

TIEN JAAR HIGGSDEELTJE

De aankondiging van de eerste waarneming van het higgsdeeltje door het ATLAS- en het CMS-experiment op 4 juli 2012 was een mijlpaal in de geschiedenis van de elementaire-deeltjesfysica. Het enorme belang van deze ontdekking werd al meteen duidelijk door de Nobelprijs die in het daaropvolgende jaar werd toegekend aan twee van de grondleggers van de achterliggende theorie: Peter Higgs en François Englert (Englerts coauteur Robert Brout was in 2011 overleden). Nu, bijna tien jaar later, is een mooi moment om terug te kijken op wat we hebben geleerd sinds deze ontdekking, en om vooruit te kijken naar het geplande onderzoek om de nog onbeantwoorde vragen te beantwoorden.

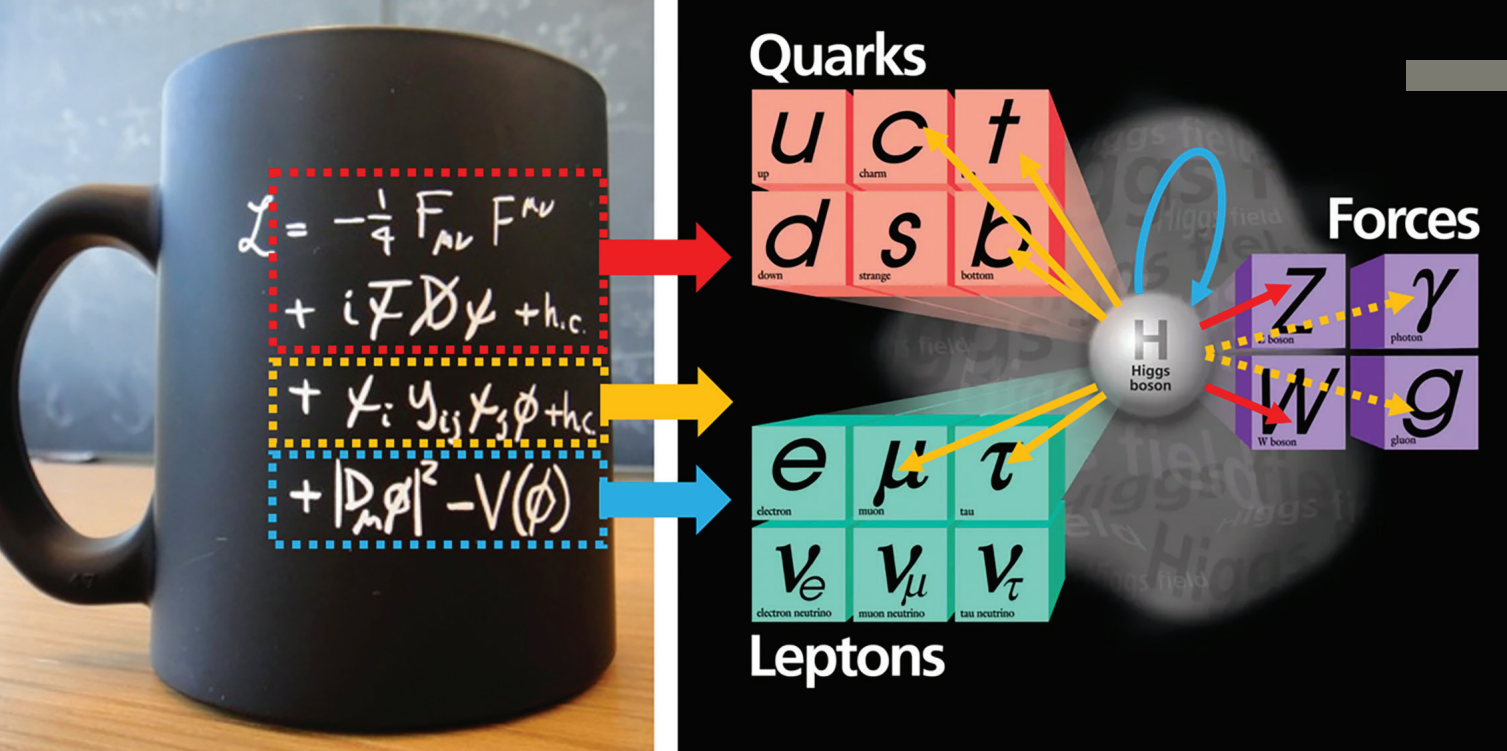
De oorsprong van massa

Het higgsmechanisme, de theorie achter het higgsdeeltje, gaat over de oorsprong van massa. Het effect van massa op de beweging van objecten is al eeuwen geleden beschreven in de wetten van Newton, $F = m \cdot a$: hoe groter de massa, des te meer kracht nodig is om een object te versnellen. Een beschrijving van wat massa is, kwam pas aan het begin van de twintigste eeuw met Einsteins vergelijking $E = mc^2$: massa is simpelweg een uitdrukking van de energie die een object in rust bevat. Hoe groter die energie, des te groter de massa. De logische vervolgvraag is waar die energie vandaan komt. Voor samengestelde objecten, zoals het proton of neutron die bestaan uit een complexe mix van quarks en gluonen, is de oorsprong van deze energie voornamelijk terug te voeren op de bindingsenergie tussen deze objecten. Voor elementaire deeltjes, zoals quarks, elektronen en de W- en Z-bosonen die de boodschappers zijn van de zwakke kernkracht, is er echter geen interne bindingsenergie die energie, en dus massa, kan geven aan deeltjes in rust.

Het higgsmechanisme

In de jaren vijftig en zestig van de vorige eeuw werd door een groot aantal

