nevtrino ν_e ter kvarka u in d, v drugem leptona mion μ^- in mionski nevtrino ν_μ ter kvarka s in c ter v tretjem leptona τ^- in njegov nevtrino ν_τ ter kvarka b in t. Trije kvarki prvega rodu sestavljajo proton (u, u, d) in nevtron (u, d, d), protoni in nevtroni sestavljajo atomska jedra, atomska jedra in elektroni sestavljajo atome. Delci obeh drugih rodov so bolj nenavadni in razen nevtrinov in vezanih kvarkov razpadejo po kratkem času. Obstajajo antidelci delcev snovi z enako maso, a električnim nabojem nasprotnega znaka. Delci snovi »se vrtijo« in imajo *spin* $\frac{1}{2}$. Zanje velja *Paulijevo izključitveno načelo*. Niti dva delca snovi iste vrste ne

moreta biti v danem stanju. Delci snovi so *fermioni*. Delci polja imajo spin 1 in zanje ne velja izključitveno načelo. Več delcev polja iste vrste lahko zasede dano stanje. Delci polja so *bozoni*.

Delci snovi

Rod	Leptoni		Kvarki	
1.	elektron e^-	elektronski nevtrino ν_e	d	u
2.	mion μ^-	mionski nevtrino ν_μ	s	c
3.	tauon τ^-	tauonski nevtrino ν_τ	b	d

Standardni model zajame delce snovi, ki so fermioni s spinom $\frac{1}{2}$, in delce polja, ki so bozoni s spinom 1.

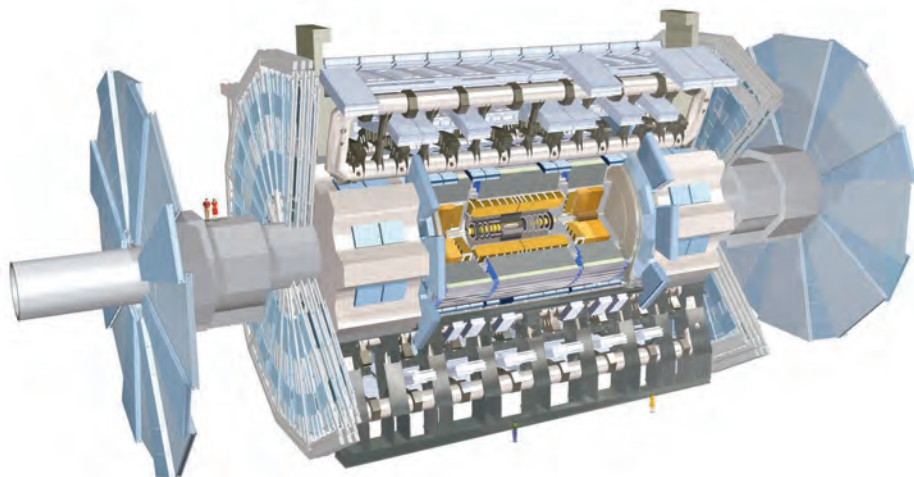
Delci polja

Polje	Delci
elektromagnetno	foton γ
šibko	šibki bozoni W^-, W^+, Z^0
močno	osem gluonov
	Higgsov bozon H^0

V kvantni teoriji polja delovanje delca snovi na delec snovi opišemo z izmenjavanjem delcev polja. Elektron, na primer, izseva delec polja elektromagnetne sile, *foton*, ki ga drugi elektron absorbira in nato izseva. Prvi elektron foton absorbira in zopet izseva in igra se ponavlja. Z izmenjevanjem enega, dveh in več fotonov opišemo delovanje elektrona na elektron. Tako smo z besedami orisali računski postopek, s katerim zajamemo delovanje delcev snovi na delce snovi. Takemu opisu pravimo interakcija, da ga razločimo od starega opisa s silo polja. Delec snovi potrebuje energijo, da izseva delec polja. Čim večja je ta energija, tem hitreje jo mora vrniti, da ne bi mogli tega z merjenjem ugotoviti. Čim krajši je čas, v katerem energijo vrne, tem manj se oddalji od delca snovi, tem krajši je doseg. Energiji ustreza masa, zato ima delec polja tem večjo maso,

čim krajši je doseg. Elektromagnetna interakcija ima velik doseg, zato ima foton maso nič. Šibka interakcija ima kratek doseg, zato imajo delci njenega polja veliko maso. Obe interakciji, elektromagnetno in šibko, je mogoče obravnavati skupaj le, če uporabimo poseben *Higgsov postopek*. Zamislili so si ga Francois Englert in Robert Brout ter Peter Higgs ter Gerald Guralnik, Carl Hagen in Tom Kibble leta 1964.

