

HIGGSI BOSONI AVASTAMISE LUGU

Mario Kadastik, Kristjan Kannike ja Martti Raidal
(Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut)

*Teaduspreemia väljapaistva avastuse eest ehk panuse eest
Higgsi bosoni avastamisse ja selle omaduste mõõtmisesse*

Standardmudeli viimase osakese avastamine

Osakestefüüsika püüab vastata lihtsana kõlavatele, kuid erakordselt keerulistele küsimustele: millest maailm koosneb ja millised jõud seda koos hoiavad? 1897. aastal avastas J. J. Thomson elektroni. Sellest hetkest alates hakkas selguma, et aatom ei ole looduse kõige väiksem ehituskivi. Tänapäevase teame, et meile tuttav aine koosneb kvarkidest ja leptonitest, mille vastastikmõjusid vahendavad jõuosakesed.

Selle teadmise koondab osakestefüüsika standardmudel. Nime poolest on see mudel, kuid täpsuse ja ulatuse poolest on ta üks inimkonna kõige edukamaid loodusteaduslikke teooriaid. Standardmudel kirjeldab elektroni ja teisi leptoneid, kvarke ning jõuosakesi footonit, gluuoneid ja nõrga vastastikmõju kandjaid W- ja Z-bosoneid. Selle abil saab arvutada tohutul hulgal mõõdetavaid suurusi ning neid on katsetes kinnitatud väga suure täpsusega.

2012. aasta 4. juulil kuulutati Euroopa Tuumauuringute Keskuses CERN-is välja tulemus, mida osakestefüüsikud olid oodanud peaaegu pool sajandit. LHC (Large Hadron Collider) kiirendi kahe suure eksperimendi, ATLAS-e (A Toroidal LHC Apparatus) ja CMS-i (Compact Muon Solenoid) andmetest oli leitud uus osake massiga umbes 125 gigaelektronvolti (GeV). Kõik märgid viitasid, et tegemist on Higgsi bosoniga – osakesega, mis oli standardmudeli viimane katseliselt kinnitamata nurgakivi.

See avastus ei olnud ühe inimese ega ühe labori saavutus. Selle taga oli aastakümneid kestnud teoreetiline ja eksperimentaalne töö, laiaulatuslik rahvusvaheline tehnoloogia ja andmeanalüüsi arendamine ning tuhandete teadlaste omavaheline koostöö. Oma osa selles loos oli ka Eesti teadlastel. Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi (KBFI) töörühm – Martti Raidal, Mario Kadastik ja Kristjan Kannike – osales CERN-i CMS-i eksperimendi Higgsi bosoni analüüsides, aitas kaasa avastuse jaoks olulise nelja leptoniga lõppseisundi uurimisele ning hiljem Higgsi bosoni omaduste täpsele mõõtmisele.

Higgsi bosoni avastamine vastas ühele osakestefüüsika kõige sügavamale küsimusele: miks elementaarosakestel üldse on mass? Samal ajal avas see ukse uutele küsimustele: kas avastatud osake on täpselt standardmodeli Higgsi boson? Kas tema omadustes peitub jälgi uuest füüsikast, nagu näiteks tumeaine, täiendavad skalaarosakesed või veel tundmatud looduseadused? Just nende küsimuste valguses algas pärast avastust töö, milles Eesti teadlased samuti osalesid.

Standardmodel – aineosakesed ja vastastikmõjud

Standardmodel kirjeldab seda osa universumist, mis suhtleb meiega piisavalt tugevasti, et seda laboris mõõta. Ta ei sisalda gravitatsiooni, tumeainet ega tumeenergiat. See ei ole standardmodeli nõrkus. Ta kirjeldab väga täpselt kindlat looduse osa – mikromaailma osakesi ja nende kolme vastastikmõju – elektromagnetilist, nõrka ja tugevat.