theoretisch natuurkundigen, onder wie Brout, Englert en Higgs, gezocht naar een theoretische verklaring van de massa van elementaire deeltjes, en met name de W/Z-bosonen. Deze inspanning resulteerde uiteindelijk in het zogenoemde (Brout-Englert-) Higgsmechanisme. Dit mechanisme postuleerde een zeer verrijkende aanname: dat de lege ruimte waarin deeltjes zich bewegen niet leeg is, maar gevuld is met een speciaal veld, het higgsveld. De interactie van elementaire deeltjes met dit higgsveld genereert de rustenergie en dus de massa van de deeltjes. Vrij kort na het formuleren van deze theorie realiseerde Higgs zich dat het veld zichzelf ook als een deeltje moet manifesteren: het zogenoemde higgsdeeltje. Het higgsdeeltje wordt meestal het higgsboson genoemd, omdat het spin-0 heeft en boson de verzamelnaam is voor deeltjes met een heeltallige spin. Het higgsboson is van alle deeltjes in het standaardmodel het meest uitzonderlijk: het is het enige spin-0-deeltje, heeft eigenschappen die onvergelykbaar zijn met die van enig andere deeltje en is onmisbaar: bijna geen enkel aspect van de theorie kan functioneren zonder het bestaan van het higgsboson. Gezien de bijzondere rol van het higgsdeeltje als 'sluitstuk' van het



Figuur 1. Links: de Lagrangiaanse bewegingsvergelijking van alle bekende elementaire deeltjes in het standaardmodel. Het higgsboson speelt een rol in bijna alle aspecten van het standaardmodel: in de beschrijving van de elektrozwakke wisselwerking (rood kader), in de definitie van de massa-eigentoestanden van de fermionen (oranje kader) en in de higgspotentialterm (blauw kader). Rechts: De deeltjes in het standaardmodel. Bij elk van de drie aspecten van het higgsboson in het standaardmodel hoort een waarneembaar type higgsinteractie in de LHC: met fermionen (oranje pijlen), met vectorbosonen (rode pijlen) en met zichzelf (blauwe pijl). De interacties van het higgsboson met de massaloze fotonen en gluonen verloopt indirect via een fermionlus. Credits: CERN en Fermilab.

standaardmodel en de spectaculaire consequenties hiervan voor ons begrip van de lege ruimte, is het vinden van het higgsdeeltje al decennia een van de belangrijkste doelen van de deeltjesfysica geweest.