Začnejo s štirimi delci polja brez mase in neomejenim dosegom. Vpeljejo *Higgsovo polje*, zaradi delovanja katerega trije delci polja šibke sile dobijo veliko maso, foton pa obdrži maso nič. V vseh štirih primerih lahko še naprej računajo z delci polja z maso nič, le naknadno upoštevajo maso zaradi *spontane zloma simetrije*. To možnost je predvidel Joičiro Nambu leta 1960, v začetku pri raziskovanju superprevodnosti, pojava, da

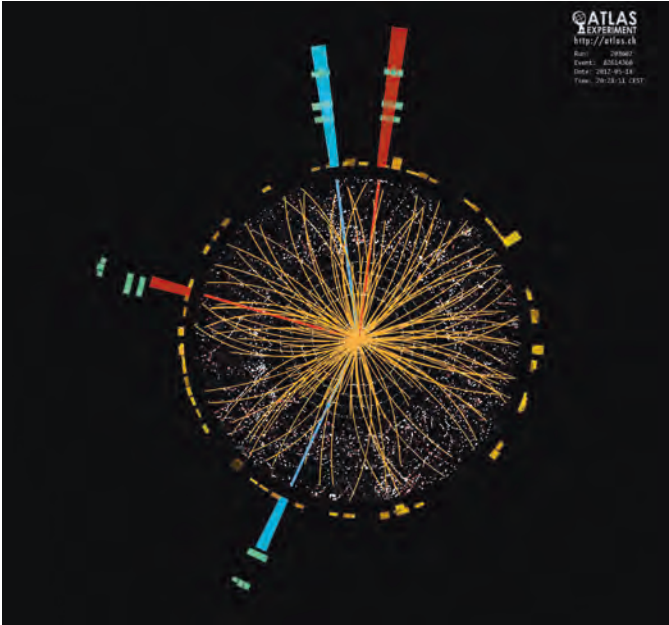


Merilnik ATLAS v CERN-u. Vir: CERN.

nekatero kovino pri zelo nizki temperaturi prevajajo elektriko brez upora. Leta 2008 je dobil polovico Nobelove nagrade.

Elektrošibka teorija in Higgsov postopek ob svojem času nista zbudila pozornosti, ker se je zdelo, da s šibko interakcijo ni mogoče računati. Težavo je odpravil Gerard 'tHooft po letu 1970 in skupaj s svojim mentorjem Martinom Veltmanom dobil Nobelovo nagrado leta 1999. Potem je bilo mogoče napovedati maso delcev polja šibke sile. To so šibki bozoni W^- in W^+ z maso $80,2 \text{ GeV}/c^2$ in Z^0 z maso $91,2 \text{ GeV}/c^2$. Gigaelektronvolt, GeV, je energija, ki bi jo dobil proton, ko bi v praznem prostoru preletel napetost milijarde voltov. Energiji E ustreza masa E/c^2 , če je c hitrost svetlobe. Šibke bozone so odkrili na začetku leta 1982. Higgsovo polje je nenavadno po tem, da v vakuumu nima najnižje energije, kot jo ima elektromagnetno polje. Tudi delci snovi zaradi delovanja tega polja dobijo maso. Delec Higgsovega polja lahko postane prost in se pojavi kot Higgsov bozon brez naboja in s spinom 0, če je na