Elektromagnetilist vastastikmõju vahendab footon. Selle tõttu näeme valgust, toimivad elektriseadmed ja tekib keemiline side. Tugevat vastastikmõju vahendavad gluonid. See seob kvarke prootoniteks ja neutroniteks ning hoiab tuumajõu kaudu koos aatomituumi. Nõrka vastastikmõju vahendavad W- ja Z-bosonid. Nõrk vastastikmõju vastutab näiteks teatud radioaktiivsete lagunemiste eest ning mängib olulist rolli tähtede tuumaprotsessides.

Vastastikmõjude kandjad on bosonid. Bosonid on osakesed, mille spinn on täisarvuline. See omadus lubab paljudel bosonitel olla samas kvantolekus, mis teeb võimalikuks näiteks laseri, kus tohutu hulk ühesuguseid footoneid liigub ühes koherentses valguslaines.

Aineosakesed on teistsugused. Elektronid, müüonid, neutriinod ja kvargid on fermionid, millel on poolarvuline spinn. Fermionid ei saa kõik korraga samas kvantolekus olla. Just see printsiip annab aatomitele struktuuri, sest elektronid täidavad aatomis eri energiatasemeid ega kuku kõik korraga kõige madalamale astmele.

Higgsi mehhanism – nähtamatu väli, nähtav tagajärg

Ometi oli standardmodeli südames pikka aega üks tühi koht. Teooria sümmeetriad seletasid hästi vastastikmõjude kuju, kuid sama sümmeetria justkui keelas osakestel massi omada. Tegelik maailm ütleb aga vastupidist, sest elektronil on mass, prootonil on mass ning W- ja Z-bosonid on lausa väga rasked. Kui osakestel massi ei oleks, ei moodustuks aatomid, molekulid ega tähed ning ei oleks keemiat, planeete ega meid endid.

Selle vastuolu lahenduseks pakuti 1964. aastal välja mehhanism, mida nüüd tunneme Higgsi mehhanismina. François Englert ja Robert Brout, Peter Higgs ning Gerald Guralnik, Carl Hagen ja Tom Kibble näitasid sõltumatult, kuidas

sümmeetriat saab spontaanselt rikkuda nii, et jõuosakesed omandavad massi, kuid teooria jääb matemaatiliselt kooskõlaliseks. Peter Higgs rõhutas, et mehhanismiga peab kaasnema uus osake. Julge idee järgi on tühi ruum ehk vaakum tegelikult täidetud Higgsi väljaga. Osakesed, mis on selle väljaga tugevamalt seotud, käituvad nii, nagu neil oleks suurem mass, samal ajal kui osakesed, mis sellega ei vastastikmõjustu, jäävad massituks. Selle välja kvant, väike võnkumine, on osake nimega Higgsi boson. Kui Higgsi väli on meri, siis Higgsi boson on selle mere laine.

Higgsi väli ei anna kõigile osakestele massi ühtemoodi. Footon jääb massituks, mistõttu elektromagnetväli ulatub lõpmata kaugele ja valgus saab liikuda vaakumis valguse kiirusel. Ka gluuonid on massitud, kuigi tugeva vastastikmõju eripära tõttu ei näe me üksikuid vabu gluuoneid igapäevaselt. W- ja Z-bosonid saavad aga Higgsi väljalt suure massi, mistõttu nõrk vastastikmõju on väga lühikese ulatusega. Meie igapäevane mass ei tule siiski ainult Higgsi väljast. Prootoni ja neutroni massist suurem osa tekib tugeva vastastikmõju energiast – kvarkide ja gluuonite liikumisest ning omavahelisest sidumisest. Higgsi väli annab massi elementaarsetele kvarkidele ja laetud leptonitele, kuid nähtava aine kogumass sünnib mitme mehhanismi koosmõjus.

Nii sai Higgsi bosonist standardmudeli kõige otsitum osake. Kui teda ei oleks leitud, oleks tulnud ümber mõelda kogu arusaam sellest, kuidas elementaarosakesed massi saavad.

