

# Nikhef

  Nederlandstalige editie | december 2016 | [NewScientist.nl](http://NewScientist.nl)

een uitgave van  
**NewScientist**



**Op jacht naar de  
kleinste deeltjes**

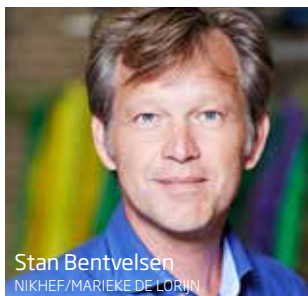
mede mogelijk gemaakt door  
**Nikhef**

Nikhef-  
special

*De kans dat twee  
willekeurige Nederlanders  
allebei Stan heten, is  
kleiner dan één op miljoen.*



Stan Gielen  
NWO/MANON BRUININGA



Stan Bentvelsen  
NIKHEF/MARIEKE DE LORIJN



## Kwaliteit, breedte en impact

Nikhef is officieel het Nationaal instituut voor subatomaire fysica. Dat betekent dat het onderzoek primair gericht is op deeltjes- en astrodeeltjesfysica. Die omschrijving doet echter geen recht aan de kwaliteit, breedte en impact van het Nikhef-onderzoek.

Nikhef is een van de belangrijkste deelnemers aan de experimenten bij CERN in Genève. Daar worden de eigenschappen van het higgsboson onderzocht, evenals de nieuwe fysica die daaraan ten grondslag ligt. Maar Nikhef doet nog veel meer. Onderzoekers concentreren zich op donkere materie en donkere energie – waarschijnlijk essentiële ingrediënten om de uitdijning van het heelal te verklaren. Andere onderzoeksthema's zijn de eigenschappen van neutrino's en zwaartekrachtsgolven. Kortom: het onderzoek van Nikhef omvat alles, van de allerkleinste elementaire deeltjes tot de structuur en dynamiek van het heelal.

Het Nikhef-onderzoek heeft zijn kwaliteit en breedte verkregen door de sterke verbondenheid van alle Nederlandse universiteitsgroepen die

in dit veld actief zijn. Met de genereuze steun van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) zet Nikhef alles op alles om deze groepen het optimale resultaat te laten behalen. Naast de geweldige wetenschappelijke uitdagingen, stellen de extreem complexe experimenten van Nikhef ook extreem hoge (informatie-) technologische eisen aan de medewerkers van Nikhef. Dat Nikhef in zijn missie slaagt, is te danken aan de samenwerking tussen alle partners in Nederland.

Door vragen van het algemene publiek omtrent de bouwstenen van het universum te beantwoorden, en door zijn geavanceerde technologie aan externe bedrijven en spin-offs beschikbaar te stellen, hebben de onderzoeksactiviteiten van Nikhef veel invloed op de maatschappij. Deze special draagt daar aan bij en is bedoeld om het publiek bij het onderzoek te betrekken. Hierin leest u een uitgebreid overzicht van het fascinerende verhaal achter Nikhef.

**Stan Gielen**  
Voorzitter NWO

## Nieuwsgierigheid

Als u Nikhef hoort, denkt u wellicht als eerste aan de ontdekking van het higgs-deeltje en de waarneming van de zwaartekrachtsgolven. Dit zijn inderdaad twee prachtige hoogtepunten in het brede palet van onderzoek waar Nikhef jarenlang in heeft geïnvesteerd. Deze ontdekkingen markeren niet alleen het succes van experimenten, maar ook het begin van heel nieuwe uitdagingen. Onze ambitie is het ontstaan en de evolutie van het hele universum te beschrijven in elementaire bouwstenen. Dat betekent dat onderzoek naar het allerkleinste samen komt te vallen met onderzoek naar het heelal.

Ik ben blij met deze kans om een special te maken met *New Scientist*. Ons instituut zoekt antwoorden op de grote natuurkundige vragen van deze tijd en die wetenschappelijke nieuwsgierigheid delen wij graag. Onderzoek op Nikhef doen we met bijna driehonderd gedreven senior- en junior-onderzoekers, experts, engineers en instrumentmakers. Alleen via internationale samenwerking en het benutten en bouwen van grote infrastructuren kunnen we de grenzen van onze kennis verder verleggen.

Nikhef heeft in de afgelopen jaren een flink aandeel verkregen in toonaangevende internationale experimenten op CERN en in de astrodeeltjesfysica. Met veel energie, enthousiasme en kennis vergroten wij in deze verschillende settings onze kennis over elementaire bouwstenen van het universum. Wetenschappers uit alle delen van de wereld komen naar ons toe om deze kennis op te doen. Naast het bevorderen van internationale samenwerking en het opleiden van talent levert onze grootschalige wetenschap bovendien toepassingen op die door het bedrijfsleven worden omarmd.

Wij hopen dat u met het lezen van deze special net zo geïnspireerd raakt als wij in ons dagelijks vak!

**Stan Bentvelsen**  
Directeur Nikhef

### Volg ons ook op



Twitter [twitter.com/  
NewScientistNL](https://twitter.com/NewScientistNL)



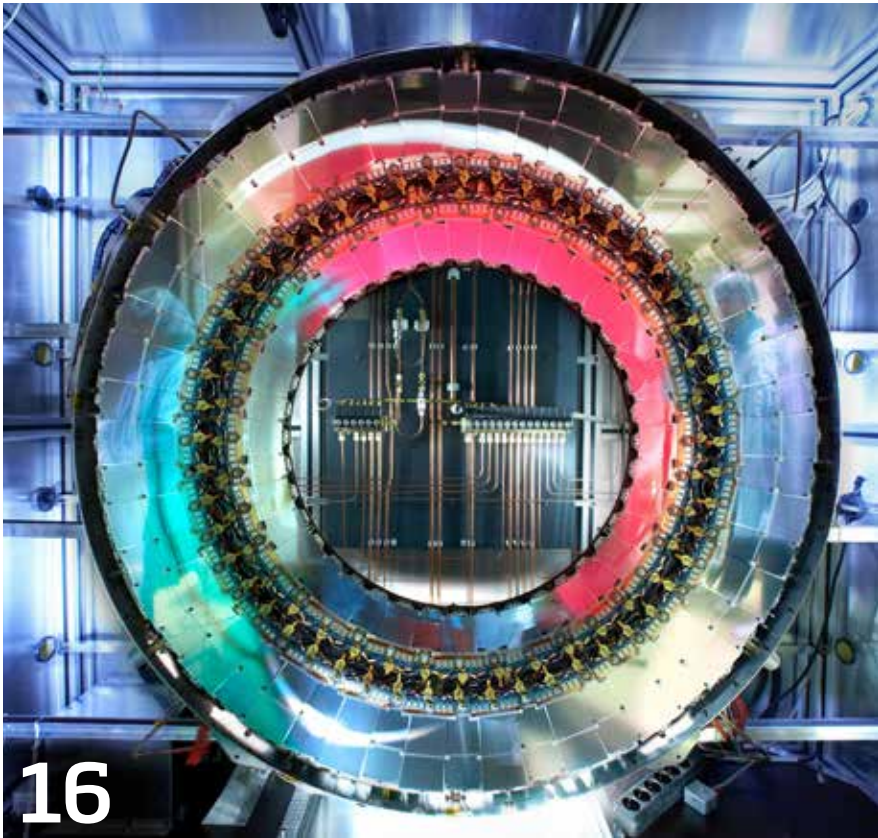
Facebook [facebook.com/  
NewScientistNL](https://facebook.com/NewScientistNL)



22



32



16



30

Features

- 06 Voorstellen** Een rondleiding door Nikhef, de plek waar gespeurd wordt naar de grenzen van het onbekende.
- 12 CERN** Al jarenlang is er druk verkeer tussen Amsterdam en Genève. Nikhef-onderzoekers speelden een belangrijke rol bij de vondst van het higgsdeeltje. Nu zoeken ze naar nog meer nieuwe deeltjes.

- 22 Donkere materie** De binnenkant van een berg in de Apennijnen vormt het decor van het Xenon1T-experiment. Daarmee proberen deeltjesfysici de best verstopte deeltjes van het heelal te ontmaskeren.
- 26 Einstein in Limburg** Met een nieuw te bouwen detector hopen fysici zwaartekrachtsgolven nog beter te kunnen onderzoeken. Zuid-Limburg lijkt de meest geschikte omgeving voor Einstein Telescope.

- 30 Toekomsttechnologie** De computerafdeling van Nikhef dient in de eerste plaats om onderzoek mogelijk te maken. Die faciliterende rol heeft Nederland de beste e-infrastructuur van Europa gebracht.
- 32 Ideeënmachine** Op de bovenste verdieping is de theoriegroep van Nikhef al bezig de opvolger van het higgsdeeltje in kaart te brengen.



COVERONTWERP: PASCAL TIEMAN

26 Jo van den Brand  
'Over de hele wereld hebben we gezocht naar plekken met zo min mogelijk ruis. Limburg blijkt perfect'

In beeld

- 10 Tijdlijn** Wetenschappelijke doorbraken waarbij Nikhef-onderzoekers betrokken waren.
- 16 Fotoreportage** Een kijkje onder de motorkap van Nikhef: de mechanische afdeling.
- 24 Infographic** Duizenden glazen bollen op de bodem van de zee.
- 35 Ingezoomd** Het pronkstuk van CERN: de ATLAS-detector.

Opinie

- 21 Interview** Sander Klous, partner bij KPMG: 'Het ATLAS-experiment is een fabriek. Je leert er onderzoek doen op een bijna industriële manier.'
- 23 Een minuutje met...** KNAW-voorzitter José van Dijk: 'Nikhef trekt de fundamentele routes, het nieuwsgierigheidsgedreven onderzoek. Het fungeert daarbij als een magneet die anderen meetrekt.'
- 29 Interview** Mark Beker, directeur van Innoseis: 'Op het Science Park zitten we midden in de kennis en technologische ontwikkelingen.'
- 31 Column** FOM-directeur Christa Hooijer: 'Het deeltjes zoeken begeistert iedere medewerker op dit instituut en in het mooie vakgebied van de subatomaire fysica.'

COLOFON

**KLANTENSERVICE**  
0900-0401351 (15 ct/min.)  
of vanuit België: 0031 88 1214 012  
voor contact over abonnementen, bestellingen, wijzigingen en vragen. Of mail naar [lezersservice@veenmedia.nl](mailto:lezersservice@veenmedia.nl) of kijk op [newscientist.nl/faq](http://newscientist.nl/faq)  
**Nederland** Postbus 11249, 3004 EE Rotterdam t.n.v. Veen Media, Utrecht  
**België** Postbus 102, 2910 Essen t.n.v. Veen Media, Utrecht

**Tarieven** 11 nummers per jaar, incl. porto  
**Abonnement** € 92,85; jongeren € 68,50; Europa € 121,42; Buiten Europa € 141,22  
**Losse nummers** € 8,50 (excl. verzendkosten) Een abonnement wordt tot wederopzegging aangegaan, tenzij anders vermeld.