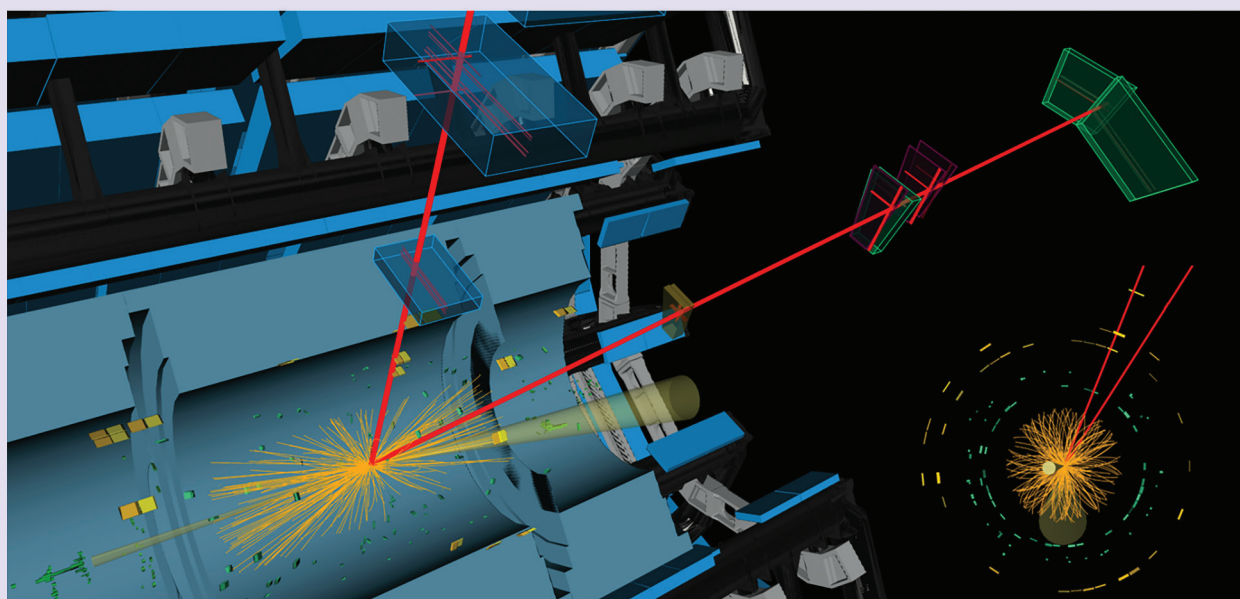
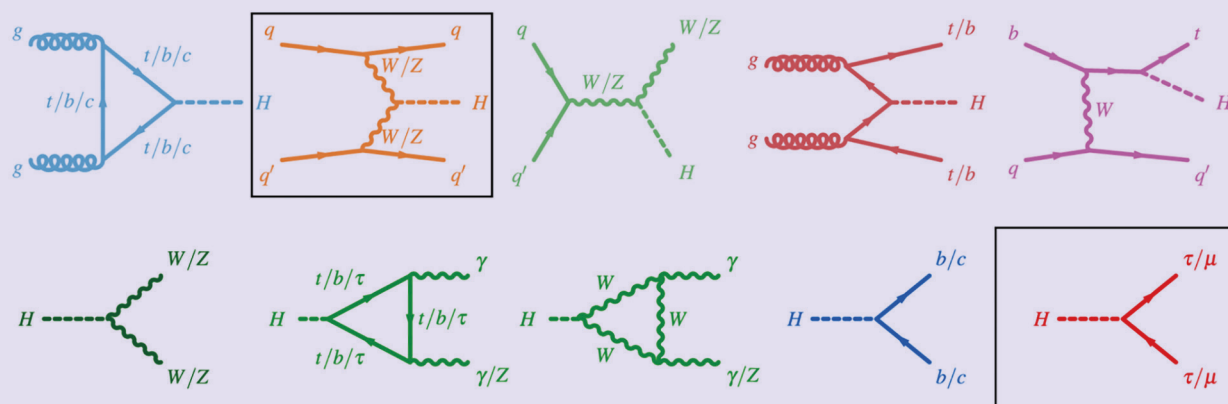
De zoektocht naar het higgsboson

Omdat higgsbosonen sterker aan zware deeltjes koppelen, zoals topquarks en W/Z-bosonen, is de beste plek om higgsdeeltjes waar te nemen een versneller waar veel van zulke zware deeltjes worden gemaakt. Dit maakte de allergrootste deeltjesversnellers op de wereld bij uitstek het jachtdomein van de higgsjagers: eerst de LEP-versneller op CERN, later het Tevatron op Fermilab en uiteindelijk de Large Hadron Collider op CERN. Een extra complicatie was dat de precieze signatuur van higgsvervalen in deeltjesbotsingen afhangt van de massa van het higgsdeeltje zelf – die voor de ontdekking onbekend was. De detectoren van de LHC zijn daarom ook zo ontworpen dat ze zo veel mogelijk verschillende

soorten vervalproducten kunnen identificeren over een groot bereik in energie en richting, met een groot aantal detectiesystemen die in lagen om het interactiepunt zijn aangebracht.

