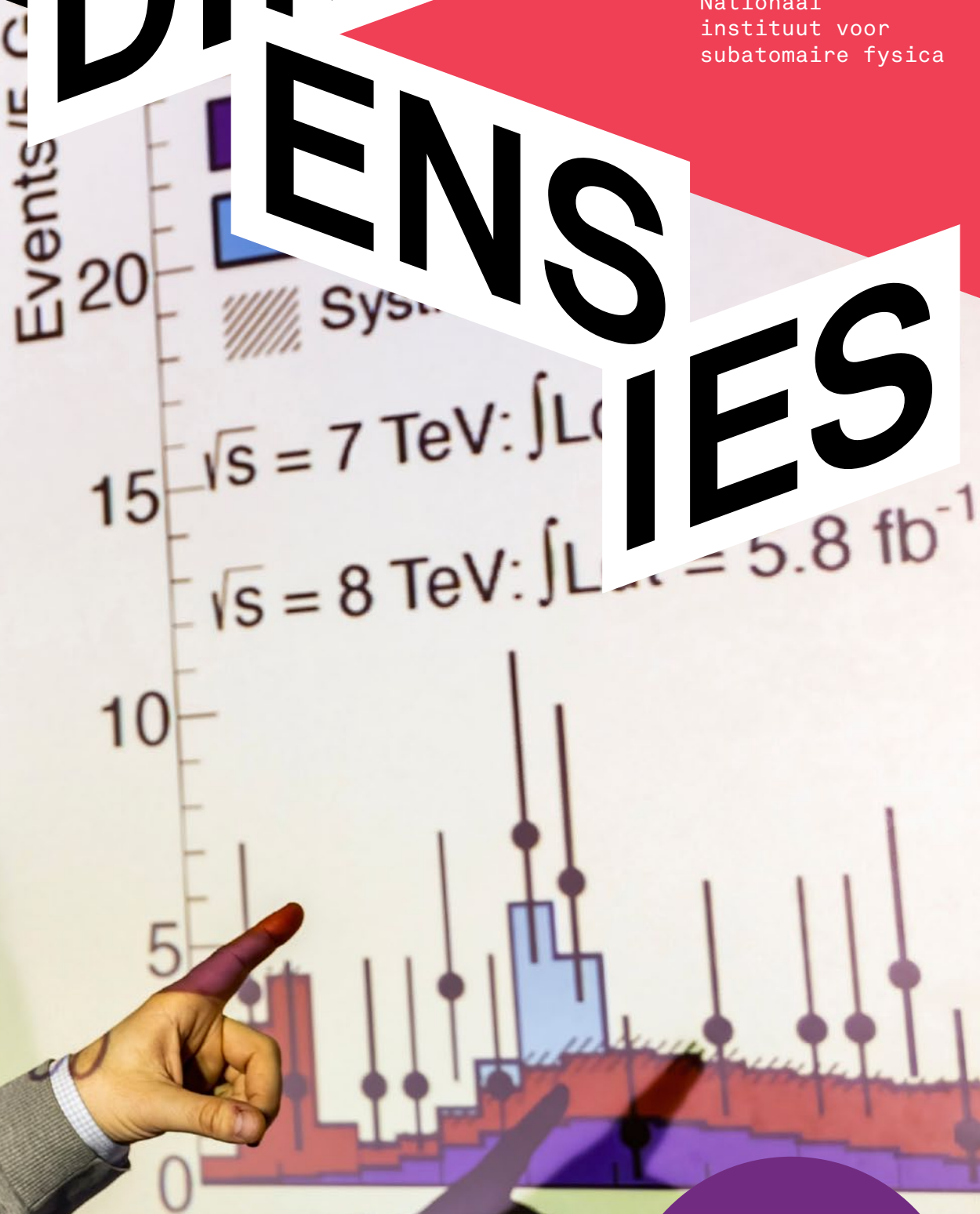


Voorjaar
2022

DIM ENS IES

Nikhef

Nationaal
instituut voor
subatomaire fysica



**TIEN JAAR
HIGGS**

Nog volop vragen
over het cruciale
deeltje



Bouwen aan een proeftuin voor zwaartekrachtsgolftechnologie

Al sinds 2018 wordt hard gewerkt aan ETPATHFINDER: het R&D-lab voor zwaartekrachtsgolftechnologie in Maastricht. Hier zullen wetenschappers en technici vanaf 2023 technologieën testen en ontwikkelen voor de meest geavanceerde zwaartekrachtsgolfdetectoren, zoals de toekomstige Einstein Telescope. Afgelopen november opende minister Van Engelshoven nog feestelijk de cleanroom in Maastricht. Nu is daar de opbouw van de torens en buizen te zien die het vacuümsysteem vormen.

Foto's: Stefan Hild

Degenen die de kans hebben om dit voorjaar een kijkje te nemen zien waarschijnlijk een klein groepje mensen in blauwe pakken. Met behulp van kranen zetten ze de torens in elkaar waarin straks de cruciale onderdelen van het lasersysteem komen te hangen. Ook testen ze of de verbindingen wel echt luchtdicht zijn en een vacuüm aankunnen. In de zomer zal het complete vacuümsysteem van torens en buizen er staan. Daarna komen de lasers, *cryogenics*, optica en tot slot de geavanceerde spiegels.

Het lab staat in Maastricht, maar toch is ETPATHFINDER geen puur Limburgse of Nederlandse aangelegenheid. In totaal werken zo'n 105 mensen bij 21 verschillende onderzoeksinstellingen verspreid door Europa aan

onderdelen en prototypes. Terwijl een deel van de laserinstallatie in Nederland wordt voorbereid, staat een ander deel in Hannover klaar om verzonden te worden. En onderdelen voor het vacuümsysteem zijn aangeleverd door verschillende bedrijven in Europa. In Maastricht komt het uiteindelijk allemaal bij elkaar.

ETPATHFINDER is ook geen statische opstelling, maar een dynamisch geheel. Nu al lopen er experimenten en onderzoeken die publicaties kunnen opleveren. En als de beginopstelling er volgend jaar staat, blijft het daar niet bij. Juist het testen en uitproberen van verschillende opstellingen hoort bij ETPATHFINDER. Zo kan het lab straks 20 jaar lang als proeftuin dienen voor zwaartekrachtsgolfonderzoek wereldwijd.



Tien jaar higgsdeeltje

Op 4 juli deze zomer is het tien jaar geleden dat op CERN de ontdekking van het higgsdeeltje werd aangekondigd. Een dag om nooit te vergeten. Even was de deeltjesfysica wereldnieuws. Ook hier op Nikhef, nauw betrokken bij de higgsjacht, buitelden journalisten en media over elkaar heen voor interviews en uitleg. Overal camera's en microfoons.

In dit nummer van het Nikhef-magazine DIMENSIES gaat het onder meer over de komende herstart van de LHC-versneller op CERN, want het werk gaat door. En vertellen we over de belangrijke banden van Nikhef met de industrie.

Maar we halen om te beginnen ruim herinneringen op aan die bewogen dag tien jaar geleden. Een dag die niet het sluitstuk van de deeltjesfysica was, maar vooral een opwindend nieuw begin. Sindsdien proberen we uit alle macht de nieuwkomer onder de deeltjes goed te leren kennen. Werk voor talloze fysici dat nog jaren in beslag zal nemen.

Ikzelf was destijds niet op CERN maar op Nikhef in Amsterdam. De avond voor de bekendmaking kwam ik terug op Schiphol van een trip naar Sicilië waar ik Peter Higgs had ontmoet voor filmopnames. Een saillante ontmoeting. Ik wist al van onze ontdekking, maar mocht er absoluut nog niks over zeggen. In de film laat ik Higgs wel een grafiek zien, maar dat zijn metingen van een halfjaar eerder. Hij had er weinig oog voor.

Tijdens een lunch op Sicilië werd Higgs gebeld door CERN. Dat hij echt op 4 juli in Genève moest zijn. Ik zag hem aarzelen. Hij was moe, wilde naar huis. Ik heb toen toch maar aangedrongen dat hij echt moest gaan.

Op 4 juli zag ik Peter op de live-beelden uit Genève. In tranen. Een prachtig moment, nog steeds.

Stan Bentvelsen, directeur Nikhef

Over Nikhef

Nikhef is het Nationaal instituut voor subatomaire fysica. Het instituut doet onderzoek naar de elementaire bouwstenen van ons universum, hun onderlinge krachten en de structuur van ruimte en tijd.

Nikhef zoekt naar antwoorden op de grote natuurkundige vragen van deze tijd. Uit welke fundamentele bouwstenen bestaat de wereld om ons heen? Hoe is ons heelal ontstaan? Wat zijn de grondbeginselen van de natuurwetten? Het onderzoek vindt plaats bij deeltjesversnellers als de Large Hadron Collider op CERN en met detectoren in de hele wereld voor kosmische deeltjes, donkere materie en zwaartekrachtsgolven.

Nikhef is een samenwerkingsverband op het gebied van (astro)deeltjesfysica tussen de institutenorganisatie van NWO en zes universiteiten: de Radboud Universiteit, de Rijksuniversiteit Groningen, de Universiteit van Amsterdam, de Universiteit Maastricht, de Universiteit Utrecht en de Vrije Universiteit Amsterdam.

Postbus 41882	Science Park 105
1009 DB Amsterdam	1098 XG Amsterdam
info@nikhef.nl	+31 (0)20 592 2000

DIMENSIES voorjaar 2022

REDACTIE

Martijn van Calmthout, Vanessa Mexner, Martine Oudenhoven, Melissa van der Sande

AAN DIT NUMMER WERKTEN MEE

Joan Berger (foto's), Bob Bronshoff (foto's), Harry Heuts (foto's), Stefan Hild (foto's), Marco Kraan (foto's), Gieljan de Vries (tekst)

ONTWERP EN VORMGEVING

Enchilada (ontwerp), Naïm Niebuur studio (vormgeving)

OP DE COVER

Nikhef-onderzoeker Ivo van Vulpen laat ATLAS-resultaten van de higgs-piek zien.

Foto: Bob Bronshoff



Higgsdeeltje tien jaar jong

Deze zomer is het tien jaar geleden dat op CERN het higgsdeeltje werd gevonden. Het begin van een nieuw hoofdstuk in de deeltjesfysica.

Rolf Heuer, directeur-generaal van deeltjeslab CERN in Genève, pakt de microfoon en kijkt de zaal in. Naast hem staan Joe Incandela en Fabiola Gianotti, woordvoerders van de twee grote experimenten op CERN die net hun nieuwste resultaten hebben onthuld: CMS en ATLAS.

Als leek, zegt Heuer schalks, zou ik denken: we hebben hem, wat vinden jullie? De zaal grinnikt om het toneelstukje en barst dan in applaus uit.