**Hoofredactie** Jim Jansen  
**Redactie** Jaap Augustinus (beeldredactie), Ivar Dilweg, Yannick Fritschy, George van Hal, Joris Janssen, Wim de Jong (eindredactie), Loes Maassen, Dorine Schenk **Tel** +31-(0)88-700 2931 **Mail** [redactie@newscientist.nl](mailto:redactie@newscientist.nl) (voor persberichten), [info@newscientist.nl](mailto:info@newscientist.nl) (uitsluitend voor vragen aan redactie), [lezersservice@veenmedia.nl](mailto:lezersservice@veenmedia.nl) (voor vragen en wijzigingen in abonnementen)  
**Post** Postbus 57191, 1040 BB Amsterdam  
**Bezoekadres** Danzigerkade 9D, 1013 AP Amsterdam  
**Aan dit nummer werkten mee** Stan Bentvelsen, Stan Gielen, Ans Hekkenberg, Christa Hooijer, Kees Huyser  
**Basisontwerp** Sanna Terpstra (Twin Media bv)  
**Vormgeving** Janneke Louwaars, Dennis Douze (Twin Media bv) en Pascal Tieman  
**Brandmanager** José Snel (José.snel@veenmedia.nl)  
**Marketingcoördinator** Aniek Gillissen ([aniek.gillissen@veenmedia.nl](mailto:aniek.gillissen@veenmedia.nl))  
**Sales** Alex Sieval ([sales@veenmedia.nl](mailto:sales@veenmedia.nl)) +31-(0)88-700 2679  
**Productiemanager** Sonja Bon  
**Druk** Habo DaCosta bv  
**Distributie** Aldipress (NL), AMP (BE)  
**ISSN** 2214-7403  
De uitgever is niet aansprakelijk voor schade als gevolg van druk- en zetfouten.

**COPYRIGHT** Deze Nikhef-special is een eenmalige uitgave van Veen Media, in samenwerking met onderzoeksinstituut Nikhef. Alle kopij © 2016 Veen Media. Het logo en overige handelsmerken van New Scientist zijn eigendom van Reed Business Information Ltd. Niets uit deze uitgave mag op enigerlei wijze worden overgenomen of in een geautomatiseerd gegevensbestand worden opgenomen zonder schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever heeft ernaar gestreefd de auteursrechten van de illustraties volgens de wettelijke bepalingen te regelen. Zij die menen nog zekere rechten te kunnen doen gelden, kunnen zich wenden tot de uitgever.





# De grenzen van het onbekende

Zwaartekrachtsgolven, het higgsboson: de media rapporteren vaak over mooie onderzoeksresultaten rond exotische deeltjes, kosmische straling of de geheimen van ons heelal. Maar waar komen al die ontdekkingen vandaan? We nemen je mee naar het Nationaal instituut voor subatomaire fysica: Nikhef.

Door Ans Hekkenberg

Op het Amsterdam Science Park, ietwat verstopt aan de achterzijde, ligt het hoofdgebouw van Nikhef. Een nietsvermoedende voorbijganger zou zomaar kunnen langslopen zonder te beseffen dat hier de grenzen van het onbekende worden opgezocht en overwonnen. Het instituut doet onderzoek naar de grootste wetenschappelijke vragen van onze tijd. Hoe zien de bouwstenen van ons universum eruit? Wat is donkere materie? Wat gebeurde er vlak na de oerknal?

## Wetenschapsmachines

Die vragen kunnen niet worden beantwoord zonder experimenten. Daarvoor zijn apparaten nodig, zoals gigantische deeltjesversnellers, detectoren die ongrijpbare materie kunnen vinden of telescopen die kosmische straling meten. Deze wetenschapsmachines kun je niet in een winkel kopen. Ze moeten dus voor elke specifieke klus worden ontworpen en gemaakt. 'Nikhef heeft drie technische afdelingen die de

apparaten in elkaar zetten,' zegt Niels van Bakel, hoofd van de onderzoeksgroep die de instrumenten ontwerpt. 'Zonder hen zouden de wetenschappers hun mooie ideeën niet kunnen uitvoeren.'

De begane grond van het Nikhef-gebouw staat dan ook voornamelijk in het teken van dit technische werk. Hier zijn de werkplaatsen te vinden waar technici de apparaten in elkaar zetten. Sommige van deze machines vinden een toepassing in de maatschappij, zoals sensoren of apparaten voor medische beeldvorming. Andere bouwsels gaan juist op pad naar grote wetenschappelijke experimenten. Onderdelen voor de CERN-detectoren gaan naar Genève, waar diep onder de grond de gigantische deeltjesversneller LHC op ze wacht. Grote glazen bollen waarin lichtsensoren zitten verstopt, zullen naar de bodem van de Middellandse Zee afdalen om daar neutrino's te meten.

## Internationaal

Dat is dan ook kenmerkend aan Nikhef: het Nederlandse instituut is betrokken bij veel internationale samenwerkingen.

We begrijpen alles in de versneller, maar niets in het heelal zelf

Nikhef-wetenschappers zijn te vinden bij CERN, maar ook bij een Italiaans lab dat zoekt naar donkere materie en bij een observatorium op de Argentijnse pampa dat kosmische straling bestudeert. Van dat laatste project, dat bij het Pierre Auger Observatory plaatsvindt, is Sijbrand de Jong de Nikhef-projectleider. Volgens hem kent het onderzoek van Nikhef twee overkoepelende thema's. 'Ten eerste onderzoeken we elementaire deeltjes met behulp van experimenten die we helemaal zelf in de hand hebben. Daarbij schieten we bewust deeltjes op elkaar af in grote versnellers. Ten tweede onderzoeken we deeltjes die vanuit de kosmos op de aarde afrazen. Ook die komen eigenlijk uit een versneller, maar dan een natuurlijke. Ergens in het heelal krijgen deze deeltjes immers een enorme portie energie mee.' Beide onderzoeksvelden hebben zo hun voor- en nadelen. De Jong: 'Kosmische

deeltjes hebben soms zelfs veertig keer zoveel energie als die bij in de LHC-versneller van CERN. Daarentegen observeren wij bij Auger hoogstens zo'n 25 deeltjes per jaar, terwijl de LHC dat aantal in een fractie van een seconde produceert.'

What the hell is going on?

Hoewel de natuur de beste deeltjesversnellers biedt, bestaat er een spanningsveld tussen de wereld in het lab en die daarbuiten. Marcel Merk, Nikhef-groepsleider van een van de CERN-experimenten: 'De huidige theorie, die alle deeltjes en krachten beschrijft, lijkt te kloppen met wat we in deeltjesversnellers zien. Maar dezelfde theorie kan niet verklaren wat we in het heelal zien. We kunnen bijvoorbeeld niet verklaren waarom er wel materie in het heelal zit, maar geen antimaterie,' zegt Merk. 'We begrijpen dus alles in de versneller, maar niets in het heelal zelf. Daar

ligt nog een grote uitdaging. *What the hell is going on?*'

Die drang om de openstaande vragen te beantwoorden deelt Merk met al zijn Nikhef-collega's. Jo van de Brand wil met zwaartekrachtsgolven de oerknal bestuderen, want 'we begrijpen nog niets van die periode.' Patrick Decowski wil een directe meting van donkere materie doen, omdat 'het letterlijk nog nooit door iemand is gedaan.' En collega Wouter Verkerke wil met zijn onderzoeksgroep 'naar de frontlinie van het allerkleinste, om bij te dragen aan een beter begrip van de bouwstenen van alles wat we om ons heen zien.'

Van tafelblad tot theorie

Maar niet iedereen heeft gigantische experimenten nodig om de grenzen van de kennis te verleggen. Het Nikhef-samenwerkingsverband bestaat uit de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie en

vijf universiteiten (de Rijksuniversiteit Groningen, Radboud Universiteit Nijmegen, Universiteit van Amsterdam, Universiteit Utrecht en de Vrije Universiteit in Amsterdam). In Groningen zit een groep wiens experiment gemakkelijk op het tafelblad past. 'Nikhef staat natuurlijk bekend om grote apparaten,' beaamt de Groningse groepsleider Steven Hoeksta. 'Maar met onze kleine opstelling kunnen ook wij fundamentele fysica onderzoeken. We zetten moleculen vrijwel stil en bestuderen vervolgens of elektronen wel rond zijn.' Waar het werk ook plaatsvindt, het doel is hetzelfde: met slimme proefopstellingen ontdekken hoe de wereld in elkaar steekt. Maar Nikhef kent ook een afdeling die juist niet zelf aan de knoppen van een experiment draait. Bovenin het Nikhef-gebouw – toepasselijk 'met het hoofd in de wolken' – zit de theoriegroep. 'Wij werken aan theoretische modellen,' zegt groepsleider

Eric Laenen. 'Over verschillende onderwerpen, van deeltjesfysica tot kosmologie. We overleggen veel met onze experimentele collega's. Samen worstelen we met ideeën en bedenken we nieuwe concepten. Ons doel is om een steeds dieper begrip te krijgen van de fysica. Het is net als een nieuwe taal leren: om je de taal eigen te maken, moet je die niet alleen kunnen volgen, maar ook beheersen.' Of de theoretici de taal van de natuurkunde daadwerkelijk hebben doorgrond, dat beproeven hun experimentele collega's. En om die experimenten uit te kunnen voeren, rekenen zij op hun technische collega's. Zo loopt er een rode draad door Nikhef: van het worstelen met wetenschappelijke theorieën tot het hands-on bouwen van experimenten, oftewel van denken tot doen. Met als resultaat: een instituut dat de grenzen van de menselijke kennis beetje bij beetje verschuift. ■



Niels van Bakel

Detector R&D

'Wat is donkere materie? Wat zijn de kleinste deeltjes? Om fundamentele raadsels op te lossen, zijn experimenten nodig. Maar er is geen catalogus van deeltjesversnellers of zwaartekrachtsgolfdetectoren. Dat lost de Detector R&D-groep op: wij bouwen apparaten waarmee Nikhef-onderzoekers hun experimenten uitvoeren.'



Marcel Merk

LHCb

'Je zou verwachten dat het heelal evenveel materie als antimaterie bevat, maar dat is niet zo. Er is alleen materie. Waarom? Ik ben geobsedeerd door dit vraagstuk. Nu gebeurde er tijdens de oerknal iets waanzinnigs: deeltjes kregen spontaan massa. Ik wil weten of die gebeurtenis de afwezigheid van antimaterie kan verklaren.'