voljo dovolj energije. Ta delec so iskali, odkar so napovedali, da obstaja. Elektrošibka teorija ne napove njegove mase. Sklepati pa je bilo mogoče, da je velika. Zaradi tega je za njegov nastanek potrebna velika energija. V ta namen so zgradili velike trkalnike. Pri trku hitrega naelektrenega delca iz pospeševalnika z mirujočim delcem za nastanek novih delcev ni na voljo dovolj energije. V trkalniku pa gruče delcev z veliko energijo trkajo z gručami delcev ali antidelcev z veliko energijo, ki se gibljejo v nasprotni smeri. V CERN-u so zgradili Trkalnik elektronov in pozitronov (LEP), ki je nazadnje dosegel energijo dvakrat 103 GeV . Tik pred tem, ko je leta 2000 prenehal delovati, so opazili nekaj dogodkov, pri katerih bi utegnil nastati in razpasti Higgsov bozon. V rovu LEP-a z obsegom 27 kilometrov so zgradili Veliki hadronski trkalnik (LHC) s protoni z največjo energijo 2 krat 7 TeV . Teraelektronvolt, TeV, je tisoč gigaelektronvoltov. Teden po začetku delovanja jeseni 2008 se je primerila nezgoda, po kateri so trkalnik usposo-



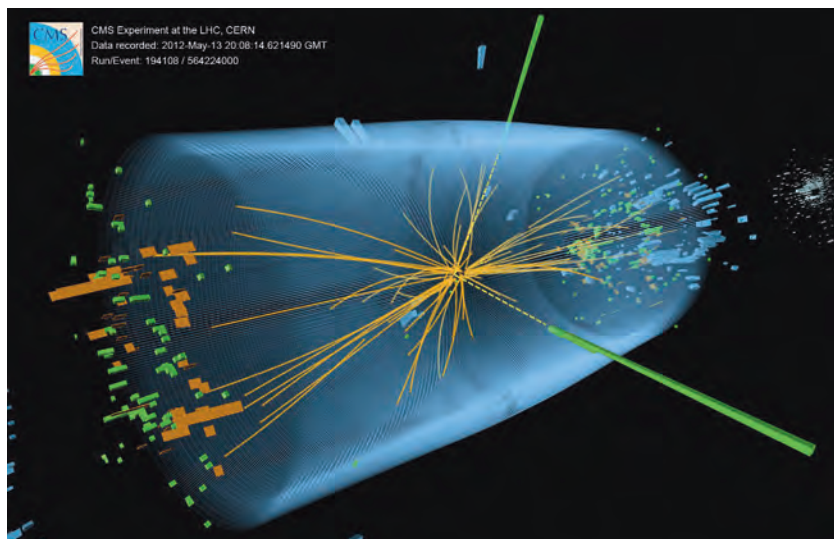
Računalniška rekonstrukcija dogodka v ATLAS-u, pri katerem je verjetno nastal Higgsov bozon in razpadele na elektrona in pozitrona. Delci, ki jih kažejo modri in rdeči sledi, so odleteli približno v ravnini, pravokotni na smer gibanja protonov.

Vir: CERN.

bili šele naslednjo jesen. Odtlej so energijo protonov postopno povečevali in leta 2011 dosegli dvakrat 3,5 TeV ter leta 2012 dvakrat 4 TeV.

Omeniti kaže, da so v Združenih državah začeli graditi Superprevodni supertrkalnik (SSC), ki bi imel cev z obsegom 90 kilometrov in v katerem bi protoni dosegli energijo dvakrat 20 TeV. Leta 1993 so gradnjo zaradi naraščajočih stroškov in pomanjkanja denarja ustavili. Deloval pa je Tevatron, trkalnik za protone in antiprotone, ki je s cevjo z obsegom 6,3 kilometra nazadnje dosegel energijo dvakrat 1 TeV. Nekaj časa je bil najzmogljivejša naprava svoje vrste. Konec leta 2011 je prenehal delovati. Raziskovalni skupini CDF in DØ sta 2. julija letos objavili na podlagi dokaj negotovih podatkov, da bi lahko obstajal Higgsov bozon z maso na območju od 115 GeV/c^2 do 135 GeV/c^2 . V trkalniku LHC se gruče protonov po železnih vakuumskih ceveh v nasprotno usmerjenem magnetnem polju superprevodnih magnetov gibljejo v nasprotnih smereh. V danem trenutku se po ceveh giblje skoraj tri tisoč gruč, v katerih je skupaj več kot sto