Voor de komst van LHC hadden de resultaten van LEP en Tevatron al een heel lichte en heel zware higgsbosonmassa uitgesloten, waardoor alleen het gebied tussen 110 en 160 GeV overbleef (ter vergelijking, het proton heeft een rustmassa van ongeveer 1 GeV) – een bereik waarin detectie van het higgsboson erg uitdagend is. In dit gebied is er niet één dominant en makkelijk herkenbaar verval, maar juist een veelheid aan manieren om te vervallen die allemaal óf zeldzaam óf moeilijk herkenbaar zijn. Om die reden is er dan ook al vroeg geïnvesteerd in data-analysestrategieën en gemeenschappelijke statistische modelleringsoftware die de experimentatoren in staat zouden stellen om statistisch bewijs uit veel kanalen efficiënt te combineren om tot een ontdekking te komen. Zowel het ATLAS- als CMS-experiment hadden

voor de ontdekking ingezet op de vijf higgsvervalkanalen met de zwaarste deeltjes, higgsverval naar: W/Z-bosonen, fotonen, b-quarks en tau-leptonen. Higgsverval naar de zwaarste deeltjes, topquarks, stond niet in dit rijtje omdat van het higgsboson al bekend was dat het lichter was dan de massa van twee topquarks samen, waardoor dit verval energetisch verboden is. Opvallend genoeg staan de massaloze fotonen er wel tussen, omdat dit verval via een tussenstap verloopt, via een zogenoemd lusdiagram met zware deeltjes (W,t), en daarom relatief veel voorkomt. Dankzij de brede aanpak gebaseerd op veel vervalkanalen, veel rekenkracht en de inzet van letterlijk duizenden fysici was het al na minder dan twee jaar data verzamelen zover. Op 4 juli 2012 kondigden zowel ATLAS als CMS de ontdekking van het higgsdeeltje aan, waar de vervallen naar W/Z-bosonen en fotonen een hoofdrol speelden. Met een statistische significantie van (bijna) vijf sigma in beide experimenten kon het higgsdeeltje worden aangetoond.



Figuur 2. Schematisch overzicht van higgsproductie- en -vervalprocessen (boven, midden) die bij de LHC kunnen worden geobserveerd, gevisualiseerd als feynmandiagrammen. In de getoonde diagrammen loopt de tijd altijd van links naar rechts. Onder: weergave van een proton-protonbotsing in de ATLAS-detector waarin een higgsdeeltje is geproduceerd middels het vectorbosonfusieproces (gekaderd in bovenste rij) en vervolgens vervalft in twee muonen (gekaderd in middelste rij). De gereconstrueerde 'jets' die horen bij de twee quarks die in dit productieproces gelijktijdig geproduceerd worden zijn weergegeven als twee gele kegels. De muonen afkomstig van het higgsverval zijn weergegeven als twee rode sporen.

Hiermee was in één klap de lange zoektocht naar het higgsdeeltje ten einde en werd de fundamentele basis van het standaardmodel en de bijzondere oorsprong van massa in elementaire deeltjes bevestigd!

De oogst van tien jaar higgsdeeltjesonderzoek

Vrij snel na de ontdekking van het higgsboson is experimenteel vastgesteld dat het ontdekte deeltje een spin-o-boson is met een voorname-lijk Charge/Parity-even karakter, in

overeenstemming met de voorspel-ling van de theorie. De massa van het higgsboson is inmiddels gemeten met een precisie van circa één pro-mille: $125,35 \pm 0,13$ GeV. Echter, de grote wetenschappelijke waarde van het observeren van het higgsboson zit vooral in het potentieel voor nog veel uitgebreidere metingen: een breed palet aan theoretische veron-derstellingen over hoe de natuur op fundamenteel niveau in elkaar steekt kan nu experimenteel getest worden. Figuur 1 illustreert de centrale rol van

het higgsboson in ons begrip van de natuur: in bijna elk onderdeel van de Lagrangiaanse bewegingsvergelij-king van de elementaire deeltjes in het standaardmodel speelt het higgs-boson een rol. In de gezamenlijke beschrijving van de elektromagneti-sche kracht en zwakke kernkracht (in rood – onderdeel van het oorspron-kelijke Brout-Englert-Higgsmecha-nisme), in de beschrijving van massa van de fermionen (in oranje – mid-dels de zogenoemde Yukawakoppe-lingen) en in de higgspotentialtermen

die het higgsveld in het vacuüm genereert (in blauw). Bij elk van deze rollen hoort een type higgsinteractie dat bestudeerd kan worden bij de LHC.