Sijbrand de Jong

AUGER

'We onderzoeken deeltjes met ongelofelijk veel energie, die uit het universum op ons afkomen. Dan moet je bijvoorbeeld denken aan protonen, bouwstenen van atomen, die dezelfde energie bevatten als een hard geslagen squashbal. Wij willen weten waar zulke deeltjes vandaan komen en wat er gebeurt als ze de atmosfeer raken.'



Jo van de Brand

Virgo

'Op 14 september 2015 maten we voor het eerst zwaartekrachtsgolven: rimpelingen in ruimte en tijd. Zwaartekrachtsgolven bieden ons een nieuwe manier om het universum te bestuderen. Nu kunnen we eindelijk het hoofdstuk schrijven over hoe de ruimtetijd van ons heelal in elkaar zit. Een mijlpaal in de geschiedenis van de mensheid!'



Patrick Decowski

Xenon1T

'Ongeveer 85 procent van alle materie in het heelal is 'donkere materie': we weten niet wat het is en we kunnen het ook niet rechtstreeks zien. Maar het is overal. Elke seconde razen zo'n miljard donkere-materiedeeltjes door ons heen. Met ondergrondse detectoren hopen we donkere materie aan het licht te brengen.'



Jeff Templon

Advanced Computing for Research

'Sommige experimenten leveren enorm veel data op. Denk aan de LHC, waar in een seconde miljarden botsingen plaatsvinden. Om die informatie te verwerken, hebben we grensverleggende computersystemen nodig. Daar is mijn groep voor verantwoordelijk. Onze ambitie is dat computing nooit de wetenschap vertraagt.'



Eric Laenen

Theorie

'De theoriegroep werkt aan veel onderwerpen, van deeltjes tot kosmologie. De afdeling is een levendige markt waar ideeën worden gedeeld, uitgewisseld en gebruikt. Dat levert mooie inzichten op: een idee uit het ene vakgebied is soms ook in een ander te gebruiken. Daarom zijn juist discussies bij de koffietafel zo waardevol.'



Aart Heijboer

KM3NET

'Met KM3NeT gaan we neutrino's uit het heelal meten. Andere detectoren kunnen dat ook, maar onze detector kan veel beter de richting van de deeltjes bepalen. Die zal dus kunnen ontcijferen waar ze vandaan komen. We kunnen dan heel veel leren over de kosmische bronnen en over de eigenschappen van neutrino's.'



Nicolo de Groot

ATLAS

'De natuurkunde kent het standaardmodel, de theorie die alle bekende krachten en materiedeeltjes beschrijft. We weten al dat dit model niet compleet is. De komende jaren hebben we een unieke kans om te ontdekken wat er nog ontbreekt. Met ATLAS gaan we op zoek naar nieuwe deeltjes en nieuwe fysica.'



Wouter Verkerke

ATLAS

'De LHC, de deeltjesversneller van CERN, laat protonen op elkaar botsen. Zo'n proton is eigenlijk niet één deeltje, maar eerder een zak met troep. Door zo'n botsing knallen de protonen dan ook uiteen in allerlei andere deeltjes. Door de brokstukken te bestuderen, kijken we als het ware onder de motorkap van de natuur.'



Raimond Snellings

ALICE

'Mijn groep maakt soep. Niet zomaar soep, maar een soep van deeltjes die het quark-gluon-plasma heet. Direct na de oerknal was het universum hiermee gevuld. Microseconden later veranderde het quark-gluonplasma in de deeltjes die we nu kennen: protonen en neutronen. Wij maken dus eigenlijk mini-oerknallen in het lab.'



Steven Hoekstra

eEDM (eind 2016)

'De meeste Nikhef-wetenschappers versnellen deeltjes voor hun onderzoek in gigantische apparaten. Onze groep in Groningen vertraagt ze juist, met een experiment dat op het tafelblad past. We zetten moleculen vrijwel stil en bestuderen vervolgens de elektronen. Op deze manier hopen we te ontdekken of een elektron wel helemaal rond is.'

# Groot succes door de jaren heen

Al vanaf de oprichting werkt Nikhef mee aan internationaal toponderzoek. Een overzicht van de grootste wetenschappelijke doorbraken waarbij Nikhef-onderzoekers een belangrijke rol speelden.

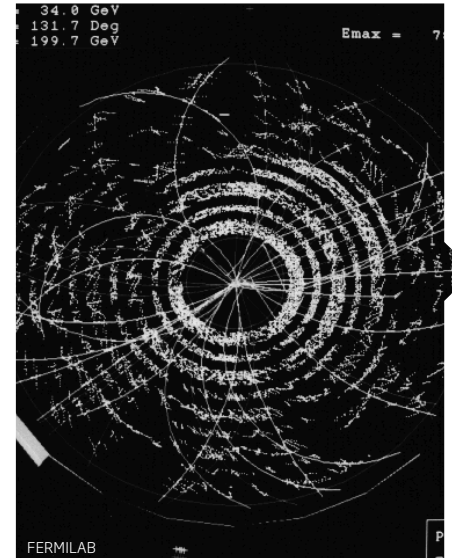
Tekst: Ans Hekkenberg



## 1991

### Drie neutrino-generaties

CERN- en Nikhef-fysici stellen met deeltjesversneller LEP (de voorloper van de LHC, zie beeld links) vast dat er drie 'generaties' neutrino's bestaan. Dat zijn het elektron-neutrino, het muon-neutrino en het tau-neutrino.



FERMILAB

## 1995

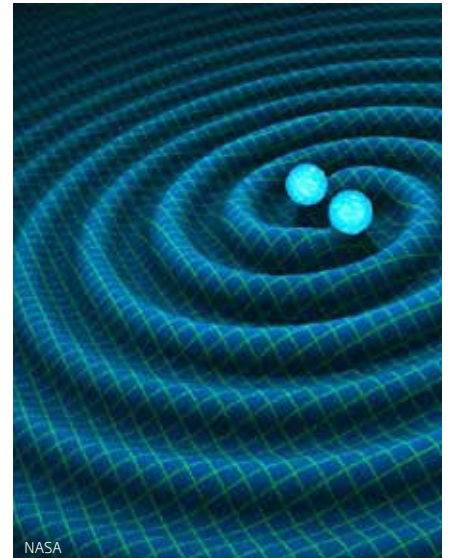
### Ontdekking topquark

Het Amerikaanse Fermilab, waar ook Nikhef-onderzoekers werken, heeft een nieuw deeltje ontdekt: de topquark (beeld boven). De topquark is een enorm zwaargewicht voor zo'n minuscule elementaire deeltje: één topquark is ongeveer even zwaar als een goudatoom.

## 1999

### Ladingsverdeling neutron gemeten

Neutronen bestaan uit een positief geladen up-quark, en twee negatieve down-quarks. Met behulp van versneller AmPS, de Amsterdam Pulse Stretcher, is gemeten hoe deze lading binnen een neutron is verdeeld.



NASA

## 1984

### Ontwikkeling FORM

De deeltjesfysica barst van de lange berekeningen. Het computerprogramma FORM neemt fysici deze berekeningen uit handen en levert razendsnel antwoorden. Deze Nikhef-creatie is tegenwoordig de wereldstandaard in de hoge-energiefysica.

## 1992

### Derde website ter wereld

Om grote hoeveelheden gegevens met andere instituten te kunnen delen, doet Nikhef van kiet af aan mee met het World Wide Web. [www.nikhef.nl](http://www.nikhef.nl) is 's werelds derde website. Ook het eerste programma dat in een browser draait, is afkomstig van Nikhef.

## 2006

### All data to shore

De eerste detectorlijn van ANTARES (beeld onder) is actief. Deze neutrinotelescoop bevindt zich diep in de Middellandse Zee en stuurt alle meetgegevens direct naar de kust. Dit 'all data to shore'-systeem is bedacht door wetenschappers van Nikhef.

## 2016

### Eerste detectie zwaartekrachtsgolven

Honderd jaar nadat Einstein voorspelde dat de ruimtetijd op en neer deint, melden wetenschappers dat ze dergelijke golven voor het eerst hebben gemeten. De zwaartekrachtsgolven komen van twee samensmeltende zwarte gaten.

## 1975

### Oprichting Nikhef

De Stichting FOM, Stichting IKO, de Universiteit van Amsterdam en de Katholieke Universiteit van Nijmegen richten gezamenlijk het Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energie-Fysica op (NIKHEF).

## 1983

### Ontdekking W- en Z-boson

In de SPS-deeltjesversneller van CERN botsen protonen en antiprotonen. Daarbij detecteren fysici voor het eerst het W- en Z-boson. Deze deeltjes zijn verantwoordelijk voor een fundamentele natuurkracht: de zwakke kernkracht.



DESY

## 1994

### Structuur van het proton

Bij het Duitse onderzoeksinstituut DESY (beeld links) hebben natuurkundigen, waaronder Nikhef-onderzoekers, ontdekt hoe quarks en gluonen in een proton zitten verdeeld. Deze kennis wordt vandaag de dag volop benut bij de deeltjesbotsingen van CERN.



J.A. ACUILAR

## 2012

### Ontdekking higgsboson

Het meest gezochte deeltje ter wereld is gedetecteerd bij CERN. Het bestaan van het higgsboson was in de jaren '60 al voorspeld door de Brit Peter Higgs en de Belgen Robert Brout en François Englert. Het deeltje zorgt ervoor dat andere deeltjes massa hebben.

# De snelste weg van Amsterdam naar Genève

Nikhef heeft al sinds de oprichting een innige band met deeltjesmekka CERN. Die samenwerking leidde onder andere tot het higgsdeeltje en het www. En de koek lijkt nog lang niet op.

Door Yannick Fritschy

Toets 1 voor hulp, 2 voor info over Nikhef, 3 voor info over CERN en 5 voor hoge-energiefysica. Nee, dit is niet het keuzemenu van een of andere deeltjesfysica-infolijn. Deze tekst stond in 1992 op de eerste versie van de derde website ter wereld: [www.nikhef.nl](http://www.nikhef.nl).

Het World Wide Web is een mooi voorbeeld van hoe fundamenteel natuurkundig onderzoek onverwachte, wereldveranderende toepassingen kan hebben. De eerste websites waren namelijk in het leven geroepen om uitwisseling van data tussen onderzoeksinstituten te vergemakkelijken.

Weliswaar bestonden internet en email al jaren, maar de immense hoeveelheden gegevens die bij deeltjesexperimenten tevoorschijn komen, zijn lastig per mail te versturen. Vandaar dat Nikhef zich kort na het Amerikaanse instituut SLAC aansloot op het door CERN ontwikkelde www.