Camera's zwenken naar een oudere heer op rij vijf. Die pakt een witte zakdoek en dept de tranen achter zijn bril. Peter Higgs. De man van. 'Ik had niet verwacht dat ik dit nog zou meemaken', zal hij even

later bedeesd zeggen in een microfoon die hem wordt voorgehouden.

Het is 4 juli 2012 en de deeltjesfysica is wereldwijd voorpaginanieuws. Journaals openen ermee. In Nederland met de bijeenkomst eerder die dag bij Nikhef in Amsterdam, waar een zaal bomvol natuurkundigen en journalisten de aankondiging in Genève op een groot scherm volgde.

Decennia is er op CERN en elders gezocht naar tastbaar bewijs voor de theorie van Peter Higgs en anderen die vertelt hoe elementaire deeltjes aan hun specifieke massa's komen. Via een higgsdeeltje. En nu is dat bewijs er. Hard en onmiskenbaar. Detectoren hebben in Genève in de

botsingen van protonen een nieuw deeltje gevonden dat keurig voldoet aan het signalement van een dergelijk higgsdeeltje.

Als de euforie wat is geluwd, neemt Heuer opnieuw het woord. Hij heeft na de presentaties nog één slide met een paar eigen opmerkingen. De ontdekking is een wereldwijde gezamenlijke inspanning. Te danken aan de geweldige LHC-versneller. Aan de experimenten ATLAS en CMS. Aan de datanetwerken. En het belangrijkste: vandaag is een historische dag, maar slechts het begin van veel meer.

Tien jaar na die historische dag in de zomer van 2012 zullen deeltjesfysici de

komende 4 juli wereldwijd de verjaardag van het centrale deeltje in hun vak op tal van manieren vieren. Er zullen symposia zijn. Feestjes. Er zullen herinneringen worden opgehaald. In Genève en op andere labs. Op universiteiten. In Amsterdam markeert Nikhef de tiende *higgs-dependance day* met een nachtelijk *landmark* op het Science Park.

Deze zomer is het gevonden deeltje tien jaar jong, zeggen de meeste higgsonderzoekers op de vraag waar de wetenschap nu staat. Het deeltje is inderdaad een higgsdeeltje, zoals de theorie het had voorzien. Veel eigenschappen ervan zijn inmiddels in kaart gebracht of worden nog



‘De aanloop was verbluffend’

Pamela Ferrari,
Nikhef-staf, adjunct fysica-
coördinator ATLAS op CERN.

‘We zouden de ATLAS-resultaten aanvankelijk presenteren op de grote ICHEP-conferentie in Melbourne, maar uiteindelijk werd besloten om de higgs-ontdekking aan te kondigen in Genève, samen met CMS. Ik zag de bekendmaking dus vanuit Australië, met honderden collega's uit de hele wereld. Dat was een emotioneel moment, zeker. Iedereen blij. Maar eerlijk gezegd voor mij niet zo sterk als toen we een week daarvoor bij de *unblinding* van de nieuwe data de higgs-piek met 5 sigma zagen uitsteken. Weer scherper dan de keren ervoor, met toen nog minder data. Het was echt verbluffend om in een paar maanden tijd het bewijs zo te zien groeien. Zelf werkte ik in die tijd aan het verval van het higgsdeeltje naar twee W-deeltjes, met een team van jonge onderzoekers op Nikhef. We gebruikten voor het eerst ook zelflerende algoritmes, waarmee we het signaal nog beter

hoopten te kunnen zien. Na de ontdekking hebben we dat ook gebruikt om als eersten de spin van het higgsdeeltje goed te meten: nul, zoals je verwacht van een scalair boson. Een hard bewijs dat we echt een higgsdeeltje hadden gevonden. De ontdekking van het higgsdeeltje was voor mij vooral een begin van veel spannende nieuwe vragen. Grote vragen, bijvoorbeeld over de reden dat het heelal uit materie bestaat en niet uit antimaterie. Zit die asymmetrie al in het higgsdeeltje? We staan echt nog maar aan het begin van antwoorden. De LHC-versneller zullen we tot het eind nodig hebben om precies genoeg te kunnen meten en analyseren. Mijn vraag aan het higgsdeeltje? Wat voel je van een ander higgsdeeltje? De higgs-zelfkoppeling vertelt ons hoe het higgsveld het vacuüm van het universum vult. Dat is nog niet te meten, maar wel superspannend. Al was het maar omdat kan blijken dat het universum metastabiel is en de lege ruimte elk moment spontaan kan condenseren tot een zee van higgsdeeltjes.’



CERN, 4 juli 2012

Rolf Heuer, voormalig directeur-generaal CERN, emeritus-hoogleraar

‘Op 4 juli 2012 stond ik in het brandpunt van de gebeurtenissen. Ik was als CERN directeur-generaal voorzitter van het seminar waar we de ontdekking van het higgsdeeltje aankondigden. In een bomvol auditorium, camera's. De ogen van de wereld op ons gericht. En terecht, we hadden hem. Een rechtstreekse rol in de ontdekking van het higgsdeeltje had ik niet, anders dan als directeur van het laboratorium waar het allemaal gebeurde. Ik noemde mezelf zelfs min of meer een leek tussen alle experts. De man die de microfoon aanreikt. Maar ik was ontroerd en opgewonden tegelijk, om bij zo'n belangrijke ontdekking te mogen zijn, gebaseerd op vele jaren werk van zoveel mensen over de hele wereld. En niet te vergeten met Peter Higgs en François Englert in de zaal. Als emeritus blijf ik gelukkig nog betrokken bij die prachtige gemeenschap, via internationale reviewcommissies en

‘Je voelde de ogen van de wereld’

adviesorganen.

De ontdekking was een sluitstuk, het higgsdeeltje is het laatste deeltje dat nog miste in het Standaardmodel. Tegelijk was de ontdekking ook het begin van het zoeken naar een nieuwe beschrijving of nieuw inzicht in een aantal vragen die het Standaardmodel onbeantwoord laat. Het deeltje is minstens zo belangrijk als we toen al dachten. Het bestuderen van zijn eigenschappen kan licht werpen op fysica voorbij het Standaardmodel. En vergeet niet dat het een fundamenteel scalair boson is, een elementair deeltje met spin nul. Het enige dat we in de natuur kennen. Alleen dat is alle studies al waard. Als ik een vraag mag stellen aan het higgsdeeltje, is dat toch de voor de hand liggende: ben je eenzaam of heb je familie en ben je trouwens niet geïnteresseerd om te koppelen met donkere materie? Vooral dat laatste houdt me nog steeds bezig. We weten dat donkere materie er is. Maar waaruit bestaat die dan? Ik hoop het antwoord, wat het ook is, ooit nog mee te mogen maken.’



Wouter Verkerke, programmaleider ATLAS bij Nikhef, hoogleraar aan de UvA.

‘Op 4 juli 2012 was ik op Nikhef. Samen met heel veel collega's en pers volgde ik de live-stream van de CERN-bijeenkomst vanuit het auditorium in Genève. De bekendmaking was een tamelijk surrealistisch moment. De ontdekking van het higgsdeeltje was zo groots, zowel vanwege de wetenschappelijke betekenis als vanwege de hoeveelheid werk die erin zat. Het voelde heel onwerkelijk dat het opeens allemaal over was. Pas een paar dagen later kwam het gevoel van trots, dat wij dus het higgsdeeltje hadden ontdekt. Zoiets maak je maar een keer in je leven mee. Mijn betrokkenheid bij de higgsjacht begon vijf jaar daarvoor. Ik had in mijn Amerikaanse tijd een toolkit ontwikkeld, software waarmee je heel verschillende datasets en modellen kunt combineren. Cruciaal. Onze ‘RooFit’ toolkit wordt overal gebruikt, bij ATLAS en CMS. Daarnaast was ik ook betrokken bij het zoeken

‘De bekendmaking was tamelijk surrealistisch’

naar het verval van het higgsdeeltje naar twee W-deeltjes, een van de drie belangrijke vervalskanalen. Wel de lastigste. Mijn promovendus Stefan Gadatsch en ik werkten samen aan onze analyses. Het was tijdrovend en haalde net niet de presentatie van ATLAS, terwijl we de nacht ervoor nog helemaal hadden doorgehaald. Het resultaat zat wel in het artikel dat een maand later verscheen. Het extra W-kanaal maakte de ontdekking statistisch nog sterker. Ik realiseer me vaak hoe mooi het gevonden higgsdeeltje is voor de experimentele fysica. Bij de gevonden massa is er heel veel te meten aan de eigenschappen, werk te over dus voor onze groep van twintig stafleden en promovendi. Mijn belangrijkste vraag aan het higgsdeeltje? Of het iets te maken heeft met de kosmische inflatie, vlak na de oerknal. Dat weten we echt niet. We weten überhaupt niet hoe Moeder Natuur de problemen van het Standaardmodel heeft opgelost. Is er nog een tweede soort higgsdeeltje bijvoorbeeld? Daar hoop ik wel eens op.’



‘Het was een historisch moment’

Frank Filthaut, programmaleider ATLAS bij Nikhef, universitair hoofddocent Radboud Universiteit Nijmegen

‘4 juli 2012 was de eerste dag van een al heel lang geplande zomer-vakantie. Ik voer met mijn gezin op een boot van Calais naar Dover en miste dus het grote moment. Natuurlijk was ik daar niet heel blij mee, en aan de eerste vakantiekiekjes is dat ook wel te zien. De vakantie was toch nog wel aangenaam, hoewel ik zelfs onderweg nog een artikel

over het higgsdeeltje heb geschreven voor het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde. Vooral uit vrees trouwens dat anderen onze analyse van de higgsfysica misschien niet goed zouden uitleggen. Zelf had ik van 2008 tot dat moment de higgsjacht op Nikhef geleid, met de ATLAS-detector. Dat was via de vervalskanalen naar W- en naar Z-deeltjes, en ik werkte zelf in het bijzonder aan het vervalskanaal met W-deeltjes. Op 27 juni, een week voor de bekendmaking dus, kregen we na uitvoerige checks de data daarvan te zien en zagen die-

zelfde avond nog het higgs-sigitaal. Ons resultaat haalde helaas niet de presentatie van Fabiola Gianotti voor ATLAS. Waarvan we de globale uitkomst dus vooraf al wel wisten: higgs met vijf sigma. Ik had zelf best gemengde gevoelens over die uitkomst. We waren natuurlijk trots dat we hadden bijgedragen aan dit historische moment in de natuurkunde. Maar stiekem had ik eigenlijk gehoopt dat we juist niks zouden vinden. Dat was een bewijs op zich geweest dat er meer fysica dan het Standaardmodel moest bestaan.