In de afgelopen tien jaar zijn de eigenschappen van het higgsboson met ongekende precisie in kaart gebracht. Ook zijn inmiddels veel meer higgsproductie- en vervalprocessen waargenomen dan ten tijde van de ontdekking. Figuur 2 illustreert één van een meer recent waargenomen uiterst zeldzaam higgsverval in de ATLAS-detector: het verval naar twee muonen. Figuur 3 geeft een overzicht van het niveau van detail en van de precisie die is bereikt met alle data die tot nu toe zijn verzameld: de werkzame doorsnede van higgsbosonproductie is gemeten in bijna veertig verschillende kinematische gebieden van zes verschillende productieprocessen en in acht vervalprocessen (niet afzonderlijk getoond). Elk van deze gemeten waardes is gevoelig voor één of meer higgsbosoneigenschappen, die zo verder getest kunnen worden.

De eenwording van de elektromagnetische en zwakke kernkracht

De eerste en tot nu toe meest precieze test van het standaardmodel is die van het Brout-Englert-Higgsmechanisme dat zowel de massa van de W- en Z-bosonen verklaart als een rol speelt bij de unificatie van de elektromagnetische en zwakke kernkracht. Dit mechanisme kan bestudeerd worden via metingen van de koppelingssterkte van het higgsboson aan de W- en Z-bosonen. Beide koppelingssterktes zijn nu bepaald met een precisie van 5% en consistent met de voorspelling van het standaardmodel van één complex higgsveld. De vroege waarneming van higgskoppelingen aan deze bosonen was ook de aanleiding voor de toekenning van de Nobelprijs voor de theoretische introductie van dit mechanisme in 2013. De uitdaging voor de komende jaren is om deze precisie verder op te voeren om te zoeken naar kleine afwijkingen van de verwachte waarde,

HIGGSONDERZOEK IN NEDERLAND

Via het samenwerkingsverband Nikhef hebben tientallen wetenschappers uit Nederland een breed spectrum aan belangrijke bijdragen geleverd. Voor de ATLAS-detector zijn diverse sporendetectoren gebouwd, zowel in de buitenste lagen (muonkamers), als in de binnenste lagen (de *end cap* van de op siliciumdetectoren gebaseerde halfgeleidertracker). Verder heeft Nikhef bijgedragen aan het ontwerp van de trigger en de data-acquisitiesystemen van het ATLAS-experiment en biedt het circa 10% van de totale rekenkracht van het ATLAS-experiment aan middels het Tier-1-rekencentrum in Amsterdam.

Onderzoekers uit Nederland hebben belangrijke bijdrages geleverd aan de ontdekkingsanalyse van het higgsboson in de ZZ- en WW-vervalkanalen. De statistische modelleringssoftware die een belangrijke rol heeft gespeeld in zowel de ontdekking als vrijwel al het higgsvervolgonderzoek aan de LHC (RooFit) is door Nederlandse onderzoekers ontwikkeld. Sinds 2012 hebben Nikhef-onderzoekers in belangrijke mate bijdragen aan of een leidende rol gehad in onderzoek aan higgseigenschappen in de WW-, ZZ-, bb-, cc-, $\mu\mu$ -, $\tau\tau$ -vervalkanalen, alsmede in de gecombineerde interpretatie van higgsdata.

Sinds 2012 zijn er 23 proefschriften over higgsonderzoek in ATLAS aan Nederlandse universiteiten voltooid, waarvan vier met het predicaat cum laude.

die bijvoorbeeld kunnen aangeven dat het higgsdeeltje niet elementair is of dat er zware partners van het higgsboson zijn.