Dat Nikhef er als de kippen bij was om een website te lanceren, zegt veel over de innige band die het heeft met CERN. Sinds de oprichting in 1975 is het Nederlandse instituut steeds meer betrokken geraakt bij de baanbrekende experimenten in Genève.

In de beginperiode deed Nikhef vooral op afstand mee. In die tijd werd net een nieuwe deeltjesversneller bij CERN in gebruik genomen: de Super Proton Synchrotron (SPS). Het was de eerste versneller

## Al drie decennia zit Nikhef steevast op de eerste rij

waarvoor een cirkelvormige tunnel werd uitgegraven, zodat fysici twee bundels van protonen op elkaar konden laten botsen.

Om te reconstrueren wat er precies gebeurt bij zo'n protonenbotsing, moet je weten welke interacties de deeltjes aangaan die na zo'n clash als bijproduct tevoorschijn komen. Daarom werkten Nikhef-onderzoekers in die tijd vooral aan experimenten waarmee ze het gedrag van deeltjes zoals neutrino's in kaart brachten.

Indirect droegen ze daarmee bij aan de grote vondst van SPS: de W- en Z-bosonen, de deeltjes die verantwoordelijk zijn voor de zwakke kernkracht.

Bij de volgende onderzoeken zat Nikhef steevast op de eerste rij. Het instituut nam deel aan twee van de vier experimenten van de volgende CERN-deeltjesversneller: de Large Electron-Positron Collider, kortweg LEP, vanaf 1989 in bedrijf. Bij die experimenten heeft Nikhef een groot aantal detectoronderdelen gebouwd. Voor een van de LEP-experimenten (L3) maakten Nikhef-technici bijvoorbeeld maar liefst 34 'dradenkamers'. Dat zijn constructies van vele evenwijdige draden die onder hoogspanning staan en stroompulsjes afgeven als een geladen deeltje passeert.

Met de LEP-experimenten brachten fysici de eigenschappen van de W- en Z-deeltjes verder in kaart. Ook leverden ze een belangrijke fundamentele ontdekking op, namelijk dat elementaire materiedeeltjes zoals quarks en elektronen allemaal in drie generaties voorkomen. De lichtste generatie kenden we al van de materie om ons heen, maar met de LEP-gegevens werd definitief bewezen dat elk materiedeeltje twee zwaardere, instabiele kopieën heeft.

Waarom er van elk materiedeeltje precies drie generaties zijn, is nog onbekend. Het zou zomaar iets te maken kunnen hebben met de manier waarop deeltjes hun massa krijgen. Dat gebeurt via het higgsboson: lange tijd het laatste ontbrekende puzzelstukje uit het standaardmodel van de



De ATLAS-detector in aanbouw.  
CERN

## Laaghangend fruit

Metingen van A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS) bewezen in 2012 samen met die van collegadetector CMS het bestaan van het higgsboson. Nikhef-onderzoekers hebben onder andere de buitenste laag van ATLAS ontworpen, gebouwd en getest. Ook hebben ze hard- en software ontwikkeld voor de metingen. Nu werken ze vooral aan gegevensanalyse en de ontwikkeling van nieuwe onderdelen.

ATLAS heeft grofweg twee nieuwe doelen: het higgsdeeltje beter in kaart brengen en

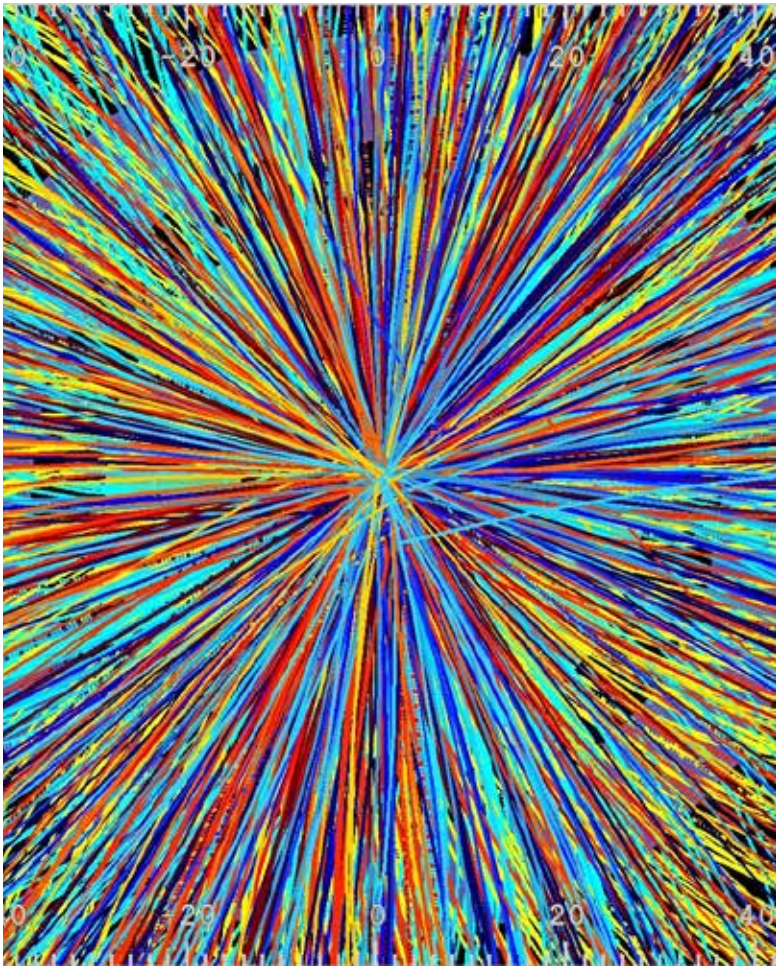
nieuwe fysica ontdekken (zie hoofdverhaal). Het eerste lukt tot dusver vrij goed. 'We hebben nu al meer data dan na de eerste run', zegt Nicolo de Groot, ATLAS-programmaleider bij Nikhef. Nieuwe fysica ontdekken blijkt lastiger. De simpelste mogelijkheid tot supersymmetrie is al vrijwel uitgesloten. Volgens De Groot is dat echter niet funest. 'Astronomische gegevens wijzen erop dat we niet het laaghangende fruit moeten plukken, maar de iets geavanceerdere opties moeten uitzoeken.'

Terug naar de oerknal

Met de ALICE-detector onderzoeken fysici botsingen van zware atoomkernen. Ze hopen zo meer te leren over quarks: de deeltjes waaruit onder andere protonen en neutronen zijn opgebouwd. Quarks zijn onder normale omstandigheden niet los van elkaar te krijgen. Waarom dit zo is, weten fysici niet. Ook weten ze niet precies waarom een proton honderd keer zo zwaar is als de drie quarks waaruit het is opgebouwd bij elkaar.

Door zware atoomkernen met bijna de lichtsnelheid op elkaar te laten botsen, brengen de ALICE-onderzoekers quarks in een gloeiendhete toestand – zo’n 100.000 keer zo warm als in het centrum van de zon. In zo’n ‘quark-gluon-plasma’ zijn de quarks afzonderlijk bestudeerbaar. Zo hopen de onderzoekers bovendaande twee vragen te beantwoorden. Ook geeft het experiment inzicht in het vroege heelal. Vlak na de oerknal was dat volgens de huidige theorieën namelijk gevuld met een quark-gluon-plasma.

ALICE heeft tot nu toe al veel nieuwe informatie opgeleverd. ‘De viscositeit van het quark-gluon-plasma blijkt totaal anders dan we tien jaar geleden dachten’, zegt Raimond Snellings, ALICE-programmaleider bij Nikhef. Nikhef draagt veel bij aan het up-to-date houden van ALICE. Snellings: ‘We hebben meegebouwd aan de huidige siliciumdetector, maar die wordt bij de volgende upgrade vervangen. Wij zullen vooral aan de buitenste delen van de nieuwe detector werken.’



Deze kleurenpracht kwam voort uit de allereerste ALICE-metingen van botsende loodionen. CERN

deeltjesfysica. Dit deeltje werd in 2012 gevonden met de Large Hadron Collider (LHC), die na de sluiting van de LEP in dezelfde tunnel was gebouwd.

De vondst van het higgsdeeltje kwam op naam van het ATLAS- en CMS-experiment. Het was een baanbrekend resultaat, maar dat betekent niet dat de onderzoekers van ATLAS (en die van Nikhef, zie kader p.13) nu op hun lauweren kunnen rusten. Fysici gaan ervan uit dat er nog heel wat deeltjes bestaan die momenteel buiten het Standardmodel vallen. Dat moet wel, want volgens de huidige theorieën bestaat 85 procent van de materie in het heelal uit onbekend spul: de beruchte donkere materie.

Daarom is de LHC de afgelopen jaren opgeschaald naar een nog hogere energie: van 7 naar 13 Tera-elektronvolt per botsing. Met deze ontzagwekkende energie hopen fysici nieuwe deeltjes te creëren met de juiste eigenschappen om donkere materie te kunnen zijn. Dat moeten deeltjes zijn die behalve via de zwaartekracht nauwelijks met andere deeltjes reageren. De ATLAS-onderzoekers speuren vooral naar supersymmetrische deeltjes: zware

tweelingbroers van de huidige deeltjes. In theorie kunnen dit soort deeltjes bestaan, maar in experimenten zijn ze nog nooit waargenomen.

Eind 2015 lichtten de harten van de mensen van ATLAS even op, toen ze een piekje in de LHC-gegevens zagen dat ze niet direct konden verklaren. Meteen gonsde het van de geruchten: was het een tweede higgsdeeltje, of misschien zelfs een zo vurig gewenst supersymmetrisch deeltje? Uiteindelijk bleek het piekje na veel extra metingen toe te schrijven aan statistische ruis. Jammer, maar niet geheel onverwacht, volgens ATLAS-programmaleider Nicolo de Groot. ‘Natuurlijk was het even spannend, maar de buitenwereld maakte er een stuk meer van dan de onderzoekers.’

Het ontdekken van een nieuw deeltje is volgens De Groot lastiger dan in 2012. ‘In tegenstelling tot bij het higgsdeeltje weten we nu niet precies waar we moeten zoeken’, zegt hij. ‘Er zijn genoeg aanwijzingen dat nieuwe deeltjes bestaan, maar is de LHC krachtig genoeg om ze te vinden?’ Maar ook als er geen deeltje gevonden



Bij de LHCb-detector staat de *b* voor *beauty*. CERN

wordt, is er volgens De Groot sprake van vooruitgang. ‘De limieten schuiven naar elkaar toe. De minimale massa van supersymmetrische deeltjes is al een stuk omhoog gegaan, doordat we ze bij de huidige botsingen niet hebben gezien. De massa kan ook niet al te hoog zijn, omdat ze dan niet goed in de huidige theorieën passen.’