Tegelijk is het higgsdeeltje natuurlijk precies zo belangrijk als we tien jaar geleden zeiden. Niemand twijfelt er nog aan dat het higgsveld andere deeltjes massa geeft. Al zijn er in de “details” nog legio interessante dingen te bestuderen. Het komt dus vooral aan op precisiefysica. Ik ben niet zo van de hypothetische vragen, maar mijn vraag aan het higgsdeeltje zou zijn: bij welke massa vinden we uw familie? Het minste waar ik echt op hoop is een serieuze aanwijzing dat de higgs-sector anders is dan het Standaardmodel voorspelt.’



Englert en Higgs tijdens de bekendmaking in 2012 op CERN

deeltjeswereld, die in de jaren zestig door een aantal theoretisch natuurkundigen was geformuleerd. Onder hen de bescheiden en wat verlegen Britse theoreticus Peter Higgs, naar wie tot zijn eigen schrik de theorie en het deeltje uiteindelijk vernoemd zouden worden. Higgs en bijvoorbeeld de Belgen François Englert en Robert Brout leverden min of meer gelijktijdig een oplossing voor een groot probleem in de deeltjestheorie, die eerder alleen voor deeltjes zonder massa leek te werken.

Hun theorie komt erop neer dat het universum doortrokken is van een zogeheten scalarveld, dat deeltjes hun massa influeert. Dat veld is zelf niet meetbaar, een verzameling getallen in de ruimte. Maar het was vooral Higgs die midden jaren zestig als eerste voorrekende dat in zo'n getallenveld mogelijk meetbare deeltjes kunnen opduiken, als golven op zee. Wie de golf spot, weet direct dat de zee er ligt.

steeds intensief onderzocht door generaties natuurkundigen die de ontdekking al niet eens meer hebben meegemaakt. Maar veel vragen zijn nog niet beantwoord. Dat is vaak een kwestie van lange adem en veel geduld. Zelfs de vraag of dit higgsdeeltje het enige in zijn soort is, of dat er

nog meer higgsdeeltjes zijn, is nog steeds geen uitgemaakte zaak.

Tien jaar geleden was de ontdekking toch vooral een opluchting voor veel natuurkundigen. Het bestaan van het deeltje bevestigde een theorie over de

Higgs' artikel uit 1964 is een uitnodiging aan experimentatoren. Vind een onbekend deeltje met de juiste eigenschappen, en we begrijpen hoe deeltjes massa kunnen



‘Die dag is mijn vak begonnen’

Jorinde van de Vis,
voorheen Nikhef-
promovendus, nu postdoc
DESY, Hamburg

‘2012 was ik tweedejaarsstudent natuurkunde in Leiden. Ik werkte geloof ik aan een essay over de geschiedenis van de wiskunde. Ik zag het nieuws van CERN op de televisie, die avond. Ik voelde vooral nieuwsgierigheid. Ik wilde meteen weten wat dat higgs-deeltje voor een ding was. Op het journaal en de kranten zag ik ook dat er Nederlanders aan werkten. Ik had overigens nog geen idee dat zij ooit mijn collega’s zouden zijn en dat ik zelf aan het higgs-deeltje zou gaan werken. Maar aan de ontdekking heb ik dus precies niks bijgedragen. Ik zou haast denken dat het higgsdeeltje nu nog belangrijker is dan tien jaar geleden. In die tijd verwachtten fysici nog dat er veel meer nieuwe deeltjes gevonden zouden worden. Dat gebeurde echter niet. En dus weten we nog steeds niet wat donkere materie is, waar de

massa’s van neutrino’s vandaan komen, waarom er veel meer materie is dan antimaterie. Het lijkt erop dat het higgsdeeltje de sleutel naar al die fundamentele vragen kan zijn. Mijn vraag aan het higgsdeeltje is simpel: met welke nog onbekende deeltjes heb je interacties? Maar dat is stiekem natuurlijk gewoon de vraag die altijd speelt in ons vak, zijn er meer deeltjes die onze open vragen wel kunnen beantwoorden? Voor mijn eigen vak, de kosmologie, kijk ik eigenlijk vooral uit naar de eerste metingen van zwaartekrachtsgolven uit de episode na de oerknal waarin deeltjes in een fasovergang massa kregen. Dat zou een test zijn voor mijn ideeën over de rol van het higgsdeeltje in het allervroegste universum. De ontdekking van het higgsdeeltje is ongeveer het begin geweest van het onderzoeksgebied waarin ik nu werk. Dat het higgsdeeltje bestaat en hoe het higgsveld koppelt aan andere deeltjes moet je weten om modellen voor het vroege universum te kunnen maken.’

‘Voor mij een soort sluitstuk’



Frank Linde,
programmamaleider
zwaartekrachtsgolven bij
Nikhef, voormalig Nikhef-
directeur

‘Ik was als Nikhef-directeur natuurlijk bij de bekendmaking op Nikhef, maar het mooiste moment was later die dag, toen ik Chinees ging afhalen in Almere. Een andere klant, een grote kerel, draaide zich om en wees naar mij en riep “Higgs!”. Terwijl we op onze bestelling wachtten, hadden we een goed gesprek over quantummechanica. Fantastisch, die man maakte mijn dag. Plus natuurlijk het achtuurjournaal en de kranten de volgende morgen. Mijn eigen bijdrage aan de ontdekking was vooral het realiseren van de ATLAS-detector jaren eerder, met forse inbreng van Nikhef. We bouwden grote delen van de muondetector, met alles erop en eraan, hardware, diagnostiek, software, monitoring. Ontwerpen, maken en testen, dat is mijn ding. Grappig is wel dat ik ooit als jonge postdoc een avond in begin 1990 dacht dat ik zelf het higgsdeeltje kon vinden in de

LEP-luminositeitsdata waaraan ik toen werkte. Ik woonde destijds bij CERN en opgewonden reed ik direct naar CERN om te kijken of ik een higgs-piek kon vinden. Na een hele nacht analyseren: helaas niet. De echte ontdekking van het higgsdeeltje was natuurlijk een kick. Het is een essentieel onderdeel van het Standaardmodel. Maar voor mij eerlijk gezegd was de ontdekking ook wel een soort sluitstuk. Deze higgs blijkt wel heel, heel, heel erg een standaard-higgs. Ik hoop natuurlijk dat er een moment komt dat ze wel afwijkingen vinden. Maar voor mij raakte de lol er wat vanaf. Uiteindelijk ben ik iets anders gaan doen. Zwaartekrachtsgolven dus. De bouw van de Einstein Telescope, hopelijk in Zuid-Limburg of ergens anders. Daar kunnen we nieuwe vragen mee beantwoorden. Mijn vraag aan het higgsdeeltje kan van alles zijn. Bestaat God? Kun je een etentje voor mij en mijn vrouw regelen met Julia Roberts en George Clooney? Of meer in de natuurkunde: hoe kan het heelal oneindig groot zijn als het higgsveld zoveel energie bevat als de theorie beweert?’



Moment van bekendmaking in 2012 op Nikhef

hebben. Uiteindelijk duurt het bijna een halve eeuw. Duizenden mensjaren gaan er zitten in de bouw van nieuwe versnellers, nieuwe detectoren, nieuwe meetmethodes.

Tot het in 2012 met de twee reuzen-detectoren en protonen uit de vier jaar oude Large Hadron Collider in Genève lukt. Er worden genoeg sporen van een scalair boson gevonden, een deeltje zonder spin dat op de voorspelde manier uiteenspat, om te concluderen dat het een higgs-deeltje kan zijn. Het deeltje heeft een massa van zo'n 125 GeV, grofweg evenveel als tweeënhalve ijzeratomen.

De ontdekking is een triomf voor de natuurkunde, die als een bulldozer het landschap van de subatomaire wereld heeft afgeplagd, op zoek naar onbekende deeltjes. Bij het begin van de Large Hadron Collider wisten natuurkundigen, ook door metingen met de eerdere LEP-versneller op CERN, vrij zeker: als het higgsdeeltje

bestaat, gaan we het met de nieuwe versneller vinden. De ontdekking was in dat perspectief niet eens de grootste denkbare verrassing. Géén higgsdeeltje zou een nog grotere ontdekking zijn geweest, en een aansporing om op zoek te gaan naar een andere, betere theorie voor de werking van de deeltjeswereld.

In de tien jaar sinds 2012 zijn inmiddels in de LHC-versneller vele miljoenen higgs-deeltjes gemaakt door protonen hard genoeg op elkaar te schieten. Tienduizenden van die gebeurtenissen zijn opgepikt en bekeken door ATLAS en CMS, die als enorme camera's de botsingen in hun binnenste in groot detail observeren. De experimenten publiceerden beide al meer dan duizend wetenschappelijke artikelen over wat ze zagen en zien, over het higgsdeeltje en andere onderwerpen. Geleidelijk wordt duidelijk wat dit higgs-

deeltje voor eigenschappen heeft en hoe het zich gedraagt.

Keurig, is tot nog toe het antwoord dat voor sommige natuurkundigen een beetje als een teleurstelling geldt. Het gevonden higgsdeeltje houdt zich zo netjes aan de theorie, dat het meer als een oude bekende overkomt dan een interessante nieuwkomer. De massa is volgens sommige theoretici wat aan de lage kant, maar ook weer niet heel merkwaardig. En de manier waarop het zich verhoudt tot de andere elementaire deeltjes kan haast niet eenvoudiger.