LEP, Tevatron ja LHC – pikk tee avastuseni

Otsingud muutis raskeks asjaolu, et Higgsi boson on ebastabiilne. Ta tekib kõrge energiaga osakeste kokkupõrkes ja laguneb peaaegu kohe teisteks osakesteks. Detektor ei näe Higgsi bosonit ennast, vaid tema lagunemise jälgi. Seetõttu ei tähenda Higgsi bosoni otsimine ühe osakese pildistamist, vaid tohutu hulga kokkupõrgete tulemuste salvestamist, lagunemissaaduste mõõtmist ja taust-protsesside mõistmist.

Esimesed Higgsi bosoni otsingud algasid ammu enne LHC käivitamist. CERN-i LEP-kiirendis (Large Electron-Positron Collider) põrgatati kokku elektrone ja positrone. Selline masin võimaldas teha erakordselt puhtaid mõõtmisi ning määrata standardmudeli parameetreid väga täpselt. LEP ei leidnud Higgsi bosonit, kuid tema tulemus oli oluline, sest ta näitas, et standardmudeli Higgs pidi olema raskem kui umbes 114 GeV.

Ameerika Ühendriikides Fermilabis töötanud Tevatron põrgatas kokku prootoneid ja antiprootoneid peaaegu 2 teraelektronvoldi (TeV) energiaga. Ka Tevatron ei jõudnud Higgsi bosoni kindla avastuseni, kuid kitsendas võimalikke massivahemikke ning nägi andmetes hiljem mõistetavaks saanud vihjeid. LEP-i ja Tevatroni kaudsed andmed osutasid, et kui standardmudeli Higgs olemas on, ei tohiks ta olla väga raske.

LHC ehitati just selleks, et minna palju kaugemale. See on 27 kilomeetri pikkune prooton-prooton kiirendi Genfi lähedal CERN-is. Prootonid liiguvad peaaegu valguse kiirusega vastassuunalistes kimpudes ja põrkuvad detektorite keskmes. LHC maksimaalne kokkupõrkeenergia on 14 TeV, kuid Higgsi bosoni avastus tehti esimese tööperioodi andmetega, kus prootonite kokkupõrgete massikeskmeenergia oli 7 ja 8 TeV.

Prooton on liitosake, tema sees on kvargid ja gluonid. Seetõttu ei põrku kokkupõrkes tavaliselt kokku kaks tervet prootonit kui kõvad kuulid, vaid nende koostisosad. Just gluonite ühinemine on üks peamine viis, kuidas LHC-s Higgsi bosoneid tekitatakse. Haruldane sündmus tuleb aga välja sõeluda miljardite tavalisemate sündmuste seast.

Kui LHC käima pandi, oli selge, et vastus tuleb. Kui standardmudeli Higgs on olemas, peab LHC selle leidma, kui mitte, peab LHC näitama, mis mehhanism standardmudeli asemel töötab. Mõlemal juhul oleks tulemus muutnud fundamentaalfüüsika pilti.

Kuigi foton ja gluon Higgsi väljalt massi ei saa, on Higgsi boson kaudselt, kvantparanduste kaudu, ometi seotud ka fotonite ja gluonitega. Näiteks võib Higgs laguneda kaheks fotoniks ning LHC-s tekib suur osa Higgsi bosoneid gluonite ühinemisel. Sellised pealtnäha väikesed kvantprotsessid osutusid Higgsi bosoni avastamisel ja omaduste mõõtmisel väga tähtsaks. Just Higgsi bosoni lagunemine kaheks fotoniks võimaldas täpselt ära mõõta tema massi – 125 GeV.

Meenutame, et elementaarosakeste maailmas on massi mugav mõõta energiaühikutes. Einsteini valem $E = mc^2$ ütleb, et mass ja energia on sama nähtuse kaks kuju. Osakestefüüsikud kasutavad ühikut elektronvolt (eV). Üks GeV on miljard eV. Protoni mass on ligikaudu 1 GeV, W- ja Z-bosonite massid on kümneid GeV ning Higgsi bosoni mass umbes 125 GeV ehk umbes sama mis joodi aatomil.