Een grootse ontdekking laat van de kant van ATLAS dus waarschijnlijk nog even op zich wachten. Misschien komt zo’n ontdekking wel eerder uit een andere hoek. Naast ATLAS en CMS zijn er namelijk nog twee belangrijke detectoren gericht op de LHC – allebei met flinke Nikhef-inbreng.

Een van die twee is de ALICE-detector. Daarmee onderzoeken deeltjesfysici het heelal zoals het vlak na de oerknal eruit zag (zie kader p. 14). Raimond Snellings is namens Nikhef programmaleider van het ALICE-experiment. Dat heeft tot nu toe geen wereldschokkend, higgsachtig resultaat opgeleverd, maar Snellings is hoopvol. ‘De volgende grote ontdekking kan van alle drie de experimenten komen, maar ik geef ALICE en LHCb een iets grotere kans dan ATLAS’, zegt hij. ‘Wij bestuderen momen-

Verboden verval

In het LHCb-experiment staat het ‘beauty-quark’ centraal. Dit deeltje kan de sleutel zijn tot het oplossen van een groot natuurkundig mysterie. Volgens de huidige theorieën was er vlak na de oerknal evenveel materie als antimaterie. Waarom zien we dan louter materie om ons heen?

Het LHCb-team vergelijkt het beauty-quark met zijn tegenpool, het anti-beauty-quark. Deze deeltjes komen in de natuur niet voor, maar ontstaan wel uit botsingen in de LHC. De onderzoekers hopen minieme verschillen in hun eigenschappen te zien die het materiemysterie oplossen.

Mogelijk spelen onontdekte deeltjes daarbij een rol. ‘Bij het verval van een b-deeltje kan een tau-deeltje of muon tevoorschijn komen. In theorie

heeft de natuur geen voorkeur voor een van die twee’, vertelt Marcel Merk, LHCb-programmaleider bij Nikhef. ‘Wij hebben aanwijzingen gevonden dat er wel een afwijking is. Als dat zo is, is er een onbekende kracht in het spel.’

Volgens Merk is het niet ondenkbaar dat LHCb zo’n nieuw krachtdeeltje zal ontdekken. ‘We stonden al in *Nature* met onze detectie van ‘verboden verval’, zegt hij. ‘Dat is een vervalvorm die in theorie één op de drie miljard keer voorkomt. Als dit vaker of minder vaak gebeurt, wijst dat op een nieuw zwaar deeltje.’

Nikhef loopt voorop in deze jacht. Merk: ‘We hebben twee cruciale detectoronderdelen gebouwd. Ook gaven onze postdocs leiding aan de analyse van het verboden verval.’

‘We kunnen elk moment een krachtdragend deeltje ontdekken dat niet voorkomt in het standaardmodel’

teel de effecten van grote magneetvelden op een quark-gluon-plasma. Als dat iets oplevert, is dat zeker voorpaginanieuws.’

De andere detector is de LHCb. Daarmee hopen onderzoekers te achterhalen waarom er zoveel meer materie dan antimaterie in het heelal is (zie kader boven). Volgens Marcel Merk, LHCb-programmaleider bij Nikhef, is een ontdekking van een nieuw deeltje op korte termijn zeker mogelijk. ‘We hebben aanwijzingen dat er zware, krachtdragende deeltjes bestaan die niet in het standaardmodel voorkomen’, zegt hij. ‘Afhankelijk van hoe zwaar zo’n deeltje precies is, kunnen we het elk moment ontdekken.’ Eerder dan ATLAS? ‘LHCb kan aantonen dat er veel zwaardere deeltjes bestaan

dan de deeltjes die in de LHC gemaakt worden’, zegt Merk. ‘In dat opzicht liggen we voor op ATLAS. Maar uiteindelijk zijn zij het die nieuwe deeltjes meten.’

Je zou misschien een flinke concurrentiestrijd tussen de experimenten verwachten, maar volgens de programmaleiders is er vooral sprake van samenwerking. Het bepalen van welke deeltjes in de LHC op elkaar zullen botsen, gaat bijvoorbeeld in goed overleg. Snellings: ‘Wij kijken vooral naar botsingen van zware atoomkernen, maar protonbotsingen zijn voor ons ook interessant. En tegenwoordig kijken ATLAS en CMS ook naar zware ionen. Alle onderzoekers zijn dus het hele jaar door tegelijk aan het meten. Er zijn hooguit wat discussies over experimentele details.’

Samenwerking staat dus centraal: tussen de verschillende experimenten op CERN, en tussen CERN, Nikhef en alle andere deelnemende instituten. Met man en macht jagen fysici op de volgende fundamentele ontdekking. En als die niet komt, dan nog kan zo’n samenwerking iets heel moois opleveren. Vraag maar aan de makers van het World Wide Web. ■

# Achter de schermen

Natuurkundige experimenten komen meestal pas onder de aandacht als ze resultaten opleveren. Maar elk groot experiment begint met het maken van de kleinste onderdelen. Achter de schermen werken de technici van Nikhef al aan de volgende doorbraken.

Tekst: Ans Hekkenberg  
Beelden: Marieke de Lorijn / Marsprine

**B**ij topwetenschap horen baanbrekende experimenten. Het bekendste voorbeeld in de natuurkunde is de gigantische deeltjesversneller die bij Geneve in de grond zit: de LHC. In deze 27 kilometer lange ring knallen deeltjes met ongelooflijke snelheden op elkaar.

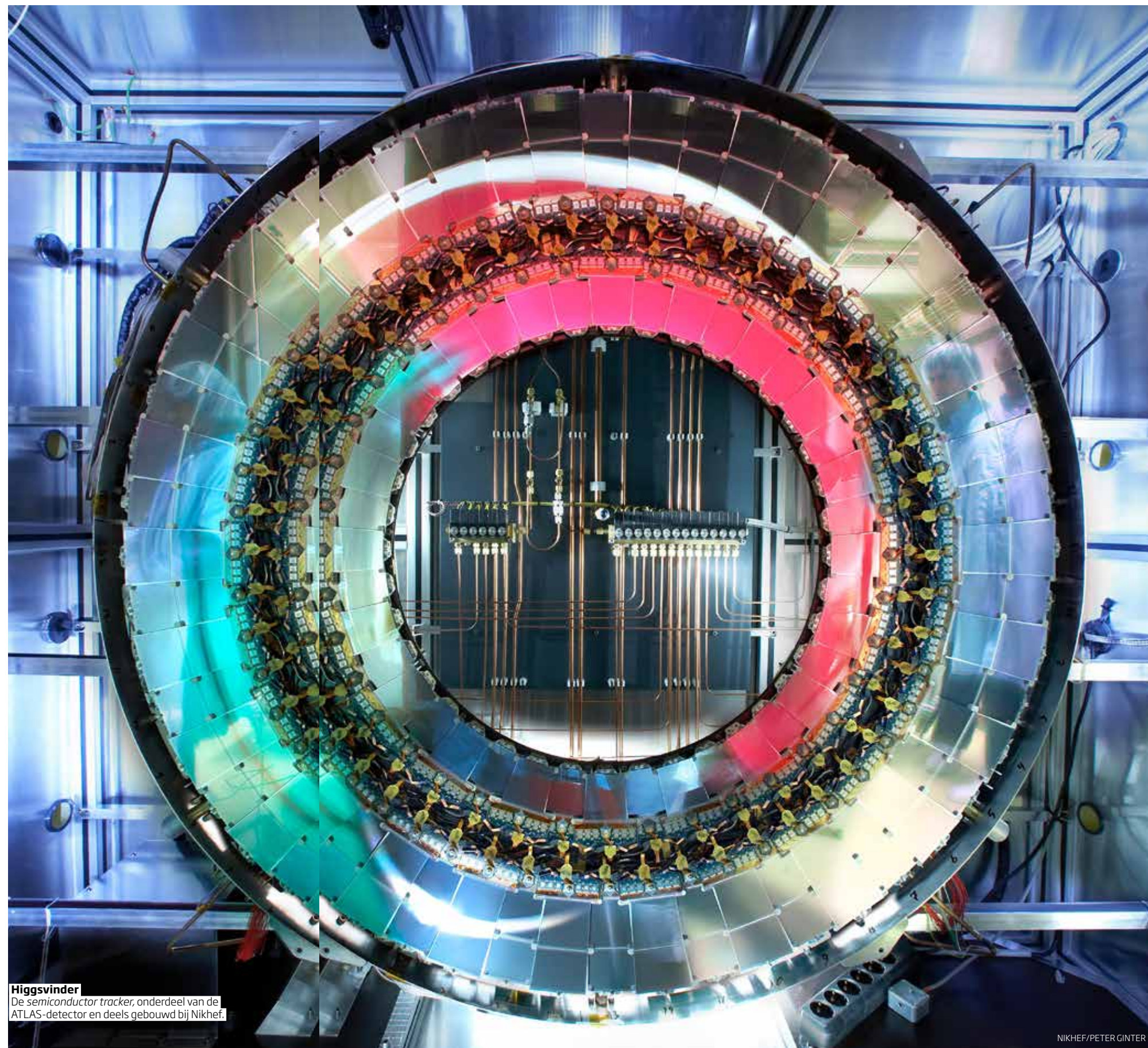
De natuurkunde kent nog veel meer experimenten van dat kaliber. In de Middellandse Zee bouwen wetenschappers en engineers aan de zogeheten KM3NeT-detector, die op zoek gaat naar neutrino's: deeltjes die overal moeiteloos doorheen vliegen. En voor de zoektocht naar zwaartekrachtsgolven – rimpels in de ruimtetijd – zijn detectoren nodig die niet meetrillen met de bewegingen in de aardbodem.

Dergelijke experimenten kunnen niet bestaan zonder de technici die ze bouwen. Nikhef heeft drie technische afdelingen: elektronicatechnologie, mechanische

technologie en computertechnologie. De tachtig mensen die op deze afdelingen werken, zorgen ervoor dat de wetenschappers hun theorieën kunnen toetsen. Zo maken ze onderdelen voor de detectoren van de LHC en systemen die zelfs de allerkleinste trillingen dempen voor de zwaartekrachtsgolfdetectoren.

‘Het is dynamisch werk’, zegt Niels van Bakel. Hij leidt de Detector R&D-onderzoeksgroep, die nauw samenwerkt met de technische afdelingen. ‘Voor elk experiment bouwen de afdelingen wat anders. Het geeft veel voldoening als het apparaat waar jij aan hebt meegebouwd een grote ontdekking doet. Neem bijvoorbeeld de eerste detectie van de zwaartekrachtsgolven begin 2016. Dat was een overwinning voor de wetenschappers, maar ook zeker voor de technici.’