De meest voor de hand liggende higgs-theorie voorziet dat het higgsveld sterkere banden met deeltjes onderhoudt naarmate die zwaarder zijn. Zulke koppelingen zijn inmiddels bij ATLAS en CMS gemeten voor een flink aantal van de zwaardere deeltjes uit het Standaardmodel, van de zware top- en bottom-quarks tot de W- en Z-deeltjes



‘Ik dacht opeens: het is echt waar’

Ivo van Vulpen,
deputy programme leader
ATLAS bij Nikhef, universitair
hoofddocent UvA

‘Ik zat die dagen thuis in Leiden na een knieoperatie, maar Nikhef had heel vriendelijk een taxi geregeld zodat ik toch in Amsterdam bij de live-stream van de bekendmaking kon zijn. Een heel opwindend moment, met terecht champagne voor de collega’s. De emotie van dat moment was eigenlijk wel gek. Ik gaf al jaren college deeltjesfysica aan masterstudenten en legde daar netjes symmetriebreking en het higgsmechanisme uit. Ik herinner me dat ik op 4 juli letterlijk dacht: dus het is allemaal echt waar! Het meest mythische deeltje uit de natuurkunde bestaat. Er was dus werkelijk een veld dat iedere kubieke meter van het universum doordrenkt en dat het heelal tot de dag van vandaag vormgeeft. Dat doet wat met je. Mijn rol bij de ontdekking was niet heel groot, al staat mijn naam wel op de paper. Ik werkte samen met een promovendus, Egge van der Poel, aan een tech-

niek om vier muonen uit dezelfde botsing te vinden tussen alle botsingen. Het idee was dat een higgsdeeltje naar twee Z-deeltjes vervalt, die elk in twee muonen vervallen. We werkten echt met de allereerste data, dat was wel een kick. Later hebben anderen dat opgepakt en werd higgs naar ZZ een belangrijk kanaal bij de ontdekking. Tegenwoordig zijn higgsdeeltjes volkomen normaal, de LHC produceert ze voortdurend en ATLAS ziet hun sporen. Mijn onderzoek is gericht op de levensduur van het higgsdeeltje. Theoretisch is die goed bekend. Als we afwijkingen vinden kan dat een teken zijn dat er nog onbekende deeltjes in het spel zijn. De levensduur is maar een van de talloze eigenschappen van het higgsdeeltje die we nog jaren zullen moeten onderzoeken om echt te begrijpen wat dit voor een ding is. Mijn vraag aan het higgsdeeltje is daarom: zijn er zwaardere deeltjes die je ook massa geeft maar die wij nog niet zien? Wat dat betreft is iedere nieuwe ontdekking welkom.’



‘Dit deeltje is een breekijzer’

Nicolo de Groot,
hoogleraar Radboud
Universiteit Nijmegen,
destijds programme leader
ATLAS bij Nikhef

‘Zoals veel collega’s was ik die woensdag op Nikhef, en keek daar naar de live-stream vanuit Genève. Mijn emotie was er een van opluchting. Eindelijk! Mijn masterscriptie ging over higgs. Mijn eerste publicatie. Al mijn onderzoek sindsdien. Na al die jaren werk was dit een heerlijk moment. Met mijn promovendus Antonio Salvucci had ik in de aanloop gewerkt aan de zoektocht naar higgsdeeltjes die naar vier leptonen vervallen. Nikhef was goed in muonkamers en de software. Vier leptonen is een heel schoon verval, met weinig achtergrond. Maar als je te streng selecteert is het niet heel erg efficiënt. In 2011 hadden we daardoor nog weinig. Maar we lieten de criteria wat los en zagen de data binnensijpelen. De higgs-piek kreeg de weken voor juli geleidelijk vorm. Een aantal van de plotjes die Fabiola Gianotti in de presentatie

op 4 juli liet zien namens ATLAS, waren door Antonio gemaakt. Hij had haar een paar dagen ervoor door de details heen gepraat. Een ander resultaat vanuit Nikhef, higgs naar twee W-deeltjes, haalde de presentatie helaas niet, maar gelukkig een maand later wel de *discovery paper*. Ik denk dat het higgsdeeltje nog belangrijker is gebleken dan we tien jaar geleden dachten. Destijds hoopten we nog op veel meer onbekende deeltjes in de LHC-versneller. Dat is niet gebeurd en dus is het higgsdeeltje ons belangrijkste breekijzer om het Standaardmodel mee te kraken. Als ik zeker antwoord krijg, zou ik dit vragen aan een higgsdeeltje: koppel je ook aan neutrino’s? Neutrino’s hebben nauwelijks massa’s, dat weten we. Maar betekent dat ook geen verband met higgs? Dat weten we niet en het intrigeert me erg. Mijn diepste wens? Dat het ons ooit lukt om een kaart te maken van de kosmische neutrino’s van een halve seconde na de oerknal. De echte babyfoto van ons universum. Wordt aan gewerkt.’



‘Ik werd zo nieuwsgierig’

Osama Karkout,
promovendus in de ATLAS-
groep bij Nikhef

‘Op 4 juli 2012 was ik nog een middelbare scholier in Syrië, leerde ik mijn natuurkunde en droomde ik ervan om ooit natuurkundige te worden. Ik volgde het nieuws en kreeg een intens gevoel van nieuwsgierigheid. Ik wilde deeltjesfysica studeren. Dat lukte en nu werk ik zelf als promovendus bij ATLAS aan het onderzoek naar de zelfinteractie van het higgsdeeltje: hoeveel interactie heeft een higgsdeeltje

met een ander higgsdeeltje? Als we dat weten, kunnen we misschien al lang bestaande mysteries oplossen, zoals waarom er meer materie dan antimaterie is en wat de inflatie na de oerknal heeft veroorzaakt. Ik weet niet precies wat natuurkundigen tien jaar geleden van het higgsdeeltje verwachtten, maar ik weet wel dat het nu enorm belangrijk is voor de fundamentele natuurkunde. Het higgsveld geeft, volgens het Standaardmodel, deeltjes massa. Hoe sterker de interactie, hoe hoger de massa, is het idee. Dat betekent dat het higgsdeeltje

interacties moet hebben met deeltjes die we met de LHC-versneller niet kunnen maken. Je zou uit zijn eigenschappen willen afleiden welke deeltjes dat zijn, als ze bestaan. Op deze manier is er een verband met donkere materie, geünificeerde theorieën en de oerknal. Ik zou liever een higgsdeeltje vragen om een lijst van onbekende zware deeltjes en hun massa’s. Misschien zou dat ons ook iets vertellen over supersymmetrie of snaartheorie. In mijn eigen onderzoek bij ATLAS hoop ik een zelfkoppeling voor het higgsdeeltje te vinden die sterker is dan het

Standaardmodel voorspelt. Dit vertelt ons dat er in het vroege heelal kokende bellen van fase-overgang in het higgsveld waren die zich uitbreidden met de snelheid van het licht en antimaterie wegduwden, en wij zijn gemaakt van materie die gevangen zat in een bel! Zonder zo’n scheiding zouden materie en antimaterie elkaar overal hebben gevonden en vernietigd, zodat het heelal zonder materie zou zijn gebleven en wij zelf niet zouden hebben bestaan. Het heelal zou gevuld zijn met straling en niemand om het te zien.’



Stan Bentvelsen, Gerard 't Hooft en Frank Linde op Nikhef in 2012

die de zwakke kernkracht dragen. Al die koppelingen liggen verrassend strak op een rechte lijn als ze worden afgezet tegen de deeltjesmassa’s. Het higgsdeeltje is haast te normaal. Te precies wat Higgs en consorten een halve eeuw geleden al voorsagden.

Het gebrek aan verrassingen is vooral lastig, omdat het bestaande Standaardmodel een aantal overduidelijke tekortkomingen kent. De belangrijkste daarvan: donkere materie die sterrenstelsels veel zwaarder maakt dan we op grond van sterlicht zouden denken. Als donkere materie uit deeltjes bestaat, zijn die iets anders dan de deeltjes uit het

Standaardmodel. Een verrassing in de higgsfysica zou meer richting kunnen geven aan theoretici die een betere theorie proberen te vinden. Het doodgewone higgsdeeltje biedt daarbij weinig houvast. Tegelijk geldt ook dat wat niet is nog kan komen. De huidige LHC-versneller op CERN en de experimenten gaan nog decennia mee. Over een jaar of vijf krijgt de versneller zelfs een opkikker waardoor de bundel tienmaal intenser wordt. Dat levert naar verwachting zoveel meer higgsdeeltjes en dus meetgegevens dat in de fijne details aanwijzingen te vinden kunnen zijn voor nieuwe natuurkunde waar de huidige versneller strikt genomen niet

bij kan. Die hoop is gebaseerd op ervaringen met de voorganger van de LHC-versneller, de LEP. Dit was een elektron-positron-botser in dezelfde 27 km lange cirkelvormige tunnel als de huidige protonenbotser. Destijds leverde de LEP-versneller de eerste aanwijzingen dat een higgsdeeltje onder handbereik zou kunnen liggen met de opvolger: de LHC. Minder dan 300 GeV, was de schatting voor de massa van het higgsdeeltje op basis van de LEP-data. Het bleek een massa van 125 GeV.

De ervaringen met de LEP en de LHC zijn een belangrijk gegeven bij de plannen die worden gemaakt voor een nog grotere deeltjesversneller. In de Europese strategie voor de deeltjesfysica wordt gestudeerd op een nog energiekere versneller, die als een fabriek voor higgsdeeltjes zou moeten werken. Zo’n machine zou verder kunnen inzoomen op de fijne details die in de huidige LHC al interessant lijken. Eerst met elektronen en positronen, en later ook weer met protonen. In een cirkelvormige tunnel van 100 kilometer die reikt van Genève tot in de voor-Alpen. Een experiment dat mogelijk later deze eeuw speurt naar een nieuwe wereld. Voorbij het deeltje dat Peter Higgs een eeuw eerder voorsagde.

(In juni 2022 verschijnt het boek “Het eiland dat Higgs heet” van Nikhef-directeur Stan Bentvelsen en Martijn van Calmthout. Een reisgids voor mis-schien wel het belangrijkste deeltje van het universum. Uitgebracht door uitgeverij LIAS en verkrijgbaar in de boekhandel.)

Groot, groter, GRAND

in de Gobi-woestijn in het westen van China zijn geplaatst, om de technieken te beproeven en om alvast achtergrondruis te meten. Het zonnepaneel levert de stroom voor de antenne, de elektronica en de communicatie met de buitenwereld.

In de verte zijn nog net de bergtoppen die rondom het Tibetaans plateau liggen te zien. Die bergen zijn cruciaal voor GRAND. Ze werken als een vangnet voor extreem energetische neutrino's van bronnen aan de sterrenhemel laag aan de horizon.

Het idee achter GRAND is dat zulke hoogenergetische neutrino's van dezelfde bronnen komen als de kosmische 'tennisballen' die nu en dan de Aarde treffen en in de atmosfeer een stortbui aan deeltjes veroorzaken door botsingen met de lucht-moleculen. Deze projectielen uit het heelal zijn elektrisch geladen en leggen een kronkelweg af, voortdurend afgebogen door de magnetevelden in het heelal. Daardoor zegt de richting waaruit ze uiteindelijk de aardatmosfeer binnendringen eigenlijk niks meer over hun bron.

De begeleidende neutrino's doen dat wel. Die zijn sinds hun ontstaan rechtdoor gevlogen.