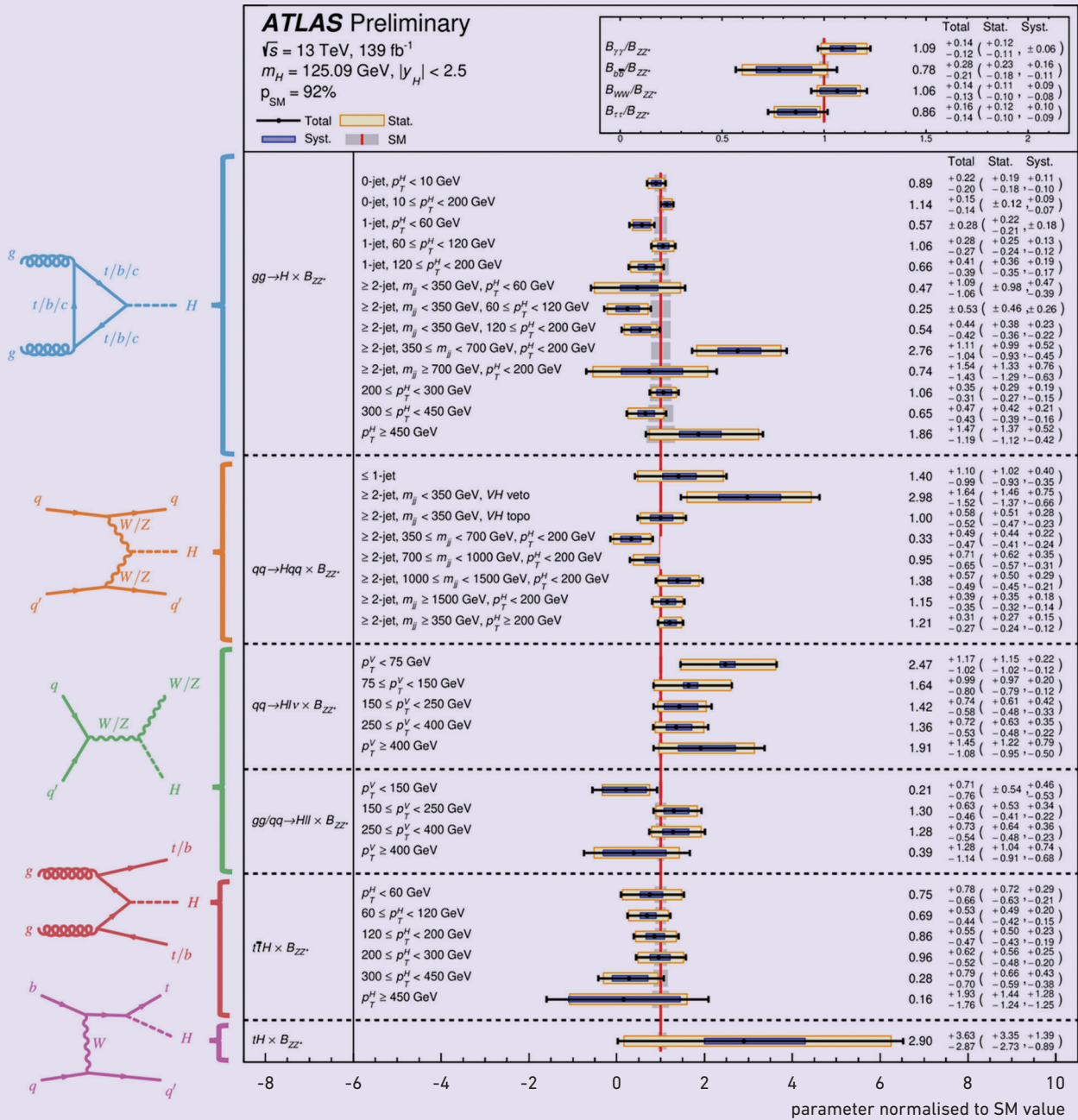
Het mysterie van de fermionmassa's

Een tweede test is die van de koppeling van het higgsboson aan fermionen. Deze koppeling raakt aan het mysterie van de waargenomen massa's van de fermionen. De massa's van quarks en leptonen, de bouwstenen van materie, zijn tot wel bijna een factor miljoen verschillend (en bijna een factor miljard als ook de neutrino's worden beschouwd). Het standaardmodel geeft geen verklaring voor deze massaverhoudingen, noch voor de intrigerende numerieke patronen die er lijken te zijn in de massaverhoudingen tussen de drie generaties van deze deeltjes. Alleen het allerzwaarste en kortstlevende van al deze deeltjes, het topquark, heeft een 'natuurlijke' massawaarde die overeenkomt met een dimensieloze koppelingssterkte van 1. Met de LHC-data kunnen we nu een eerste stap zetten in het onderzoek naar de oorsprong van deze massa's: we kunnen van vijf van deze fermionen expliciet de higgskoppelingssterkte meten, bijvoorbeeld door de vervalcanalen van het higgsbo-