Slechts weinig mensen kunnen zomaar de werkvloer betreden waar al dat technische werk gebeurt. Voor deze uitgave nemen we een bijzonder kijkje onder de motorkap van Nikhef.



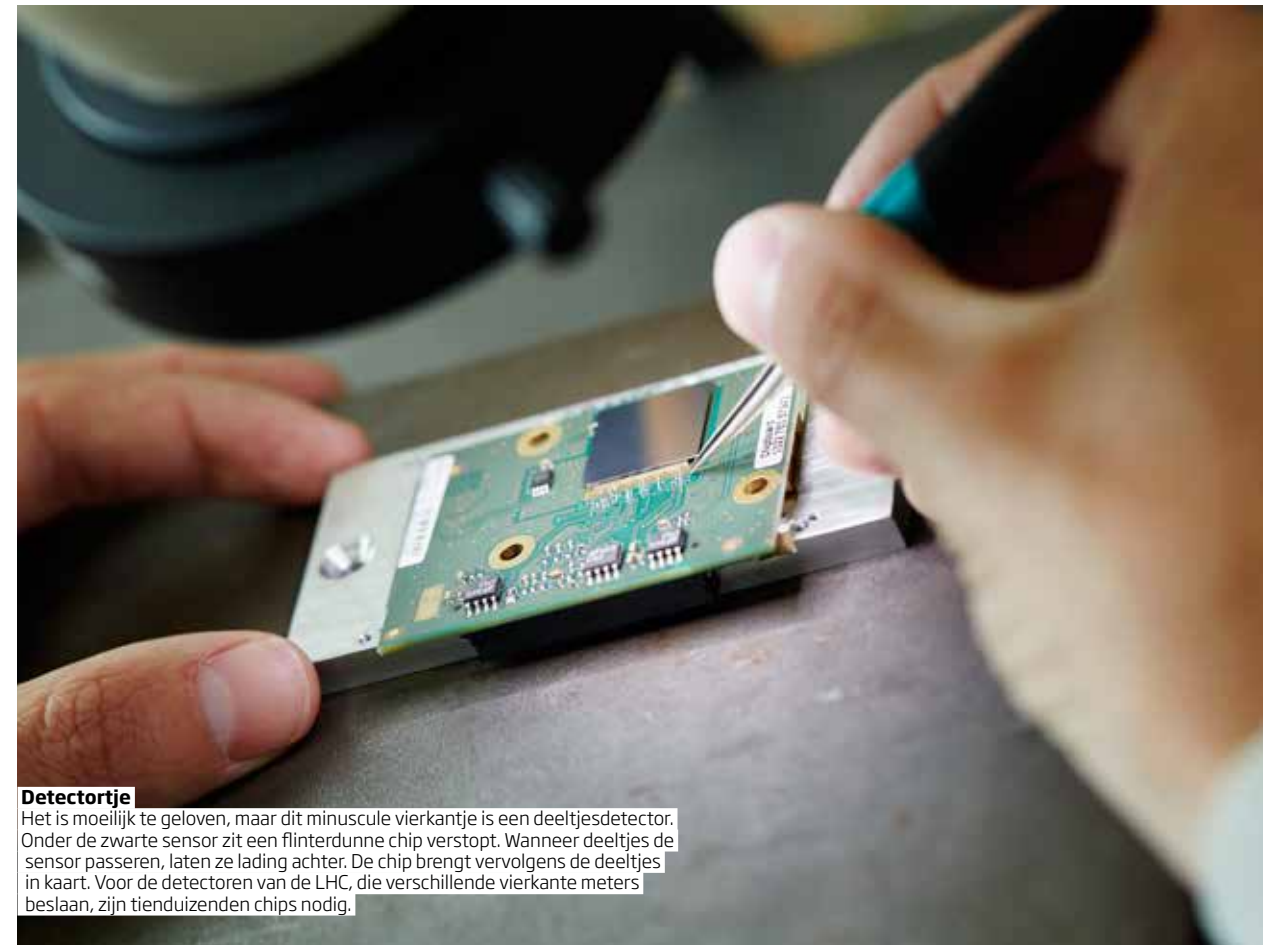
**Higgsfinder**  
De semiconductor tracker, onderdeel van de ATLAS-detector en deels gebouwd bij Nikhef.

NIKHEF/PETER GINTER



#### KM3NeT: bol zkt. deeltje

Deze mysterieuze bol is te vinden op de mechanische afdeling van Nikhef. Binnenkort wordt de bol, samen met negentien soortgenoten, aan een achthonderd meter lange kabel bevestigd. De kabel daalt vervolgens af in de Middellandse Zee. Daar zullen de gevoelige sensoren in de bollen zoeken naar neutrino's uit de ruimte.



#### Detectortje

Het is moeilijk te geloven, maar dit minuscule vierkantje is een deeltjesdetector. Onder de zwarte sensor zit een flinterdunne chip verstopt. Wanneer deeltjes de sensor passeren, laten ze lading achter. De chip brengt vervolgens de deeltjes in kaart. Voor de detectoren van de LHC, die verschillende vierkante meters beslaan, zijn tienduizenden chips nodig.



#### Stralingsbestendig

De afdeling Elektronische Technologie is volop in de weer met deze kleine chip. De chip is slechts enkele vierkante millimeters groot en wordt gebruikt voor datacommunicatie. Het doel van het technische team is om de chip stralingsbestendig te maken, zodat deze elektronische component ook overleeft in de stralingsrijke omgeving van een deeltjesversneller.



#### Druk verkeerspunt

Nikefs datacenter staat bomvol met servers. Hier schuilt een enorme hoeveelheid rekenkracht, het equivalent van duizenden computers. De machines rekenen constant aan talloze deeltjesbotsingen. Daarnaast voeren ze rekenopdrachten uit voor wetenschappers over de hele wereld. Het zogeheten Amsterdam Internet Exchange is dan ook een van de drukste internetknooppunten wereldwijd.



#### Lekker stabiel

Instrumentmaker Arnold Rietmeijer werkt aan een ring die de zogeheten inner tracker van ATLAS zal ondersteunen. ATLAS is een experiment bij deeltjesversneller LHC. Nadat deeltjes in de versneller op elkaar knallen, slingeren brokstukken weg van de botsing. De inner tracker volgt die brokstukken die een lading met zich meedragen.

# 'Bijna mijn hele team komt van Nikhef'

UvA-hoogleraar en voormalig Nikhef-medewerker Sander Klous is partner bij KPMG. Hij heeft veel te danken aan de kennis en ervaringen die hij als deeltjesfysicus bij CERN en Nikhef heeft opgedaan.

## Sander Klous

Sander Klous is partner bij accountantsbedrijf KPMG en hoogleraar Big Data Ecosystems for Business and Society bij de Universiteit van Amsterdam. Voor Nikhef werkte hij aan experimenten van CERN. Hij schreef samen met Nart Wielaard de bestseller *Wij zijn Big Data*, tweede bij de managementboek-van-het-jaar-verkiezing in 2015 en door uitgeverij Springer in het Engels uitgebracht. Magazine *Quote* plaatste Klous in de lijst 'CEO's van 2021'.

Door Dorine Schenk

### Wat deed u bij Nikhef?

'Bij het ATLAS-experiment was ik verantwoordelijk voor het data-acquisitiesysteem. Ik kreeg te maken met grote hoeveelheden data die met hoge snelheid binnenkwamen. Uit deze datastromen moesten we de interessante informatie scheiden van de ruis. Aan klanten vertel ik nog steeds: 'Als je denkt dat jullie *big data* doen, dan heb ik nog een leuk verhaal over echte *big data*'

### Op welke manier draagt die achtergrond bij aan uw huidige werk?

'De mate van professionaliteit die je bij Nikhef meekrijgt, gecombineerd met de ervaring in het doen van onderzoek op het allerhoogste niveau in de wereld, is goud waard. Die standaard is ook bij KPMG en op de UvA mijn richtlijn en die communiceer ik eveneens richting mijn klanten. Bij alles wat ik doe, probeer ik dezelfde topkwaliteit te leveren die ik met de paplepel heb binnengekregen bij CERN en Nikhef.'

### Een onderzoeksinstituut als Nikhef is toch heel anders dan het bedrijfsleven?

'Mensen van Nikhef denken vaak dat de ervaring die ze opdoen weinig te maken heeft met het bedrijfsleven. Maar er werken 3500 mensen bij het ATLAS-experiment; dat is in feite een fabriek. Je leert er onderzoek doen op een bijna industriële manier.



JEROEN OERLEMANS

'Bovendien moet de kwaliteit van hoog niveau zijn en leg je vaak je werk aan anderen uit. Die dingen zijn ook belangrijk in het bedrijfsleven. De experimenten bij CERN zijn zo groot en complex dat ze alleen kunnen werken als de organisatie en mensen blijven nadenken over effectiviteit. Dat heb ik nog nergens zo extreem gezien, ook niet in het bedrijfsleven. Bijna mijn hele team bij KPMG, ongeveer 15 van de 20 man, komt daarom van Nikhef.'

### Wat is uw werk als partner bij KPMG?

'Bij KPMG ben ik verantwoordelijk voor *data & analytics* in Nederland. Wereldwijd ben ik verantwoordelijk voor de geavanceerde analyses die gedaan worden voor bedrijven en voor de platformen die KPMG

daarvoor gebruikt. Het streven is om organisaties nuttige en betrouwbare informatie uit data te laten halen, waardoor ze een competitief voordeel verkrijgen.

'Verder helpen we bedrijven met *decision support* door te kijken hoe het nemen van beslissingen kan worden verbeterd. Vaak kun je hier automatische analyses voor gebruiken. Dat levert meestal betere resultaten op dan er een groep mensen op zetten.'

### U bent ook hoogleraar aan de Universiteit van Amsterdam. Wat onderzoekt u?

'Mijn onderzoek gaat onder andere over *tipping points*. Dat zijn evenwichtstoestanden die door een kleine verandering omslaan in een andere evenwichtstoestand. Dat gebeurt bijvoorbeeld wanneer er ineens paniek toeslaat in een menigte. Met behulp van *big data* bestuderen we hoe deze situaties ontstaan en hoe we er het best op kunnen reageren. We hebben een eigen sensorsysteem ontwikkeld, dat veel lijkt op de detectorsystemen die we op CERN gebruiken. Alleen detecteren we nu geen deeltjes, maar mensen. 'Een ander onderzoek van mij gaat over *trusted analytics*. Hier kijken we hoe de maatschappij vertrouwen kan houden in analysesresultaten. Hoe weet je bijvoorbeeld dat je navigatiesysteem je echt het snelst van A naar B brengt en je niet elke keer langs het tankstation stuurt dat de kaart sponsort? Dergelijke vragen kom ik ook in de praktijk tegen bij KPMG.' ■

# Speuren naar het gros van het heelal

Fysici van Nikhef hopen te ontdekken waar zo’n 85 procent van de massa van het universum zich verstopt. Dat doen ze met het Xenon1T-experiment: het meest nauwkeurige donkere-materieproject ter wereld.