CMS-i eksperiment ja Eesti

CMS on üks LHC neljast suurest eksperimentist. Nimi on mõnevõrra petlik, sest detektor ei ole inimlikus mõõtkavas sugugi kompaktne. See on mitmekorruselise maja suurune seade, mis ümbritseb prootonite kokkupõrkepunkti nagu kihiline sibul. Iga kiht mõõdab kokkupõrkest välja lendavaid osakesi omal viisil. Nii registreerib jäljedetektor laetud osakeste trajektoore, kalorimeetrid mõõdavad energiat ning välised müüonikambriid tuvastavad müüoneid.

Müüonid on Higgsi bosoni avastamise loos eriti tähtsad. Need on laetud osakesed, elektroni raskemad sugulased. Tänu elektronist 200 korda suuremale massile läbivad müüonid detektori kihte suhteliselt hõlpsasti ja jätavad hästi mõõdetava jälje. CMS-i nimi rõhutabki müüonite mõõtmise võimekust. Nelja müüoniga sündmus on seetõttu üks puhtamaid, mida hadronikiirendi kaootilises keskkonnas otsida saab.

Eesti teadlaste töörühm töötas CMS-i Higgsi bosoni rühmas alates 2007. aastast. Alguses uuriti kahekordse laenguga Higgsi bosoni võimalikke lagunemisi neljaks leptoniks. See uue füüsika otsing andis töörühmale väga vajaliku oskuse, kuidas käsitleda nelja leptoniga lõppseisundeid, kuidas hinnata taustu ja rekonstrueerida sündmusi, milles võivad peituda Higgsi bosoni jäljed.

Kui LHC andmeid hakati analüüsima, jätkus töö standardmudeli Higgsi bosoni otsingul. KBFI töörühm osales kahes Higgsi lagunemiskanali uuringus. Neist avastuse seisukohalt keskne oli $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, kus Higgs laguneb kaheks Z-bosoniks ja need omakorda neljaks leptoniks. Teine uuritud kanal oli $H \rightarrow Z \gamma$. See oli füüsikaliselt huvitav, kuid avastusartikli tundlikkuse mõttes ei olnud ta võrreldav peamiste kanalitega. Higgsi avastuse CMS-i artiklisse ja hilisemasse ATLAS-e ja CMS-i ühisesse massimõõtmisse läks sisse just $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ kanali tulemus.

Eesti rühma töö ei olnud üldine osalemine suures koostöös, vaid konkreetne andmeanalüüs. Töörühm tegeles leptonite energia kalibreerimisega, Z-bosoni invariantse massi rekonstrueerimisega, nelja müüoni signaali otsimisega CMS-i andmetest, taustprotsesside simuleerimisega ning saadud tulemuste kombineerimisega teiste Higgsi otsingukanalitega. Selline töö on avastuse puhul sama tähtis kui detektori ehitamine, sest ilma täpse analüüsi ja usaldusväärse statistilise tõlgendusega ei muutu haruldane signaal avastuseks.

Nelja müüoni signaali analüüs

Higgsi bosoni üks kuulsamaid otsingukanaleid on $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, mida nimetatakse sageli kuldseks kanaliks. Põhjus ei ole selles, et see kanal oleks kõige sagedasem. Vastupidi, selliseid sündmusi on vähe, kuid need on väga puhtad. Kui detektoris nähakse nelja hästi mõõdetud leptonit, mille paarid sobivad Z-bosonite lagunemistega ja mille kogu invariantne mass koguneb umbes 125 GeV juurde, on see kindel jälg uuest osakesest.

Nelja müüoni lõppseisund on selle kuldse kanali üks puhtamaid variante. Iga müüon jätab CMS-is jälje nii sisemises jäljedetektoris kui ka välimistes müüonikambrites. Nende trajektoori kõveruse järgi saab määrata impulsi ning nelja müüoni andmetest saab arvutada, millise massiga osake võinuks nad tekitada.