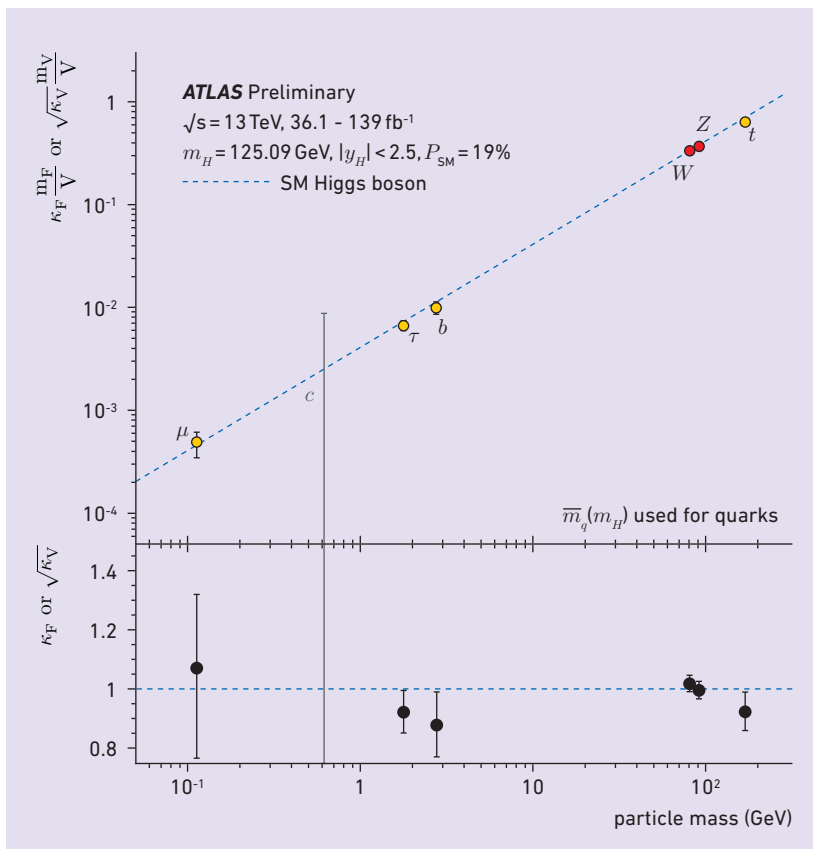
son naar het corresponderende paar fermionen te meten, en daarmee bepalen of de in het standaardmodel gepostuleerde Higgs-Yukawakoppelingen inderdaad de volledige massa van deze deeltjes verklaren. Figuur 4 geeft de huidige stand van zaken van deze metingen weer en laat zien dat binnen de zeer uiteenlopende en soms zeer grote meetonzekerheden het beeld vooralsnog consistent is met één higgsboson als oorsprong van massa.

Higgsdeeltje en donkere materie

Het higgsboson is ook een gevoelig instrument om een ander belangrijk raadsel van de natuur te besturen: waar is donkere materie van gemaakt? Is het higgsveld ook de oorsprong van de massa van deze donkere deeltjes? Zelfs zonder donkere-materiedeeltjes direct in de LHC waar te nemen zal het bestaan van higgskoppelingen aan deze deeltjes de eigenschappen van het higgsdeeltje beïnvloeden: bijvoorbeeld in de breedte van de higgsresonantie (voor lichte donkere materie) of door kleine afwijkingen in andere higgskoppelingen. Dankzij nieuwe meetmethoden die in de afgelopen tien jaar zijn ontwikkeld, is de nauwkeurigheid van metingen



Figuur 3. Gemeten werkzame doorsnede van het higgsdeeltje in de ATLAS-detector, voor de verschillende productieprocessen die schematisch zijn weergegeven aan de linkerzijde. Alle getoonde waarden zijn relatief ten opzichte van de theoretische verwachting: een gemeten waarde van één betekent dat de gemeten waarde exact overeenkomt met het standaardmodel. Afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid data per proces, is de gemeten werkzame doorsnede verder onderverdeeld in één of meer kinematische gebieden, die gekozen zijn om extra gevoeligheid te introduceren voor mogelijke afwijkingen van de natuur ten opzichte van het standaardmodel.