Tekst: George van Hal

W e bevinden ons midden in de Italiaanse Apennijnen. Achter enorme stalen deuren, in het binnenste van een berg, ligt het Gran Sasso National Laboratory. Daar huizen natuurkunde-experimenten in honderd meter hoge hallen, waar ze dankzij de 1400 meter dikke laag van massief gesteente boven de plafonds worden beschermd tegen allerlei soorten hinderlijke straling uit de kosmos. In de middelste hal, hal B, staat de grootste donkere-materiejager ter wereld: het Xenon1T-experiment.

‘We willen in de herfst van 2016 de eerste wetenschappelijke gegevens verzamelen,’ zegt fysicus Patrick Decowski, bij Nikhef verantwoordelijk voor de Xenon1T-detector. In die gegevens hopen fysici te ontdekken waaruit donkere materie bestaat: een mysterieus goedje dat zijn aanwezigheid alleen indirect verradt, doordat het zwaartekracht uitoefent op andere materie.

De theorie van donkere materie degradeerde het



Een kijkje in het hart van de gevoeligste donkere-materiedetector ter wereld. THE XENON COLLABORATION

universum dat wij kennen tot een bijrolspeler op het kosmische toneel. Want wie netjes de massa van alle sterren, planeten, nevels, zwarte gaten, manen en alles dat op aarde loopt en leeft bij elkaar optelt, heeft onder de streep slechts 15 procent van het totaal te pakken. Het overgrote merendeel van het heelal is dus zoek.

## Spookachtig

Theoretisch-fysici hebben in de loop der jaren meerdere ideeën voorgesteld die verklaren waar de overige 85 procent gebleven is. De populairste daarvan is het bestaan van spookachtige deeltjes die zij WIMPs hebben gedoopt. Het zijn deze *weakly interacting massive particles*, oftewel deeltjes die wel wat wegen,

‘Na twintig dagen meten hebben we onze beste concurrent al verslagen’

maar verder niet of nauwelijks reageren op andere deeltjes, waar het Xenon1T-experiment naar zoekt.

Voor die zoektocht gebruiken natuurkundigen een tank gevuld met vloeibaar xenon. Dit zeldzame edelgas fungeert als donkere-materiedetector omdat licht vrijkomt wanneer een xenonatom geraakt wordt door een WIMP. Die lichtflitsjes kunnen de natuurkundigen in het experiment meten.

Om een dergelijk signaal te vinden, moeten fysici de xenontank beschermen tegen andere deeltjes die lichtflitsen kunnen veroorzaken. De eerste defensielinie is het gesteente. De xenontank hangt bovendien in een grotere tank gevuld met zuiver water. Dat water beschermt tegen de invloed van neutronen: deeltjes die eenzelfde soort reactie in xenon kunnen veroorzaken als WIMPs.

## Filteren

Ondanks al die beschermingsmaatregelen, komen er toch regelmatig andere deeltjes in de meetapparaten. Maar door handig te meten en irrelevante gegevens weg te filteren – een lastige tak van sport waar de Nikhef-medewerkers

hun kunsten bij dit experiment op loslaten – kunnen onderzoekers alsnog bepalen wanneer ze wel en wanneer ze niet te maken hebben met donkere materie.

Xenon1T is straks het meest nauwkeurige experiment dat speurt naar donkere materie. ‘Zodra we twintig dagen hebben gemeten, hebben we onze beste concurrent al verslagen. We hebben dan meer gegevens dan zij in vierhonderd dagen hebben verzameld,’ zegt Decowski. ‘Zo nauwkeurig is dit experiment.’

## Duimnagel

Die nauwkeurigheid is nodig omdat niemand weet hoe gemakkelijk WIMPs op andere deeltjes botsen. Steeds gevoeliger experimenten kunnen deeltjes vinden die steeds minder kans hebben om te botsen. Dat maakt het tegelijk steeds waarschijnlijker dat een experiment de deeltjes betrapt. Het aantal WIMPs dat volgens voorspellingen door een detector zoals Xenon1T vliegt, is namelijk enorm. Decowski: ‘We verwachten dat er per seconde ongeveer honderdduizend door een oppervlak ter grootte van een duimnagel bewegen.’

Dankzij Xenon1T weten fysici straks sowieso beter hoe moeilijk de deeltjes botsen. ‘Zelfs als we met Xenon1T geen donkere materie vinden, is dat alsnog een resultaat waar de natuurkunde wat aan heeft,’ zegt Decowski. ‘Maar we hebben natuurlijk liever echt beet.’ ■

## Een minuutje met...

José van Dijck is naast voorzitter van de KNAW ook stuurgroep lid van de Nationale Wetenschapsagenda. In die rol werkt zij samen met Nikhef, dat de ‘fundamentele routes’ uit die agenda trekt.

# ‘Wetenschappers en instituten kunnen van Nikhef leren’

## Hoe staat het er inmiddels voor met de Nationale Wetenschapsagenda?

‘We bestaan nu anderhalf jaar. We hebben onze investeringsagenda bij de verantwoordelijke bewindslieden ingediend. Maar het belangrijkste werk lag daarvoor, toen wetenschappers op zoek gingen naar de overkoepelende routes: de thematische bundelingen van alle publieksvragen die zijn binnengekomen. Heel veel verschillende disciplines kwamen bij elkaar en dat leverde mooie routes op, van toegepast tot fundamenteel. En nu gaan we die routes verder uitbouwen.’

## Wat is daarbij de rol van een onderzoeksinstituut zoals Nikhef?

‘Nikhef trekt de fundamentele routes, het nieuwsgierigheidsgedreven onderzoek. De zoektocht naar ‘de bouwstenen van het leven’ bijvoorbeeld, of ‘de fundamentelementen van ruimte en tijd’. Nikhef fungeert daarbij als een magneet die anderen meetrekt.’

## Hoe gaat dat meetrekken in de praktijk?

‘Dat gebeurt in workshops. Zo’n workshop vindt plaats op instituten of ministeries. Er komen tussen de vijftig en honderd vijftig mensen op af. De deelnemers komen uit de wetenschap en soms ook uit het bedrijfsleven. Ze proberen in hun eigen route de zoektocht naar antwoorden vooruit te helpen. ‘De workshop op Nikhef, over de fundamentele vragen in de natuurkunde, was een mooi succes.’



MILETTE RAATS / KNAW

## Moet zo’n aantrekker een instituut zijn, of had u daar net zo goed een individuele wetenschapper voor kunnen aanstellen?

‘Tegenwoordig is het niet langer mogelijk dat individuele wetenschappers zoiets doen. Een instituut zoals Nikhef staat midden in het onderzoek en kan daar dus ook het beste vorm aan geven. Het resultaat van deze methode is dat er meer samenwerking plaatsvindt tussen onderzoekers en de nationale instituten.’

## De Nationale Wetenschapsagenda is, zoals de naam al zegt, een nationale aangelegenheid. Toch is het onderzoek, zeker dat op Nikhef, vooral een internationale samenwerking. Zit daar geen vreemd spanningsveld tussen?

‘Nee. Het geldt voor alle routes dat het onderzoek zich allang niet meer afspeelt binnen de landsgrenzen. Een instituut zoals Nikhef is enorm goed georganiseerd, heeft veel contacten en samenwerkingsverbanden buiten de landsgrenzen en neemt deel aan allerlei prestigieuze internationale fysicaprojecten. ‘Veel wetenschappers en instituten kunnen wat dat betreft ook leren van Nikhef. Daar is men heel ver in het samenwerken in dat soort grote teams. Toch zie je dat het op alle instituten en in alle vakgebieden al vaker gebeurt. Iedereen gaat steeds internationaler en in steeds grotere teams samenwerken. Dat is de toekomst van de wetenschap.’

## Spookdeeltjes

Neutrino's zijn de meest spookachtige deeltjes die we kennen. Elke seconde razen er biljoenen dwars door jou en de rest van de aarde heen, zonder dat je daar ooit iets van merkt. Maar heel af en toe botst zo'n spookdeeltje wel op een materiedeeltje. Dat kun je meten, mits je een groot gebied zonder achtergrondstraling met heel gevoelige detectoren voortdurend in de gaten houdt. Daarom plaatsen wetenschappers nu een immense neutrino-telescoop (NeT) op de bodem van de Middellandse Zee. Als deze detector af is, bestaat die uit ruim tienduizend glazen bollen, verdeeld over locaties in Frankrijk, Italië en Griekenland. Samen nemen die meer dan een kubieke kilometer ( $\text{km}^3$ ) aan zeevolume in beslag. KM3NeT is de opvolger van ANTARES, een onderwater-detector die momenteel bij de Franse kust naar neutrino's speurt. Door een hoop interacties van neutrino's met watermoleculen te detecteren, hopen onderzoekers meer te leren over de eigenschappen van verschillende soorten neutrino's. Ook willen ze op die manier verafgelegen bronnen van neutrino's bestuderen, zoals neutronensterren en zwarte gaten.

Door Yannick Fritschy

### Lange lijnen

KM3NeT zal uiteindelijk uit 700 lijnen bestaan. Eén lijn is ongeveer een kilometer lang en bevat 18 bollen. De bollen blijven op hun plek dankzij een touwladderconstructie gemaakt van de supersterke kunststof Dyneema. Een elektro-optische kabel stuurt de signalen van de bollen langs de touwladder naar boven. Aan de bovenkant zit een met olie gevulde plastic cilinder, die via optische vezels verbonden is met het onderwaternetwerk dat de signalen naar de controlekamer begeleidt.

### Glazen bol

De bouwstenen van KM3NeT zijn glazen bollen van een halve meter in doorsnee. Deze Digital Optical Modules (DOMs), grotendeels door Nikhef ontwikkeld, zijn stevig genoeg om 350 keer de atmosferische druk te weerstaan. De DOMs staan onder 1000 Volt om stroom te geven aan 31 fotobuizen binnenin. Deze buizen meten lichtflitsjes die de aanwezigheid van neutrino's verraden. Als een neutrino namelijk op een watermolecuul botst, ontstaan muonen die in zeewater zwak licht opwekken. De DOMs meten de helderheid, aankomsttijd en invalshoek van deze 'Tsjerenkovstraling'.