milijard protonov. Na štirih mestih se poti gruč križajo in tam pride do čelnih trkov protonov s protoni. V štirih podzemnih dvoranah stojijo veliki merilniki, od katerih sta dva namenjena osnovnim raziskovanjem in zaznavanju Higgsovih bozonov. *ATLAS*, A Toroidal L(HC) ApparatuS, svitkasta naprava ob LHC, je dolg 45 metrov, ima premer 25 metrov in tehta 7 tisoč ton. V raziskovalni skupini je tri tisoč članov iz 175 ustanov iz 38 držav, ki so prispevale k izdelavi merilnika. Merilnik zaznava različne vrste delcev z različnimi energijami. Vsi njegovi deli se odzovejo takoj, da je podatke mogoče sproti voditi na računalnik. Mesto, kjer trkajo gruče, obdajajo deli merilnika v vse bolj oddaljenih plasteh. *Notranji merilnik* zasleduje poti naelektrenih delcev. Najbolj notranjo plast sestavljajo majhni slikovni elementi iz silicija, ki jih obdajajo vse daljši silicijevi trakovi. Naelektreni delci v siliciju sproščajo elektrone, po katerih ugotavljajo poti delcev. *Kalorimeter* meri energijo delcev. V njem v prozorni snovi med deli svinca in jekla naelektrjeni delci prožijo drobne bliske. Kalorimeter vsebuje tudi dele iz tekočega



*Računalniška
rekonstrukcija
dogodka v CMS-u,
pri katerem je
verjetno nastal
Higgsov bozon in
razpadel na dva
fotona z veliko
energijo (rumeni
sledil). Vir: CERN.*

argona. Po bliskih ugotovijo energijo delcev, ki se zaustavijo v kalorimetru. Nevtrino uide iz merilnika, ne da bi ga zaznali. Na njegovo energijo sklepajo po manjkajoči energiji delcev, ki izvirajo iz skupne točke. Notranja plast kalorimetra zaznava naelektrene delce in fotone, zunanja pa delce, ki so zmožni močne interakcije. *Mionski spektrometer* zaznava mione in meri njihovo energijo. Magnetno polje ustvarita dva sistema superprevodnih magnetov. Polje notranje tuljave se sklene po jarmu. Zunaj njega polje ustvari svitkasti magnet. Polje poti naelektrenih delcev ukrivi, da je po ukrivljenosti mogoče ugotoviti naboj in hitrost.

CMS, Compact Mion Solenoid, kompaktna mionska tuljava, je dolg 21 in pol metra, ima premer 15 metrov in tehta 12 in pol tisoč ton. V raziskovalni skupini je 3.600 članov iz 1.183 ustanov iz 38 držav. Merilnik je sestavljen podobno v plasteh kot *ATLAS* in tega dopolnjuje. Prva plast vsebuje silicijeve merilnike, ki zaznavajo poti delcev. Notranji del kalorimetra zaznava elektrone in fotone, zunanji pa delce, zmožne močne interakcije. Pri prehodu gruče skozi gručo pride v povprečju do kakih 20 trkov med protoni. Tak trk, *dogodek*, opiše 25 megabajtov podatkov. V merilniku se na sekundo dogodi skoraj 32

milijonov takih trkov, čemur ustreza ogromen tok podatkov ($23 \cdot 10^{15}$ bajtov na sekundo). Iz te množice računalnik s tristopenjskim sitom izlušči okoli sto zanimivih dogodkov na sekundo. Podatke o njih shranijo za poznejšo obdelavo, drugi podatki gredo v izgubo. Obdelava podatkov je zapletena in pri njem sodeluje mreža računalnikov z vsega sveta.

Zanimivi so predvsem dogodki, pri katerih bi lahko nastal Higgsov bozon. Nastane na več načinov. V Higgsov bozon se zlije ta kvark t in njegov antidelec \bar{t} . Kvark in antikvark povzročita nastanek para šibkih bozonov W^- in W^+ , ki se zlijeta v Higgsov bozon. Iz kvarka in antikvarka nastane šibki bozon W^- ali W^+ ali Z^0 , ki izseva Higgsov bozon. Higgsov bozon zelo hitro razpade. Po oceni obstaja v povprečju le 10^{-22} sekunde.

Najlažje je zasledovati dogodke, pri katerih bozon razpade na dva fotona z veliko energijo ali na dva bozona Z^0 ali na par bozonov W^- in W^+ , ki dalje razpadeta na skupaj štiri leptone. Pri tem kvarke, ki ne morejo obstajati prosti, zaznavajo po *pljuskih*. To so skupine delcev, katerih nastanek je sprožil kvark in ki iz ene točke letijo v notranjosti ozkega stožca.