Analüüs algab aga ammu enne seda, kui valmib ilus joonis. Kõigepealt tuleb aru saada, millised tavalised standardmudeli protsessid võivad anda samasuguse või sarnase lõppseisundi. Näiteks võib tekkida kaks Z-bosonit ilma Higgsi bosonita, mõni osake võib jäljendada leptonit ning samuti tuleb arvestada detektori mõõtevigade ja valikukriteeriumidega. Tausta tuleb simuleerida, kontrollida sõltumatute andmevalimitega ja lõpuks statistiliselt võrrelda päris andmetega.

KBFI teadlaste panus seisneski selle töö tegemises. Nad simuleerisid nelja müüoni signaali taustu, otsisid CMS-i andmetest nelja müüoni sündmusi ning

osalesid tulemuse kombineerimises teiste kanalitega. Kombineerimine oli vältimatu, sest Higgsi boson ei ilmunud ühes kanalis üksi suure ja vaieldamatu tipuna. Avastuse usaldusväärsus sündis paljude kanalite kooskõlast, sest footon-footon, WW , ZZ , $\tau\tau$, $b\bar{b}$ ja teised kanalid pidid koos andma sama loo.

Kui andmetes hakkas 125 GeV juures paistma uus osake, oli just nelja leptoniga kanal üks neist, mis andis väga puhta pildi. CMS-i avastusartikkel näitas, et uus boson on olemas. Kuid sõna „Higgs“ kasutamiseks tuli veel kontrollida, kas uus osake on tõepoolest standardmudeli ennustatud Higgsi boson, mitte mõni muu uus osake.

Standardmudeli Higgsi boson või uus füüsika?

Uue osakese avastamine oli suur hetk, kuid teaduslikult oli see alles järgmise töö algus. Kui detektorites ilmub osake massiga 125 GeV, tuleb küsida, millised on tema omadused. Kas ta laguneb osakesteks õigete tõenäosustega? Kas ta tekib prootonite põrgetes nii sageli, nagu standardmudel ennustab? Kas tema vastastikmõjud W - ja Z -bosonite ning aineosakestega on seotud nende massidega just nii, nagu Higgsi mehhanism nõuab?

Standardmudelis on Higgsi boson eriline, tema interaktsioonid teiste osakestega ei ole juhuslikud. Mida raskem on osake, seda tugevamalt ta Higgsi väljaga interakteerub. Seetõttu on Higgsi omaduste mõõtmine omamoodi massi päritolu kontrollikatse. Kui mõõdetud vastastikmõjud erineksid standardmudeli ennustusest, oleks see märk uuest füüsikast.

KBFI töörühma liikmed osalesid pärast avastust mitme Higgsi lagunemiskanalide tulemuste kombineerimises ja statistilises analüüsis. Martti Raidal ja Kristjan Kannike koos rahvusvaheliste kaastöölistega analüüsisid kiiresti kättesaadavaid LHC ja Tevatroni andmeid ning küsisid, kas 125 GeV resonants on tõepoolest Higgsi boson. Need tööd olid ajastuse mõttes erilised, sest teoreetikud said avalike mõõtmistulemuste põhjal kiiresti uurida, millised Higgsi vastastikmõjud on andmetega kooskõlas ja millised uue füüsika stsenaariumid on välistatud.

Analüüsides lubati Higgsi vastastikmõjudel W - ja Z -bosonite ning fermionitega varieeruda. Eraldi uuriti ka vaid silmuste tasemel tekkivaid protsesse, näiteks Higgsi tekkimist kahe gluuoni ühinemisel ning lagunemist kaheks footoniks. Lisaks arvestati võimalusega, et Higgs võib mõnikord laguneda nähtamatult, näiteks tumeaine osakesteks või muudeks osakesteks, mis detektorist jälge jätmata läbi lendavad.