Figuur 4. Koppingssterkte van het higgsdeeltje ($\kappa_F m_F/v$ voor fermionen en $\sqrt{\kappa_V} m_V/v$ voor bosonen) voor vijf verschillende fermionen (c-,b-,t-quarks en μ -, τ -leptonen) alsmede de W- en Z-bosonen, uitgezet tegen de waargenomen massa van deze deeltjes. De zogenoemde Yukawakoppelingen in het standaardmodel geven een lineair verband tussen de koppeling en de massa van fermionen. De getoonde koppingswaarden zijn bepaald uit de dezelfde gezamenlijke meting als getoond in figuur 3, met uitzondering van die van de charm-quarkkoppeling, die later afzonderlijk bepaald is. Om de consistentie van de metingen met het standaardmodel beter te kunnen aflezen is op de onderste helft van de figuur de relatieve koppingssterkte ten opzichte van de standaardmodelvoorspelling (κ_F voor fermionen of $\sqrt{\kappa_V}$ voor bosonen) afgebeeld voor elke gemeten koppeling.

van de lijnbreedte van higgsverval sterk verbeterd: de precisie is met bijna een factor duizend omhoog gegaan. Zo komt experimentele gevoeligheid voor kleine afwijkingen in beeld.

Het higgsveld en het vacuüm

Ten slotte is er het meest mysterieuze aspect van het higgsdeeltje: de precieze vorm van de higgspotentiaal, die het higgsveld in het vacuüm genereert. Die vorm speelt een belangrijke rol in kosmologische modellen van de evolutie van het vroege heelal en bepaalt ook of het huidige minimum van de higgspotentiaal het absolute minimum is (stabiel

heelal), dan wel of er een tweede lager minimum bestaat (metastabiel heelal). Deze potentiaalterm (zie blauw kader in figuur 1) vertegenwoordigt de koppeling van het higgsdeeltje aan zichzelf en daarmee de mogelijkheid dat een higgsdeeltje vervalt in twee higgsdeeltjes. Deze zelfkoppelingseffecten zijn uiterst zeldzaam en zijn daarom nog niet waargenomen. Tot kort geleden werden deze zelfkoppelingmetingen pas in de tweede helft van het volgend decennium haalbaar geacht bij de toekomstige high luminosity LHC, maar recente doorbraken in analyse- en interpretatietechnieken hebben de gevoe-

ligheid van de metingen meer dan verdubbeld, zodat mogelijkwerwijs al voor het einde van 2025 de resultaten voldoende precies zijn om enkele exotische vormen van de higgspotentiaal experimenteel uit te sluiten.

Vooruitblik

De schat aan resultaten die het higgsonderzoek aan de LHC heeft voortgebracht is beschreven in ruim driehonderd publicaties van de ATLAS- en CMS-experimenten. Het is daarmee duidelijk dat de ontdekking van het higgsboson het beginpunt is geweest van een rijk en uitdagend onderzoeksprogramma, waarmee nog veel openstaande vragen over ons begrip van elementaire deeltjes kunnen worden beantwoord. De LHC-experimenten zijn momenteel halverwege hun levensduur in jaren, maar hebben nog slechts 5% van de verwachte data verzameld. Dankzij de geplande upgrades van zowel de versneller als de experimenten, zal in de komende tien tot vijftien jaar nog twintig keer meer data worden verzameld dan nu beschikbaar zijn. Geïnspireerd door de rijkdom aan verschillende waarneembare higgsvervalen, die door de lage massa van het higgsboson in experimenteel bereik zijn gebleken, hebben onderzoekers een veelheid aan nieuwe theoretische en experimentele analysetechnieken ontwikkeld die het onderzoek enorm versneld en verbeterd hebben. Veel van de huidige resultaten lopen nu jaren vooruit op de meest optimistische voorspellingen van tien jaar geleden. Het einde van deze stroom van nieuwe technieken is nog lang niet in zicht en zal de komende tien jaar wederom vele grote verbeteringen laten zien én hopelijk tot een of meer baanbrekende verrassingen leiden.

Wouter Verkerke is programmaleider van de ATLAS-onderzoeksgroep bij het Nikhef-samenwerkingsverband. Wouter is ook bijzonder hoogleraar statistische data-analyse in de elementaire-deeltjesfysica aan de Universiteit van Amsterdam.
verkerke@nikhef.nl