Neutrino's zijn spookachtige deeltjes, die zich niet gemakkelijk laten vangen, ook niet bij heel hoge energie. Maar een flink bergmassief kan op een ingewikkelde manier uitkomst bieden. Als een neutrino daar doorheen beweegt en een atoom raakt, kan er een tau-deeltje ontstaan. Als dat achter de berg vrijkomt vervalt het met een sproeier van geladen deeltjes. Als die door het magnetveld van de aarde bewegen zenden ze radiostraling uit, die met de antenne's van GRAND kan worden opgepikt. Zo kan de detector toch de superversneller tussen de sterren achter de bergen aanwijzen. ◀

GRAND heet het project van een wereldwijde collaboratie, gestart door Nederlandse, Franse en Chinese astro-deeltjesfysici, en die naam is zonder meer goed gekozen. Als de onderzoekers krijgen waarvan ze groots dromen, zal de *Giant Radio Array for Neutrino Detection* het liefst tweehonderdduizend goedkope antennes tellen, verdeeld over west-China, de Andes, de Oeral en de Rocky Mountains. In een gebied dat vijf keer zo groot is als Nederland.

Allemaal om een van de grootste raadsels van de kosmische straling op te lossen: wat precies slingert deeltjes het universum in met de energie van een goedgeslagen tennisbal in één klein deeltje. Geen aardse versneller die dat soort energieën produceert.

Zulke extreem hoogenergetische deeltjes zijn al sinds de vorige eeuw bekend, maar hun bronnen in de kosmos zijn nog steeds niet gevonden. Als GRAND er komt, zegt Nederlandse projectleider Charles Timmermans van Nikhef en de Radboud Universiteit in Nijmegen, kunnen we ergens in de jaren dertig het antwoord wel weten.

Zoals alle grote dingen begint GRAND klein. Op de foto zien we een van de dertien Nederlands-Chinese testantennes die

Foto: Charles Timmermans

Hij is de baas van, letterlijk, het grootste apparaat op aarde. De Large Hadron Collider is een protonenversneller van 27 kilometer omtrek, met duizenden stuurmagneten, ultrahoog vacuüm en een reusachtige koelcapaciteit met vloeibaar helium. Allemaal op gemiddeld honderd meter onder de grond.

En toch is de LHC voor Rende Steerenberg gewoon ook maar een machine. 'Je zet hem met een druk op de knop uit, als het moet. Of eigenlijk een muisklik. Je moet operators zelfs ervan bewust maken dat het geen computer-game is, maar een echte installatie met stromen van meer dan tien kiloampère. We sturen iedereen eerst een keer de tunnel in. Om de schakelaars die je op afstand omzet, zelf te zien.'

We troffen Steerenberg op een relatief rustig moment in zijn werkzaamheden. Op Zoom, het was immers nog steeds, of eigenlijk alweer, coronatijd. De versneller stond niet aan. De aanpassingen voor de herstart dit voorjaar waren al af. Het wachten was op het voltooiën van de laatste werkzaamheden en het sluiten van de tunnel. Pas daarna zou alle apparatuur ingeschakeld kunnen worden voor een grondige testperiode, ter voorbereiding op de injectie van de eerste deeltjes net na het paasweekend.

Het was half januari, buiten schemerde het. Het was de stilte voor de storm van de herstart van de LHC-versneller, die sinds 2019 buiten bedrijf was voor onderhoud, reparaties en verbeteringen. In de zogeheten *Long Shutdown 2* (de tweede in het bestaan van de versneller) ging er geen protonenbundel rond en waren er geen botsingen in de experimenten. Daar werd op veel plaatsen koortsachtig aan verbeteringen en reparaties gewerkt.

Opstarten

In het voorjaar van 2022 moet al dat werk klaar zijn. En dan begint de episode die voor een versnellerbeheerder de mooiste is, zegt Steerenberg. 'Het opstarten van de versneller na alle werkzaamheden is altijd het meest opwindend. Dan blijkt of alle aanpassingen werken zoals je hoopt en zie je de versneller naar de beoogde kracht toegroeien. Daar doe je het voor.'

Een belangrijk punt daarbij is het *trainen* van de supergeleidende magneten in de versneller, waarvan de windingen in de spoelen op hun plaats moeten vallen onder de immense magneetkrachten. Pas na een lange reeks aan- en uitschake-

lingen (*quenching*) is elk van de meer dan duizend magneten in de ring, bakbeesten van vijftien meter lang, voldoende stabiel en bestuurbaar.

Alle magneten zijn tijdens de shutdown open gemaakt en aangepast, zodat het vloeibare helium nergens eventuele losse metaaldeeltjes meesleept en kortsluiting veroorzaakt. Nu dat gebeurd is kan de versneller in de volgende run eindelijk op een hogere energie gaan draaien, 6,8 TeV. Hiervoor was dat te riskant.

Gegrepen door techniek

Rende Steerenberg werd geboren in Zwolle maar groeide op in Zeeland; en studeerde elektrotechniek aan de hogeschool in Breda. Liep als student begin jaren '90 stage bij de ESRF-synchrotronbron in aanbouw in Grenoble, Frankrijk. Raakte gegrepen door de techniek van de elektronenversneller die daar de straling voor materiaalonderzoek levert. Werkte terug in Nederland even als *engineer* in de industrie, maar solliciteerde daarna toch op een baan bij CERN in Genève en werd aangenomen. 'Als *operator* op de PS booster, een van de voorversnellers voor de LEP-versneller die toen nog op CERN draaide.'

Maar Steerenberg wilde meer. 'Verder in de organisatie. Verder in de natuurkunde. Ik ben naast mijn werk wiskunde gaan studeren aan de Open University in Engeland. Wiskunde, omdat dat een basis geeft voor natuurkunde. Ik dacht: die natuurkunde kan ik daarna wel zelf, zeker met zoveel natuurkundigen om me heen.'

Uiteindelijk werd hij vervangend hoofd van de *Operations* groep van de versneller op CERN, en daarna begin 2017 hoofd. Inmiddels is de LEP-versneller op het lab dan al vervangen door de Large Hadron Collider. Een protonenbotser met de hoogste energie ooit. Met de machine werd de finale jacht op het higgsdeeltje ingezet en uiteindelijk in 2012 met succes bekroond.

Wakker ligt hij zelden van het besef dat hij een van de werkpaarden van ongeveer de hele moderne deeltjesfysica runt. 'Dat is een hele verantwoordelijkheid, maar we werken met een professioneel team dat hier gewoon steengoed in is.'

In januari van dit jaar liep Steerenbergs eerste mandaat van vijf jaar af. Hij kreeg een tweede termijn. 'Ik geloof dat het van twee kanten wel bevalt', zegt hij bescheiden glimlachend.

Zijn flitscarrière van een hogeschool-

student tot sleutelfiguur bij CERN is geen uitzondering, zegt Steerenberg. 'Op een specialistisch lab als CERN is het niet gek dat mensen uit de eigen organisatie opklimmen. Ik vertel dat ook graag aan jonge technici die zich afvragen of CERN ze iets te bieden heeft. Er bestaat nog te veel een beeld dat CERN te ingewikkeld is voor gewone mensen. Ik ben het levende bewijs van het tegendeel.'

Dat is de reden dat hij geregeld naar carrièrebeurzen in Nederland komt om zijn verhaal te doen. 'Er komen nog veel te weinig Nederlandse technici naar CERN, vind ik. We hebben geweldige ingenieurs. Waarom komen ze niet? Waarom alleen natuurkundigen van de universiteiten?'

'Ik vertel techniekstudenten daarom: kom je stage doen in Genève. Grijp je kans. Het grappige is dat je bij Nederlandse studenten twee soorten reacties hebt. De één vindt Genève toch wel erg ver van huis. De ander vindt het juist veel te dichtbij, die willen naar de VS of China. Maar wij hebben toevallig wel de mooiste versneller op de wereld. Als je eenmaal daarmee werkt, ben je verkocht, dat beloof ik je.'

Meer botsingen

En het wordt allemaal nog mooier, zegt Steerenberg. 'Deze shutdown is het hardst gewerkt aan de voorbereiding van de *high-luminosity* (HL) LHC en met name de upgrade van het voorversneller complex. De HL-LHC gaat netto tienmaal zoveel botsingen leveren. De voorversnellers zijn daarop de laatste jaren al helemaal voorbereid en getest.'

Steerenberg: 'De eerste etappe daarin, de Linac lineaire versneller, is zelfs helemaal nieuw, met een bijzonder proces: we versnellen niet meteen protonen maar negatieve waterstofionen die we daarna van hun elektronen strippen.' Uiteindelijk moet de HL-LHC in 2029 in bedrijf komen en gigantisch veel meer meetgegevens in de experimenten opleveren. Een jaar later overigens dan ooit het plan was.

Maar eigenlijk is het een wonder dat corona het project maar zo weinig vertraagd heeft, zegt Steerenberg. 'Voor de versneller is de pandemie minder een hindernis geweest. Wij hebben veel eigen mensen en veel materialen waren al ter plaatse. Voor de experimenten is het een veel lastigere tijd. Zoveel landen, zoveel partijen, zoveel verbanden. Daar wordt nog behoorlijk gezweet tot aan de herstart van de LHC, ergens later dit jaar. Maar ik weet uit ervaring: het komt goed.'

Versneller de baas

Rende Steerenberg leidt als hoofd van de Operations groep op CERN het team dat de grootste deeltjesversneller ter wereld runt. Ligt de Nederlandse ingenieur nooit wakker van de verantwoordelijkheid voor deze LHC?

Het podium dat Nikhef heet

Big Science-opdrachten zijn een visitekaartje voor de industrie. De deeltjesfysica blijkt een aantrekkelijk speelveld.

Om de volgende generatie deeltjesdetectoren, zwaartekrachtsgolfobservatoria en neutrino telescopen te bouwen, werkt Nikhef nauw samen met Nederlandse techniekbedrijven. Zij hebben de kennis en kunde om de nieuwe generatie meetinstrumenten mee te ontwikkelen en te bouwen.

Omgekeerd zijn Big Science-opdrachten voor de high-techindustrie een kans om zelf te leren en aan de markt te laten zien wat ze in huis hebben. Wetenschap en bedrijfsleven hebben dus allebei veel aan samenwerking. Nikhef's ILO (industriecontact, *Industrial Liaison Officer*) Jan Visser zoekt daarom voortdurend naar kansen voor Nederlandse bedrijven, bijvoorbeeld door ze uit te nodigen voor kennismarkten als Holland@CERN.

'Samenwerking tussen wetenschap en industrie helpt ons allebei vooruit', zegt Jan Visser. Daar is soms wel een lange adem voor nodig. Neem Medipix,

de succesvolle camerachip voor elementaire deeltjes van CERN. Die technologie werd twintig jaar geleden opgepakt door PANalytical, een ontwikkelaar van laboratoriumapparatuur. En nu is het al bijna vijftien jaar het hart van één van hun meesystemen. 'Door de samenwerking met industrie is dat systeem steeds verder ontwikkeld. De nieuwste telg van de Medipix-familie, Timepix4, biedt weer allerlei mogelijkheden voor zowel wetenschap als industrie.'

Vier Nederlandse bedrijven vertellen hoe de deeltjesfysica hen inspireert.