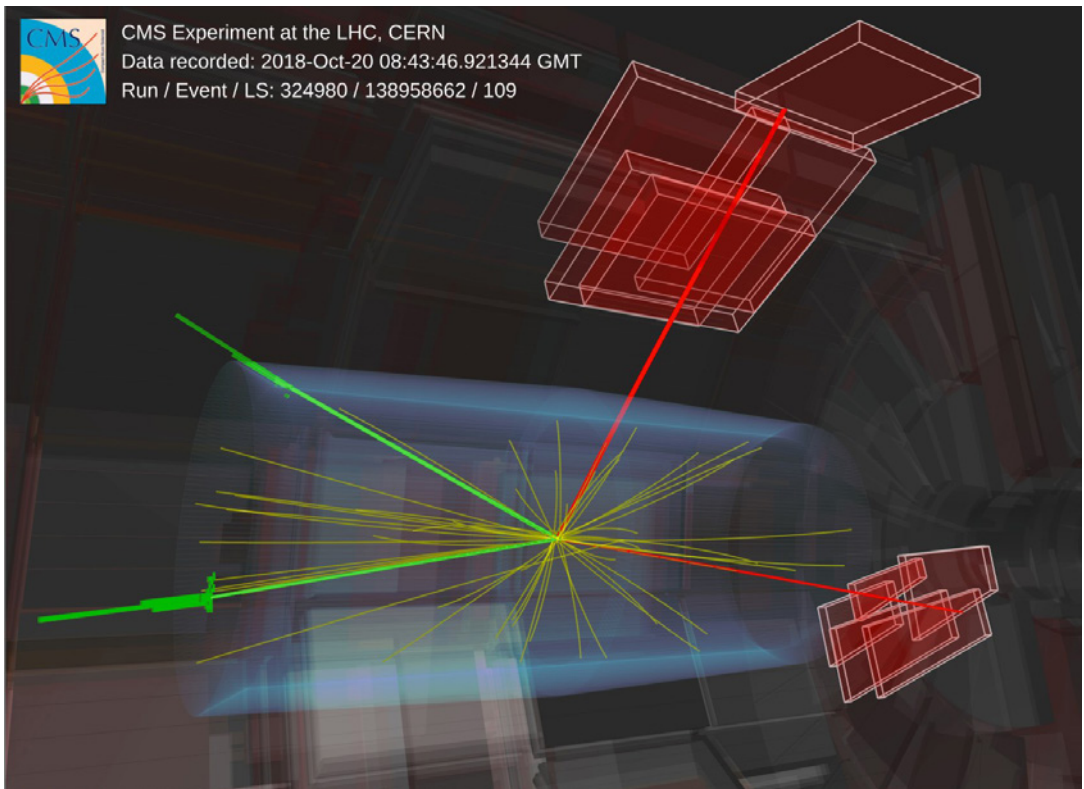
Varastes andmetes leidsid põnevaid kõikumisi. Näiteks kahe footoni kanalis paistis signaal mõnel hetkel standardmudeli ootusest suurem. Sellised kõikumised on uute avastuste järel tavapärased, sest andmeid on vähe ja statistiline ebakindlus suur. Hilisemad mõõtmised on pilti täpsustanud ning Higgsi bosoni mõõdetud omadused on liikunud üha lähemale standardmudeli ennustustele.

Oluline järeldus jäi siiski samaks ja uus 125 GeV osake käitub väga suure täpsusega nagu Higgsi boson.

Higgsi boson ja t-kvark

Pärast avastust oli üks olulisemaid puuduvaid eksperimentaalseid andmeid Higgsi bosoni interaktsiooni tugevus kõige raskema tuntud elementaarosakese, t-kvargiga. Standardmudel peaks t-kvark Higgsi väljaga eriti tugevasti interakteeruma, sest ta on erakordselt raske. Selle sidestuse otsene mõõtmine on seetõttu Higgsi mehhanismi üks rangemaid teste.

Seda saab uurida protsessis, kus Higgs tekib koos t-kvargi ja t-antikvargiga. Seda nimetatakse ttH kanaliks ja see on üks huvitavamaid eksperimentaalseid uurimisuundi. Sellised sündmused on haruldased ja keerulised, sest lõppseisundis võib olla palju osakesi, sealhulgas b-kvarke, leptoneid, tau-leptoneid ja puuduva energia jälgi. Taustprotsesse on palju ning nende eristamine signaalist nõuab väga nutikat andmeanalüüsi.



Reaalne Higgsi bosoni lagunemisprotsess kuldses kanalis CMS-i eksperimendis.