Na energijskem območju okoli 126 GeV so zaznali toliko razpadov, da so utemeljeno sklepali na nastanek bozona, katerega masi ustreza ta energija. Da bi do opazovanega števila razpadov prišlo po naključju, ne da bi nastal bozon, je enako neverjetno, kot da bi pri metanju kovanca dvajsetkrat zaporedoma vrgli grb. Obdelava zbranih podatkov in poznejša merjenja bodo pokazala, ali ima bozon lastnosti, ki jih standardni model pripisuje Higgsovemu bozonu. Na drugi strani bodo izidi, če bodo podprli obstoj Higgsovega bozona, podrobneje opredelili njegove lastnosti in s tem nakazali nadaljnji razvoj.

Proteus je poročal o uspehih standardnega modela: *Nobelova nagrada za fiziko za leto 1979*, 42 (1979/80): 270-271, *Nobelova nagrada za fiziko za leto 1999*, 62 (1999/2000): 173-176, *Nobelova nagrada za fiziko za leto 2008*, 71 (2008/09): 167-172, in o trkalnikih *Ženevski trkalnik*, 52 (1989/1990): 98-102, *Veliki hadronski trkalnik LHC*, 63 (2000/01): 306-310, *Ob velikem hadronskem trkalniku*, 71 (2008/09): 302-308.

Trkalnik LHC v letih 2013 in 2014 po načrtu ne bo deloval. Nameravajo ga obnoviti, da bo zmožeg načrtovano energijo dvakrat 7 TeV. Poleg nadaljnega raziskovanja Higgsovega bozona je še veliko odprtih vprašanj. Kako pojasniti, da vesolje sestavljajo delci in je antidelcev zelo malo? Kaj je temna snov in kaj temna energija? Kaj sledi standardnemu modelu, ki mu očitajo več pomanjkljivosti? Vanj je treba vnesti 19 podatkov, ki jih dajo merjenja, med njimi mase leptonov in kvarkov. Dela ne bo zmanjkalo.

Uredništvo *Physical Review Letters* je dobilo rokopise zelo kratkih člankov Francoisa Englerta in Roberta Brouta s Svobodne univerze v Bruslju 26. julija 1964, Petra Higgsa z edinburške univerze 31. avgusta ter Geralda Guralnika, Carla Hagna in Toma Kibbla z londonskega Imperialnega kolidža 12. oktobra. Guralnik in Hagen sta

Američana in sta v Londonu gostovala. Ob potrditvi Higgsovega bozona utegnejo delu podeliti Nobelovo nagrado, ki jo razdelijo največ na tri dele. Ameriško fizikalno društvo je leta 2010 podelilo nagrado vsem šestim. Brout je lani umrl.

Leon Lederman je v rokopisu, ki sta ga napisala z Dickom Teresijem, Higgsov bozon imenoval *prekleti delec* (the goddamn particle), češ da je povzročil gradnjo zelo dragih naprav, pa ga še niso odkrili. Uredniku ime ni bilo po volji. Tako je nastalo ime *božji delec*, pravzaprav boginjin delec, ker je Ledermanov bog ženskega spola. Leta 1993 je izšla knjiga *Božji delec: Če je vesolje odgovor, kaj je vprašanje?*. Lederman je pozneje izjavil, da mu je žal za izbiro vzdevka.

Literatura:

Skupina ATLAS, 2012: *Observation of a new particle in the search for the standard model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, 31. julija poslano reviji *Physical Letters B*, na spletu arXiv.1207.7214.

Skupina CMS, 2012: *Observation of a new boson at mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, 31. julija poslano reviji *Physical Letters B*, na spletu arXiv.1207.7235.

V obeh zapisih so raziskovalci navedeni na koncu, ne na začetku, kot je navada. V vsaki od obeh skupin je več tisoč raziskovalcev, kar zavzame precej strani. V eksperimentalni fiziki delcev zadnje čase ob velikih napravah nastajajo zelo velike raziskovalne skupine. V skupini ATLAS sodeluje devet fizikov s Fakultete za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani in Instituta »J. Stefan«.