Tekst: Gieljan de Vries

Demaco
Delivering cryogenic infrastructures worldwide
it's all about Cryogenius & High Vacuum

www.demaco.nl



Familiebedrijf MCAP begon in 1987 op de zolder van een huurhuis in Oosterhout met het produceren van printerkabels - oprichter Martin van Aperloo was het bestaande aanbod beu. Sindsdien is het bedrijf uitgegroeid tot een assemblagespecialist die bekabeling op maat maakt. Salesmanager Niels van Aperloo: 'Om datakabels te ontwikkelen die precies doen wat je wilt, is best wat expertise nodig. Daar komen wij om de hoek kijken. We zitten net zo vaak met de technici aan tafel als met de inkopers om maatwerk te leveren naar de specificaties van de klant, en dat is erg leuk om te doen.'

Wat doet MCAP voor Nikhef?

Voor de onderzeese neutrino detector KM3NeT was Nikhef op zoek naar een bedrijf dat de complexe bekabeling voor het project kon maken. 'Wij hebben eerlijk gezegd dat we niet wisten of we die specificaties al aankonden, maar dat we dat zeker wilden onderzoeken', herinnert Van Aperloo zich. 'We zijn met Nikhef een ontwikkeltraject ingegaan om te bewijzen dat we hun ontwerp ook echt konden maken. Dat leverde ons ook de uiteindelijke opdracht op.'

Wat is de uitdaging?

'Door deze kabels moeten we vierentwintig glasvezels trekken van 250 of 800 meter lang, zonder de beschermende mantel die om de glasvezel in je eigen huis zit.' Eén breuk, en een vezel is onbruikbaar. 'Elke kabel heeft minstens achttien werkende vezels nodig voor het data-transport, en tegelijkertijd moeten de koperdraden voor de voeding

'We wisten niet of we die specificaties al aankonden'

MCAP maakt gespecialiseerde datakabels

25 medewerkers

erdoorheen. Echt een heel complexe opdracht.'

Hoe bevalt de samenwerking?

'Uitstekend! Met Nikhef hebben we heel goede, grondige gesprekken over wat er moet gebeuren. Het is echt leuk als je klant van sommige aspecten gewoon meer weet dan jij.'



Even wennen was Nikhef's grondige kwaliteitscontrole: 'Voor elke kabel moeten we bijna dertig pagina's aan documentatie leveren.' Dat levert soms bijzondere vragen op: 'Schreven wij dat een glasvezel een halve decibel demping gaf - een heel normaal getal - dan wilde Nikhef weten hoe dat kwam en wat de variatie was. Zo hebben we veel geleerd over onze materialen en ons productieproces.'

Toekomstplannen in Big Science?

'Jazeker, we zoeken actief naar opdrachten, bijvoorbeeld door met het ILO-netwerk mee te gaan naar bedrijvendagen bij CERN.' Mogen leveren aan Big Science is volgens Van Aperloo een visitekaartje: 'Ook in andere sectoren snappen ze dan meteen dat je hoge kwaliteit levert.'

‘Onze serverkoeling is doorgelicht door de besten van de besten’

Incooling ontwikkelt 's werelds snelste computer-servers dankzij een nieuwe koeltechniek

9 medewerkers



‘Bijna alle aandacht gaat in de computerindustrie uit naar steeds snellere chips’, zegt mede-oprichter Helena Samodurova van de Eindhovense start-up Incooling. ‘Maar koeling is net zo belangrijk.’

Waarom?

Computerchips van de volgende generatie halen bijvoorbeeld hun maximale rekensnelheid niet omdat ze dan te warm worden. Nu al besteden data-centra veertig procent van hun energieverbruik aan het koelen van de servers. ‘De servers die wij ontwikkelen rekenen sneller en verbruiken minder energie, dankzij een koeltechniek geïnspireerd door CERN.’



Hoe zijn jullie begonnen?

Incooling ontstond tijdens gesprekken met Nikhef en CERN op de hackathon HighTechXL in 2018. ‘We ontwikkelen computerservers met een actief koelsysteem geïnspireerd door een techniek die is ontwikkeld bij CERN. Door ijskoude vloeistof onder de printplaat door te pompen en te laten verdampen, moet het mogelijk zijn servers te koelen van hun gebruikelijke zestig tot negentig graden celsius tot vlakbij het vriespunt.’ Daardoor kunnen

Incooling's servers op vol vermogen draaien en zijn ze energiezuiniger dan servers met bestaande koeltechniek.

Werkt dat al?

De twee-fasengekoelde servers waar Incooling aan werkt, zijn gebaseerd op de koeling van de VELO-detector van het LHCb-experiment op CERN. Aanvankelijk wilde Incooling alleen die koeltechniek toepassen in de computerindustrie, vertelt Samodurova. Maar de infrastructuur om met vloeibaar CO₂ te werken bleek te pittig voor bestaande serverontwikkelaars. ‘Begin vorig jaar hebben we daarom besloten om alles in eigen beheer te doen. Onze eerste twee-fasengekoelde server wordt nu al ingezet door een ontwikkelaar van kunstmatige intelligentie.’

Wat heb je aan de samenwerking met Nikhef?

Incooling's eerste spruit werkt voorlopig nog op de standaard koelvloeistof in de computerindustrie. De volgende generatie servers van het bedrijf moet overgaan op CO₂-koeling. Om dat voor elkaar te krijgen, werkt Incooling nauw samen met zowel CERN als Nikhef.

‘Nikhef verwelkomde ons, een kersverse start-up, zodat we onze systemen konden testen in hun labs en advies konden vragen aan hun technici. Dat hielp enorm bij onze ontwikkeling. En het is een kwaliteitskeurmerk. Ons ontwerp is doorgelicht door de besten van de besten bij Nikhef en CERN!’

‘Je moet mee met die wetenschappers’

Demaco is specialist in cryotechniek

125 medewerkers



Het Nederlandse mkb-bedrijf Demaco is een wereldwijde speler in high-tech cryotechniek. Eigenaar Ronald Dekker vertelt enthousiast over de projecten waar zijn mensen aan meewerken: van koeltechniek voor de voedingsindustrie en de auto-branche, via waterstofinstallaties voor vrachtvervoer naar Big Science, zoals het installeren van koeling met vloeibaar helium in de ATLAS-detector van deeltjesversneller LHC.

Waarom is Big Science zo interessant?

‘Vanwege de uitdaging’, stelt Dekker. ‘Wetenschappers willen altijd verder en zo kom je in aanraking met echt zware specificaties. Je moet met ze mee en dat betekent jezelf voortdurend ontwikkelen.’ Zo maakte Demaco voor Nikhef een ontwerpstudie voor het cryogene systeem van de EPathfinder. Deze testinstallatie ontwikkelt technologie voor de Einstein Telescope, een toekomstig observatorium voor zwaartekrachtsgolven.

Hoe bevalt de samenwerking?

Demaco werkt al sinds 1988 mee aan Big Science-projecten. Dat bevalt goed. ‘Onze eerste klus was een vloeibaar-helium-koeling voor de magneten van DESY in Hamburg. Daar hebben we enorm veel geleerd over hoe die systemen werken.’



Big Science-werk heeft zo zijn hordes, bekent Dekker. Voortrajecten duren soms wel vijftien jaar van een eerste idee tot de productie en installatie. Normaal gesproken werkt Demaco op een tijdschaal van weken tot maanden; alleen bij de afdeling voor vloeibaar waterstof en helium die levert aan Big Science denken ze in decennia. Dekker: ‘Je moet vanaf het begin van het voortraject meedoen en laten zien dat je de gevraagde specificaties kunt halen. Alleen dan haal je de tenders binnen.’

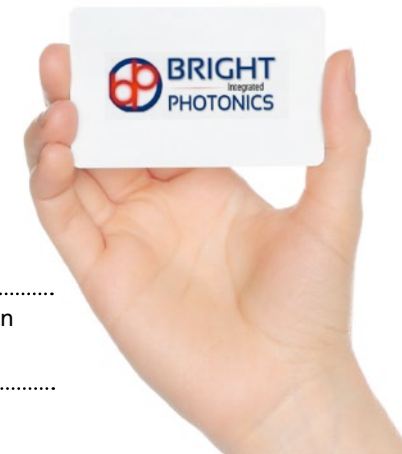
Wat heb je aan zulke projecten?

Demaco is een vaste gast bij evenementen als Holland@CERN, waar bedrijven en wetenschappers praten over toekomstige projecten. ‘Je wordt niet per se rijk van eenmalige cutting-edge opdrachten voor Big Science. Maar de R&D die je zo spelenderwijs doet, is onmisbare ervaring die je kunt doorzetten naar de industrie.’

‘We kunnen samen grote stappen maken’

Bright Photonics bedenkt en ontwerpt fotonische chips

10 medewerkers



Fysicus Ronald Broeke, oprichter van Bright Photonics, zit al een groot deel van zijn carrière in de geïntegreerde fotonica: het meten en zenden van informatie in de vorm van licht op een chip. Fotonische chips, is het idee, kunnen informatie sneller en energiezuiniger verwerken dan elektrische. Broeke's ontwerp-bureau in Eindhoven bedenkt en ontwerpt fotonische chips voor de applicaties van uiteenlopende klanten.

Wat is jullie Big Science-opdracht?

‘Samen met Nikhef, SRON en Smart Photonics ontwikkelen we de fotodiodes voor de ruimtemissie LISA’, vertelt Broeke. Dit toekomstige observatorium moet de zwaartekrachtsgolven van botsende zwarte gaten opsporen waar aardse detectoren als LIGO en Virgo niet gevoelig genoeg voor zijn. De fotodiodes zijn een cruciaal onderdeel om de afstand tussen de LISA-satellieten te meten met laserstralen. Het is maatwerk, van de hoge prestatie-eisen tot de randvoorwaarden om het systeem ruimtewaardig te maken.

‘Eigenlijk is deze opdracht iets buiten ons bedrijfsdoel’, geeft Broeke toe, omdat het om een specialistische toepassing gaat. Bright Photonics werkt meestal aan algemene tools en methodes om generieke producten te ontwikkelen.

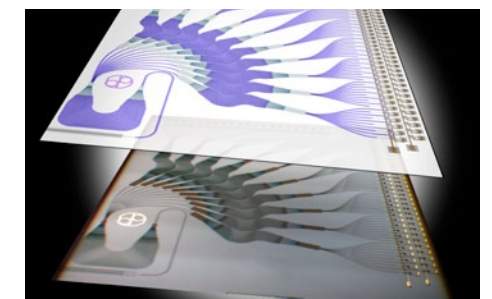
Waarom toch deze opdracht voor LISA?