Mario Kadastik panustas CMS-is $t\bar{t}H$ mõõtmistesse ning maatrikselementidel põhinevate ja masinõppe meetodite kasutamisse Higgsi analüüsides. Maatrikselementide meetod kasutab teoreetilise füüsika arvutusi selleks, et hinnata, kui tõenäoline on iga konkreetne detektoris nähtud sündmus signaali või tausta korral. Masinõpe aitab omakorda leida keerulistest andmetest mustreid, mida lihtsad lõiked ei suuda ära kasutada.

Need meetodid parandasid analüüsides tundlikkust ja aitasid jõuda tulemusteni, millega CMS kinnitas Higgsi bosoni tootmist koos t -kvarkidega. See oli oluline samm, sest nüüd ei olnud Higgsi boson ainult avastatud osake, vaid üha täpsemalt mõõdetud standardmudeli osa.

Eesti teadlaste roll suures koostöös

Suurtes osakestefüüsika eksperimentides on artiklitel sageli tuhandeid autoreid. See võib väljastpoolt vaadates tekitada küsimuse, kuidas eristada ühe väikese rühma panust. Vastus on, et avastus sünnibki paljudest täpsetest töödest. Keegi ehitab ja kalibreerib detektori osi, keegi arendab rekonstrueerimistarkvara, keegi hindab taustprotsesse, keegi koostab statistilist kombinatsiooni. Ükski neist sammudest ei ole üksi piisav, kuid ilma nendeta ei tule ka avastust.

KBFI töörühma roll oli mitmekihiline. Martti Raidal panustas $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ analüüsi ja tulemuste kombineerimisse ning juhendas nooremaid kaastöölisi hilisemates CMS-i analüüsides. Mario Kadastik panustas nii nelja leptoniga avastuskanali analüüsi kui ka hilisematesse $t\bar{t}H$ mõõtmistesse ning oli CMS-is masinõppe ja maatrikselementide meetodite juurutajate hulgas. Kristjan Kannike panustas Higgsi bosoni omaduste statistilisse analüüsi ja eri otsingukanalite kombineerimisse, mille abil määrati Higgsi bosoni vastastikmõjude tugevusi.

Töö väärtus ei seisne ainult selles, et Eesti teadlased olid suure avastuse autorite nimekirjas. Olulisem on, et nende panus oli seotud just nende analüüsides, mis avastuse ja hilisema tõlgenduse seisukohalt loevad: puhta nelja leptoniga signaali otsimine, tulemuste kombineerimine, Higgsi sidestuste statistiline määramine ning t -kvargiga seotud tootmise uurimine.

Nii on Eesti teadlaste osalus Higgsi bosoni loos hea näide tänapäevasest teadusest. Suur avastus vajab hiiglaslikke seadmeid, kuid see vajab ka väikeseid tugevaid rühmi, kes oskavad väga konkreetset probleemi sügavuti lahendada.

Lõppsõna – avastus, mis avas uue ajastu

Higgsi bosoni avastamine ei olnud standardmudeli lõpp-punkt, vaid selle keske mehhanismi katseline kinnitamine. See näitas, et tühjus ei ole füüsikas tühi ja vaakumit täidab Higgsi väli, mille kaudu elementaarosakesed saavad massi. See muutis nähtavaks looduse ühe kõige varjatuma mehhanismi.

Samas ei vastanud avastus kõigile küsimustele. Standardmodel ei ütle, mis on tumeaine. Ta ei seleta tumeenergiat ega gravitatsiooni kvantteooriana. Ta ei seleta lõpuni, miks osakeste massid on just sellised, nagu nad on, miks on looduses kolm aineosakeste põlvkonda või miks universumis on ainet palju rohkem kui antiainet. Seetõttu on Higgsi bosonist saanud ka teeviit standardmodelist kaugemale.

Kui tumeaine suhtleb tavalise ainega Higgsi bosoni kaudu, võivad väga täpsed Higgsi mõõtmised seda paljastada. Kui looduses on rohkem skalaarosakesi kui üks, võib Higgsi bosoni omadustes näha väikeseid kõrvalekaldeid. Kui Higgsi boson on seotud veel sügavama struktuuriga, võivad selle jäljed ilmned tulevaste LHC andmete või järgmise põlvkonna kiirendite mõõtmistes.

KBFI-s jätkub Higgsi bosoni ja sellega seotud uue füüsika uurimine. Pärast avastust on töö muutunud veelgi täpsemaks. Küsimus ei ole enam ainult selles, kas Higgs on olemas, vaid selles, kui täpselt ta vastab standardmodelile ja kas tema kaudu paistab välja midagi uut. Seetõttu on Higgsi bosoni lugu korraga lõpp ja algus – ühe suure otsingu lõpp ning uue, veel täpsema uurimisajastu algus.

KIRJANDUS

CMS Collaboration. Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC. 2012. Physics Letters B 718 30–61, <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021>

Giardino, P. P., Kannike, K., Raidal, M., Strumia, A. 2012. Is the resonance at 125 GeV the Higgs boson? Physics Letters B 718 269–474, <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.10.042>



Vasakult: Kristjan Kannike, Mario Kadastik ja Martti Raidal. Foto: Erlend Štaub

Mario Kadastik

Sündinud 5. novembril 1981 Tallinnas

2004	Tallinna Tehnikaülikool, bakalaureuseõpe
2005	Tallinna Tehnikaülikool, magistrikraad
2008	Tallinna Tehnikaülikool, füüsika (PhD)
2004–2026	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi insener, teadur, vanemteadur
2016–2023	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi asedirektor
2019–2026	Tallinna Tehnikaülikooli kaasatud professor

Põhilised uurimisteemad: kõrge energia osakestefüüsika, CMS-i eksperimendi andmeanalüüs, Higgsi bosoni otsingud ja omaduste mõõtmine CMS-i eksperimendis, leptonilised lõppolekud, masinõppe ja maatrikselementide meetodid osakestefüüsika andmeanalüüsis ning hajusarvutus.

On olnud topeltlaetud Higgsi alarühma juht ja artiklite peatoimetaja CMS-i eksperimendis ning CMS-i esindaja LHC Higgsi ristlõike standardmudelitest väljapoole jääva füüsika (Beyond the Standard Model) alarühmas.

Kristjan Kannike

Sündinud 27. oktoobril 1978 Tartus

1996	Kohila Gümnaasium
2000	Tallinna Tehnikaülikool, keemia (BSc)
2003	Tartu Ülikool, füüsika (BSc)
2005	Tartu Ülikool, füüsika (MSc)
2008	Tartu Ülikool, füüsika (PhD)
2010–2013	järeldoktor Scuola Normale Superiore di Pisas (Itaalia)
2007–2026	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi teadur, vanemteadur

Põhilised uurimisteemad: standardmodeli sümmeetriarikumine, Higgsi boson ja skalaarsed osakesed uues füüsikas, tumeaine. Kirjutab regulaarselt populaarteaduslikke artikleid ajakirja Horisont.

Martti Raidal

Sündinud 26. veebruaril 1968 Türil

1992	Tartu Ülikool, füüsika, diplom <i>cum laude</i>
1995	Helsingi Ülikool, teoreetiline füüsika (PhD)
1996–1997	järeldoktor Valencia Ülikoolis
1998–1999	Humboldti stipendiaat DESY-s Hamburgis
2000–2001	järeldoktor California Ülikoolis Riverside'is
2001–2003	Euroopa Liidu Marie Curie stipendiaat CERN-is Genfis
1995–2026	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi teadur, vanemteadur, juhtivteadur
2012–2017	Tartu Ülikooli kõrge energia füüsika professor
2026–...	Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi direktor

Põhilised uurimisteemad: kõrge energia füüsika, Higgsi bosoni füüsika, tumeaine otsesed ja kaudsed otsingud, uus füüsika LHC-s, kosmoloogia, neutriino massid ja leptogenees, tumeenergia ja gravitatsioonilained.