‘Deze fotodiodes zijn echt state-of-

the-art. We moesten ze ontwerpen vanaf de wafer, het basismateriaal van de chip.’ Tegelijkertijd moest het bedrijf leren werken met de ontwerp-eisen en regelgeving van ruimtevaarttechnologie. ‘Als we willen ontwerpen voor andere ruimtemissies, is dat zeker een voordeel.’

Hoe is de samenwerking met Nikhef?

‘Onze partners bij Nikhef zijn tegelijkertijd onderzoekend en oplossingsgericht, en altijd met een positieve instelling. Ze stellen goede vragen en testen onze ontwerpen grondig. Zo kunnen we grote stappen maken in de volgende ontwikkelronde om de diodes ruimtewaardig te maken.’



Wat zijn de toekomstplannen?

‘Fotonica heeft veel te bieden voor wetenschappelijke instrumentatie. Zo maakt Bright Photonics momenteel verschillende ontwerpen voor spectrometers voor telescopen, zoals voor de zoektocht naar exoplaneten. Ook in de geplande Einstein Telescope zou veel functionaliteit, van interferometrie tot detectie, prachtig op een fotonische chip kunnen.’



In de werkplaats van Nikhef is begonnen met de opbouw van de ITk, het toekomstige nieuwe siliciumhart van de ATLAS-detector op CERN. Supersterk en vederlicht.

Voor het hart van ATLAS

Hijskranen tillen vloerdelen hoog over het gebouw. Bouwvakkers met oranje helmen en gele hesjes duwen kruiwagens door de afgeplakte gangen. En ergens wordt fors geboord. Nikhef renoveert het hoofdgebouw op Amsterdam Science Park. Maar in één van de mechanische werkplaatsen van het instituut is daarvan wonderwel weinig te merken. Hier buigt postdoc Andrea Garcia Alonso van de ATLAS-groep zich geconcentreerd over een twee meter grote grijze schijf, volgeplakt met sensoren en koelelementen.

Dit, gebaart ze, wordt over een aantal jaren het uitende van de *Inner Tracker* of kortweg ITk, de binnenste deeltjesvanger van de reuzendetector op CERN. Het geeft zeker een kick, zegt ze, om te weten dat dit ooit vlakbij de botsende protonen op CERN zal zitten. 'Ik houd wel van dit praktische werk, het brengt je veel dichterbij de toekomstige meetresultaten.'

De ITk is een nieuw apparaat met miljoenen silicium sensoren, samengepakt in een zes meter lange cilinder van twee meter doorsnee. Rond 2028 zal het gevaarte, gebouwd door een groot consortium van wetenschappelijke instituten, in de detector worden geschoven en aangesloten. Volgepakt met de nieuwste technieken. Hiermee kan de ITk straks de stortvloed aan signalen oppikken, wan-

neer de LHC-versneller nog een factor tien intensere bundels gaat leveren in het HL-LHC project.

Postdoc Garcia Alonso, Spaanse van origine, houdt zich bij Nikhef al maanden bezig met het testen van de mechanische kwaliteit van wat de *stiffener disk* van de ITk heet. Deze schijf is speciaal door Nikhef-engineers in Amsterdam ontworpen. De *stiffener disk* is gemaakt van koolstoffiber en met een kern van hoogwaardig schuim, heeft een diameter van twee meter en is vederlicht. Tegelijkertijd is hij vormvast tot afwijkingen van minder dan een vijfde millimeter. De disk vormt daarmee het onwrikbare fundament voor de rest van de zogeheten *endcaps* die de ITk aan beide uiteinden zullen afsluiten.

Silicium detectoren

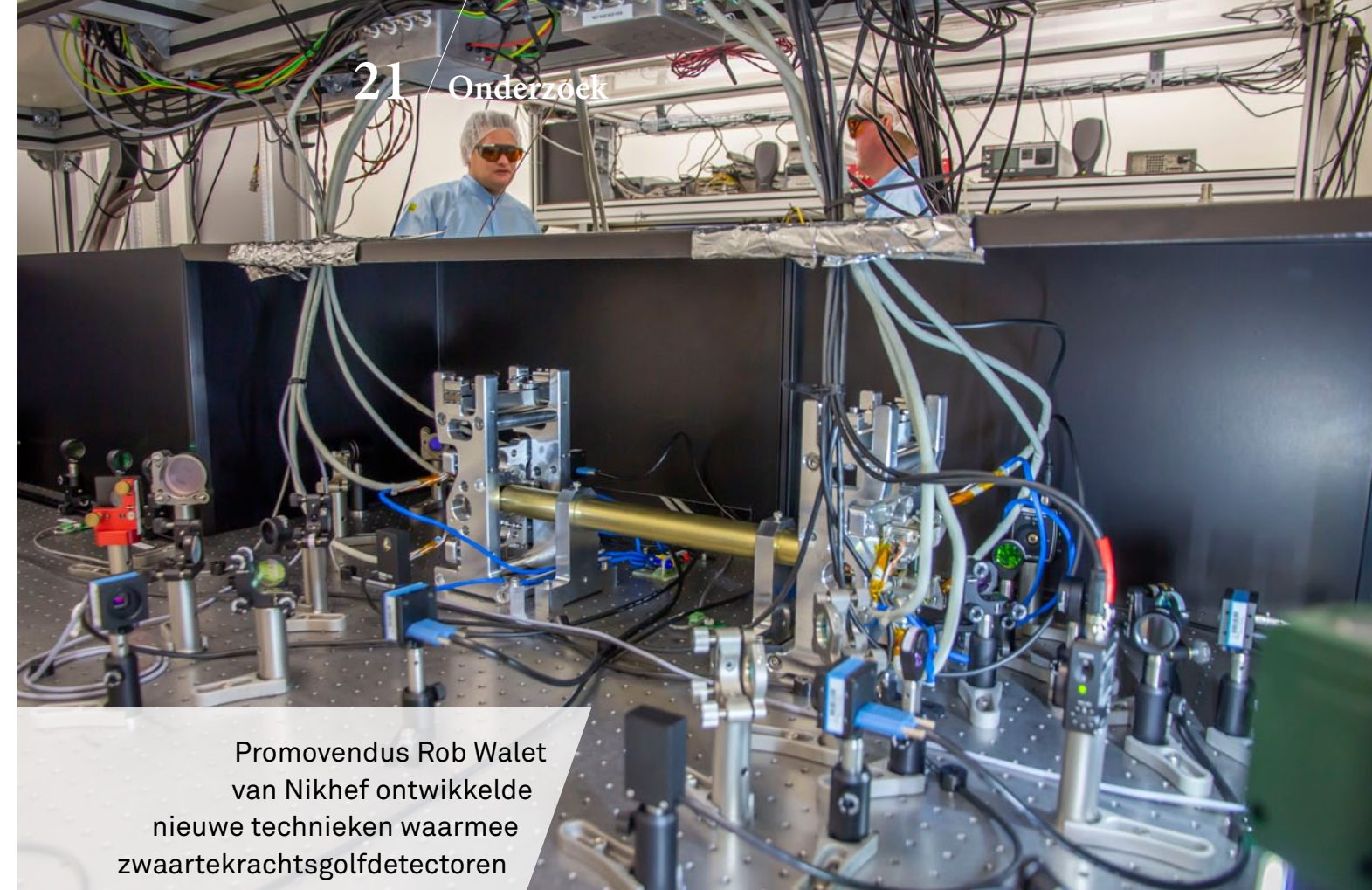
Deze *endcaps* worden volgepakt met silicium detectoren, die vooral passerende deeltjes in de voortwaartse richting moeten registreren, een paar meter maar van het botsingspunt middenin de versneller. De ITk legt de beginpunten vast van alle deeltjessporen in de rest van de detector, de basis voor het vinden van bekende en nieuwe deeltjes.

Projectleider Marcel Vreeswijk, zijn team en Nikhef-technici zijn verantwoordelijk voor het skelet van de *endcaps*,

zowel de stijve lichtgekromde basis als het frame van anderhalve meter hoog waarin in zes vlakken alle sensoren moeten worden aangesloten. Inclusief bekabeling en koeling. Ook dat frame is weer goeddeels van koolstofvezelversterkt epoxy gemaakt en dus vederlicht en toch sterk. 'Je wilt altijd zo min mogelijk materiaal dat deeltjes in de weg kan zitten', legt Garcia Alonso uit.

De constructie van de nieuwe ATLAS-ITk *endcaps* is een gecompliceerde internationale operatie, vertelt Vreeswijk, met partners van over de hele wereld. Onderdelen voor de inbouw zullen uit alle windstreken arriveren in Amsterdam. Er komt zelfs een speciaal gereedschap uit Duitsland voor het plaatsen van de taartpuntige sensoren, door de ontwerpers *petals* (bloembladen) genoemd. Uiteindelijk assembleert Nikhef de ene *endcap* in de nieuw opgeknapte cleanroom in Amsterdam, en het Duitse DESY in Hamburg de andere. Beide in een frame en met een *stiffener disk* ontworpen en gemaakt in Nederland. Daarna worden beide op CERN in Genève in de ITk-cilinder gebouwd. Het geheel wordt gedurende de onderhoudsronde in 2026 - 2028 in de ondergrondse detector geïnstalleerd. ◀

Foto: Marco Kraan



Promovendus Rob Walet van Nikhef ontwikkelde nieuwe technieken waarmee zwaartekrachtsgolfdetectoren na een storing veel sneller weer in bedrijf kunnen komen.

Greep op de spiegels

In het laserlab van Nikhef tilt promovendus Rob Walet het zwartmetalen deksel van een van de opstellingen. Hij wijst naar een doolhof van spiegels, sensoren en camera's, waarin infrarood laserlicht wordt rondgeleid. Maar vooral naar een metalen buis van een halve meter lang, waaraan aan weerszijden ronde spiegel-tjes aan onzichtbare draden zweven. Het is een schaalmodel van een detector voor zwaartekrachtsgolven, zoals de Virgo-detector bij Pisa in Italië. Virgo is kilometers groot, en gebruikt zichzelf versterkend of uitdovend laserlicht om de afstand tussen spiegels met extreme precisie te meten en bewaken. Botsende zwarte gaten in het heelal vervormen de ruimte en dus de afstanden tussen spiegels. In 2015 werd zo de eerste zwaartekrachtsgolf ooit gemeten, honderd jaar nadat Einsteins zwaartekrachttheorie die voorspelde.

Dit soort interferometrie werkt fantastisch om zwaartekrachtsgolven uit het universum te meten. Detectoren als Virgo in Italië en LIGO in de VS registreerden inmiddels vele tientallen rimpelingen van het heelal. Dat geeft de wetenschap een nieuw venster op ons universum.

Maar in de praktijk is het instrumentarium dat daarvoor nodig is ook supergevoelig voor alle ruis en al het

gerommel in de omgeving. Bovendien zijn de afstellingen van de apparatuur zo delicaat, dat het dagen kan duren om na een storing weer in bedrijf te komen.

Ingenieur Walet deed vier jaar onderzoek met als centraal doel om een detector als Virgo zo min mogelijk uren buiten bedrijf te hebben. Hij keek daarbij bijvoorbeeld naar betere materialen en compensatie voor omgevingsbewegingen.

Zo stil mogelijk

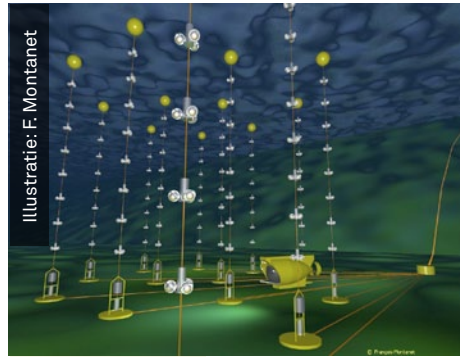
Maar Walets meesterstuk zit in de zwarte kist op het laserlab bij Nikhef. De kunst van interferometrie, vertelt hij, is om de hangende spiegels aan de uiteinden van de buis op hun plek te houden en zo stil mogelijk. Alleen dan zijn de subtiele rimpelingen van de ruimte zelf te meten. Daarbij gaat het om afstandsvariaties van minder dan een proton groot.

Om dat voor elkaar te krijgen wordt het spiegelstelsel nauwlettend ingeregeld. Als het vermogen van het opgesloten laserlicht binnen de aangegeven grenzen blijft, staat de detector aan. Maar gaat er iets

over de grens heen, dan gaat hij uit. De herstart daarna, met het opnieuw instellen van instellingen en posities kan zelfs een ervaren operator dagen kosten. Veel ervan moet handmatig. Leidend daarbij is vooral de lichtvlek, die uiteindelijk uit het optische systeem komt. De operator heeft die letterlijk in de *control room* voor zich. Walet ontwikkelde in zijn schaalmodel een optische methode om die lichtvlek veel helderder en scherper te krijgen. Daarmee is de operator vaak al flink geholpen, weet hij. 'Je ziet veel beter wat er gebeurt als je aan een van de tientallen parameters in het stelsel draait.' Bij een nieuw onderdeel van Virgo, een zogeheten *filter cavity*, wordt dit idee zelfs al toegepast.

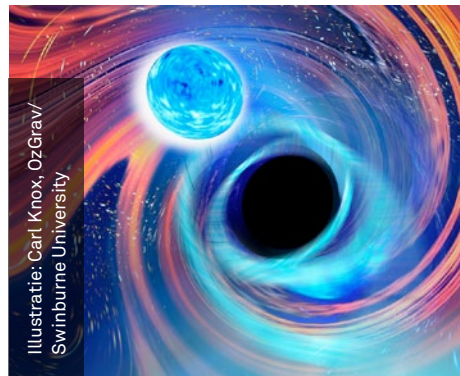
Maar uiteindelijk, zegt hij, is het heel goed denkbaar dat het herstelproces van een zwaartekrachtsgolfdetector met kunstmatige intelligentie een kwestie van uren wordt in plaats van dagen van testen en uitproberen. 'De detector kan naar mijn idee een soort zelfrijdende auto worden, die dag en nacht in de lucht blijft, wat hij ook tegenkomt. Dat is het ideaal.' ◀

Foto: Marco Kraan



Na 16 jaar stopt NEUTRINOTELESCOOP ANTARES

In de Middellandse Zee voor de kust van Zuid-Frankrijk is een begin gemaakt met het ontmantelen van de ANTARES-neutrino-telescoop. De detector op 2,5 kilometer diepte is zestien jaar ononderbroken in bedrijf geweest. ANTARES bestond uit twaalf lijnen met lichtsensoren. In de loop der jaren publiceerde de collaboratie meer dan 90 wetenschappelijke artikelen in tijdschriften, zowel over de bronnen van neutrino's als de eigenschappen van de deeltjes zelf. Inmiddels is in hetzelfde gebied de veel grotere KM3NeT-detector ver genoeg in gebruik gekomen om de functie van ANTARES over te nemen.



Groeiende catalogus ZWAARTEKRACHTSGOLVEN

De lijst van waarnemingen van de LIGO- en Virgo-zwaartekrachtsgolfdetectoren in de VS en Italië omvat nu 90 zwaartekrachtsgolfsignalen. Dit resulteert uit de analyse van de volledige meetgegevens van de drie afgelopen meetperiodes. De meeste signalen zijn van samensmeltende zwarte gaten, waaronder ook enkele zeer zware. Twee keer werden zwaartekrachtsgolven waargenomen van een zwart gat dat een neutronenster opslokt. LIGO en Virgo doen momenteel geen metingen. De installaties worden onderhouden en verbeterd, in de aanloop naar een nieuwe meetperiode in het najaar van 2022.

Ivo van Vulpen BIJZONDER HOOGLEERAAR WETENSCHAPSCOMMUNICATIE

Per 1 januari is Nikhef-onderzoeker Ivo van Vulpen bijzonder hoogleraar wetenschapscommunicatie aan het Leids Instituut voor Onderzoek in de Natuurkunde (LION). Deze nieuwe leerstoel is geïnitieerd door de Nederlandse Natuurkundige Vereniging (NNV). Tijdens zijn aanstelling voor een dag per week voor vijf jaar, wil Van Vulpen onderzoek doen naar wetenschapscommunicatie in de natuurkunde in brede zin. Naast onderzoek wil hij zich ook bezighouden met het uit-

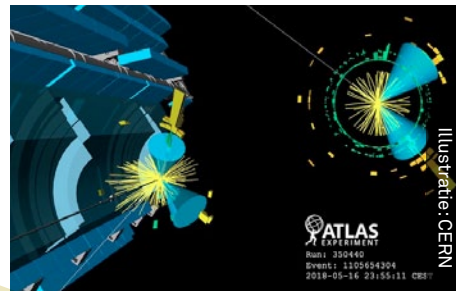


Foto: Bob Bronshoff

dragen van het belang van goede wetenschapscommunicatie, door ook zelf aan wetenschapscommunicatieprojecten bij te dragen, en erover onderwijs te geven.

ATLAS-experiment MEET HIGGSVERVAL NAAR CHARM

Het ATLAS-experiment op CERN heeft een nieuwe analyse gepubliceerd die laat zien dat de koppeling van het higgsdeeltje aan charm-quarks zeker kleiner is dan aan de zwaardere bottom-quarks. Zo'n verschil was wel verwacht, maar tot nu toe nog niet gemeten. Het higgsdeeltje onderhoudt volgens het Standaardmodel een relatie met de quarks die evenredig is met hun massa. De koppelingen van het higgsdeeltje zijn eigenschappen die sinds de ontdekking worden bestudeerd. De metingen kunnen wellicht duidelijk maken



Illustratie: CERN

waarom er drie generaties materiedeeltjes (quarks en leptonen) bestaan in het Standaardmodel, die voornamelijk op het gebied van hun massa verschillen.

Eric Laenen benoemd tot VICE-VOORZITTER CERN-RAAD

Nikhef-theoreticus Eric Laenen is vanaf januari 2022 de nieuwe vice-voorzitter van de CERN-raad, het hoogste bestuursorgaan van het Europese laboratorium. De CERN-raad bestaat uit afgevaardigden van alle 23 lidstaten van de organisatie, en bepaalt het wetenschappelijke, technische en administratieve beleid van CERN. Eric Laenen zit al vele jaren als Nederlandse wetenschappelijke afgevaardigde in de CERN-raad en was ook nauw betrokken bij het opstellen van de nieuwe Europese strategie voor de deeltjesfysica, die in 2020 bekendgemaakt werd.



Foto: Bas Uterwijk



Jacco de Vries speurt naar een nieuwe natuurkracht

Foto: Harry Heuts

'In de metingen van het LHCb-experiment op CERN zijn belangrijke hints voor iets nieuws te zien. Maar wat is dat dan voor iets nieuws? Is het een nieuwe natuurkracht? Daar wil ik achter komen. Ik gebruik daarvoor hele, hele zeldzame deeltjesvervalen, namelijk van B-mesonen naar

twee muonen of twee elektronen. Je bent echt aan het zoeken naar een speld in tien-duizend hooibergen.

Bij LHCb doen we dat straks met een volledig nieuw experiment. Nieuwe hardware, nieuwe software. Als de LHC binnenkort weer opstart, met veel meer botsingen dan voorheen, dan zullen we die zeldzame vervallen vaker zien. We zijn nu bezig om de deeltjes-reconstructie op grafische kaarten te doen. Daarmee kan

je veel meer berekeningen tegelijk uitvoeren. Het is de eerste keer dat dit op zo'n grote schaal in de deeltjesfysica gebruikt wordt. En ooit gaan we misschien quantum-computing toepassen hiervoor, dat is wel een droom.

Vier jaar geleden ben ik naar de Universiteit Maastricht gegaan. Daar waren ze een nieuwe faculteit voor bètawetenschappen aan het oprichten. Er was toen nog geen fundamentele natuurkunde, maar nu is er een hele nieuwe groep. Die is natuurlijk nog in de opbouwfase. Omdat ik er als een van de eersten

was, voel ik een soort verantwoordelijkheid om van de groep een succes te maken.

Onderwijs geven op de universiteit geeft ook veel energie. De verbinding met studenten die je enthousiast maakt en die je zo in de onderzoekswereld trekt. Dat vind ik wel belangrijk - als je motivatie hebt om vanuit nieuwsgierigheid iets te onderzoeken, volgt de rest bijna vanzelf.

De droom zou zijn om onze tak van de natuurkunde voor meer mensen bereikbaar te maken. Het is een uitdaging om het op zo'n manier te vertellen dat het toegankelijk is. Maar dat geeft wel een soort fascinatie, een soort verwondering over hoe de wereld in elkaar zit. Dat gun ik iedereen.'

INHOUD

2 **ETpathfinder**

Bouwen aan
een proeftuin

3 **Stan Bentvelsen**

Een prachtig
moment

4 **Higgsdeeltje**

Tien jaar jong

12 **GRAND**

Antennes en een berg
om neutrino's te vangen

14 **Rende Steerenberg**

zit aan de knoppen van
de LHC-versneller

16 **Industrie**

Samenwerking
met Nikhef

20 **ATLAS-upgrade**

Opbouw van
Inner Tracker
begonnen

21 **Nieuwe methodes**

voor inregelen
interferometer-spiegels

23 **De droom van**

Jacco de Vries
over een nieuwe
natuurkracht