### Tot op de bodem

Op de zeebodem heb je het minste last van andere vormen van straling. Daarom komen de bollen tussen 2500 en 3500 meter diep te hangen. In 2015 werd het eerste detectordeel bij de kust van Sicilië geïnstalleerd. Met een anker werden twee door Nikhef ontworpen lijnen met bollen aan de zeebodem bevestigd. Een onbemande duikboot verbond de lijnen met een netwerk van glasvezelkabels, die de metingen naar de controlekamer zullen brengen. Onmiddellijk na de installatie hebben onderzoekers de timing van de detector geijkt via bekende vormen van straling.

# Rimpels in de ruimtetijd openen jacht op Einstein

De vondst van zwaartekrachtsgolven bewees dat je met meetapparaten zoals Virgo de geheimen van het universum kunt ontrafelen. Bij Nikhef kijkt men al naar de volgende stap: een prestigieuze detector die mogelijk onder Limburgse grond gestalte krijgt.

Door George van Hal

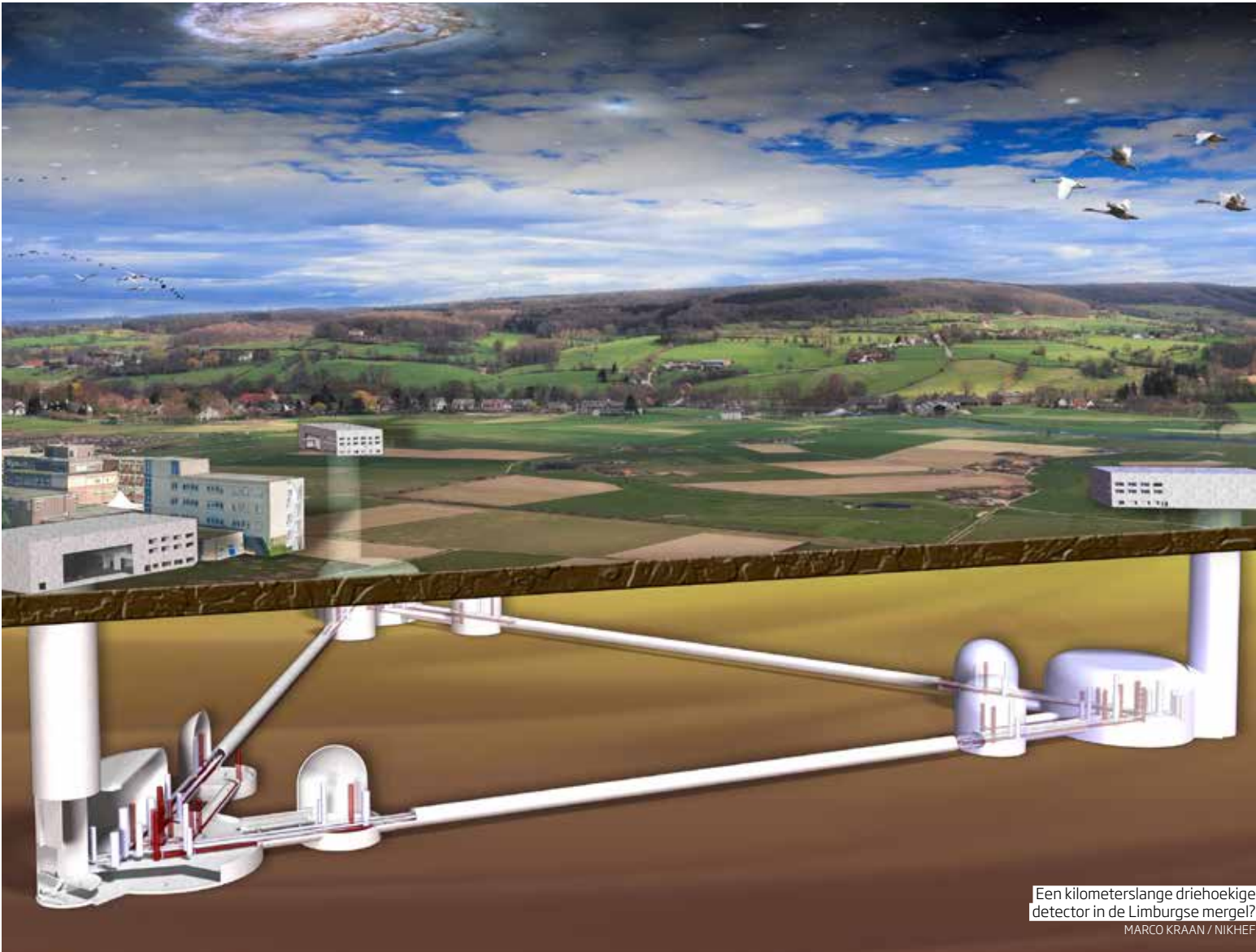
Een betekenisloze uithoek van het universum, anderhalf miljard jaar geleden. Hier staan twee zware zwarte gaten op het punt om hun fatale dans te besluiten met een klapper van waarlijk kosmische proporties. Een klap die zo sterk is dat de vierdimensionale werkelijkheid zelf begint te trillen. De rimpeling die dat oplevert, trekt miljoenen eeuwen lang ongemerkt door het heelal. Totdat die eind 2015 een fractie van een seconde lang een splinternieuw meetinstrument in Amerika in beweging zet en daarmee de botsing van zware gaten verradert.

Nog maar honderd jaar lang, slechts een fractie van de reistijd van de golf, waren mensen op de hoogte dat dit soort geweldadige gebeurtenissen de ruimte in beroering kunnen brengen. Dat kwam aan het licht in 1915, toen fysicus Albert Einstein, voortbordurend op werk van de Joods-Duitse wiskundige Hermann Minkowski, de werkelijkheid herschikte. Einstein bevestigde dat wij in een

vierdimensionale wereld leven, waarin de tijd een plekje heeft naast de drie ruimtelijke dimensies. Het ‘grafiekpapier’ waarin die vier richtingen liggen opgesloten, heet sindsdien de ruimtetijd.

Die ruimtetijd is een kneedbaar geheel, waarbij voorwerpen het grafiekpapier kunnen buigen. Hoe meer massa een voorwerp heeft, hoe groter het effect. Vergelijk het met wanneer je een zware bowlingbal op een waterbed legt. Dan ontstaat onder en om die bal een kuil. Leg vervolgens een knikker in die kuil, geef deze een zetje en hij gaat rondjes om de bal draaien. Door de zwaartekracht op die manier te beschrijven, verklaarde Einstein waarom bijvoorbeeld de maan om de aarde draait.

Einsteins wiskundig gegoochel met de vergelijkingen van zijn theorie leverde daarnaast nog een ander eigenaardig inzicht op. Wanneer je rustig op het waterbed duwt, zoals de bowlingbal in het voorbeeld, ontstaat een deuk. Geef er echter een klap op, bijvoorbeeld doordat je diezelfde bowlingbal van een afstandje op het waterbed laat vallen, en het bed gaat ineens rimpelen. Net zoiets bleek te gelden voor de ruimtetijd. Einstein beschreef die bevinding in een



Nikhef-onderzoeker Jo van den Brand ziet de detector al helemaal voor zich. DANNY SCHWARZ



vakpublicatie en sindsdien zijn zwaartekrachtsgolven onlosmakelijk onderdeel van de natuurkundige realiteit.

## Volgende stap

Zelf meende Einstein overigens dat die golven te zwak zijn om ooit te meten. Dat vermoeden werd op 14 september 2015 echter resoluut naar de prullenbak verwezen. Die dag maten fysici met het LIGO-experiment in de Verenigde Staten voor het eerst zwaartekrachtsgolven. Daarmee bewezen ze tegelijk Einsteins gelijk en ongelijk. De door Einstein voorspelde rimpelingen in de ruimtetijd bestonden echt en waren inderdaad heel zwak, exact zoals hij dacht. Maar met slimme experimenten konden fysici wel de gelijk die minuscule rimpelingen meten.

Toen de onderzoekers op 11 februari 2016 hun resultaat naar buiten brachten,

was dat een euforisch hoogtepunt van de moderne fysica. Zwaartekrachtsgolven haalden internationaal alle tv-journaals en voorpagina's. In Nederland was het feest op Nikhef, dat een dikke vinger in de pap van het internationale zwaartekrachtgolf-onderzoek heeft. Het is een van de partners van het Virgo-experiment in Italië, het zusterexperiment van LIGO dat tijdens deze meting aan een upgrade bezig was.

Onderzoekers van het instituut, waaronder groepsleider Jo van den Brand, schoven aan tafel bij kijkcijferkanon *De Wereld Draait Door* en haalden landelijk alle kranten. Mooi voor de zichtbaarheid, maar veel belangrijker was dat de meting bewees dat het wetenschappelijke concept achter dit soort detectoren staat als een huis. ‘De meting bewees dat je zwaartekrachtsgolven inderdaad kunt meten en dat het soort

bronnen dat deze golven veroorzaakt, echt is,’ zegt Van den Brand.

Volgens hem kun je de huidige periode wel vergelijken met de periode na het bouwen van de eerste deeltjesversneller. Ook toen bewees men dat het concept werkte,

De huidige periode is vergelijkbaar met die vlak na de eerste deeltjesversneller

en bouwde men vervolgens stap voor stap steeds grotere en sterkere versnellers, met de Large Hadron Collider in onderzoeksinstituut Cern als voorlopig hoogtepunt. Van den Brand: ‘Wil je de fysica straks beter

doorgronden, dan moet je net als toen de volgende stap durven zetten.’

## Dark ages

Die volgende stap luistert naar de naam Einstein Telescope. Die zou weleens in Limburg kunnen verrijzen. Het apparaat wordt net als de huidige zwaartekrachtsgolfdetectoren een zogeheten interferometer – in dit geval een driehoekige – waarin laserbundels heen-en-weer kaatsen tussen spiegels. Dat gebeurt op zo'n manier dat de verschillende bundels elkaar continu uitdoven. Althans: totdat een passerende zwaartekrachtsgolf de spiegels een minuscule fractie ten opzichte van elkaar laat afwijken, zodat de uitdoving spaak loopt en de interferometer een signaal registreert.

Einstein Telescope moet de opvolger worden van LIGO en Virgo. ‘Natuurlijk

# zwaartekrachtsgolven

gaan we bij die twee detectoren alles eruit halen dat erin zit,' zegt Van den Brand. Toch denkt hij alvast een stap verder. 'Op een gegeven moment heb je gewoon een grotere detector nodig,' zegt hij.

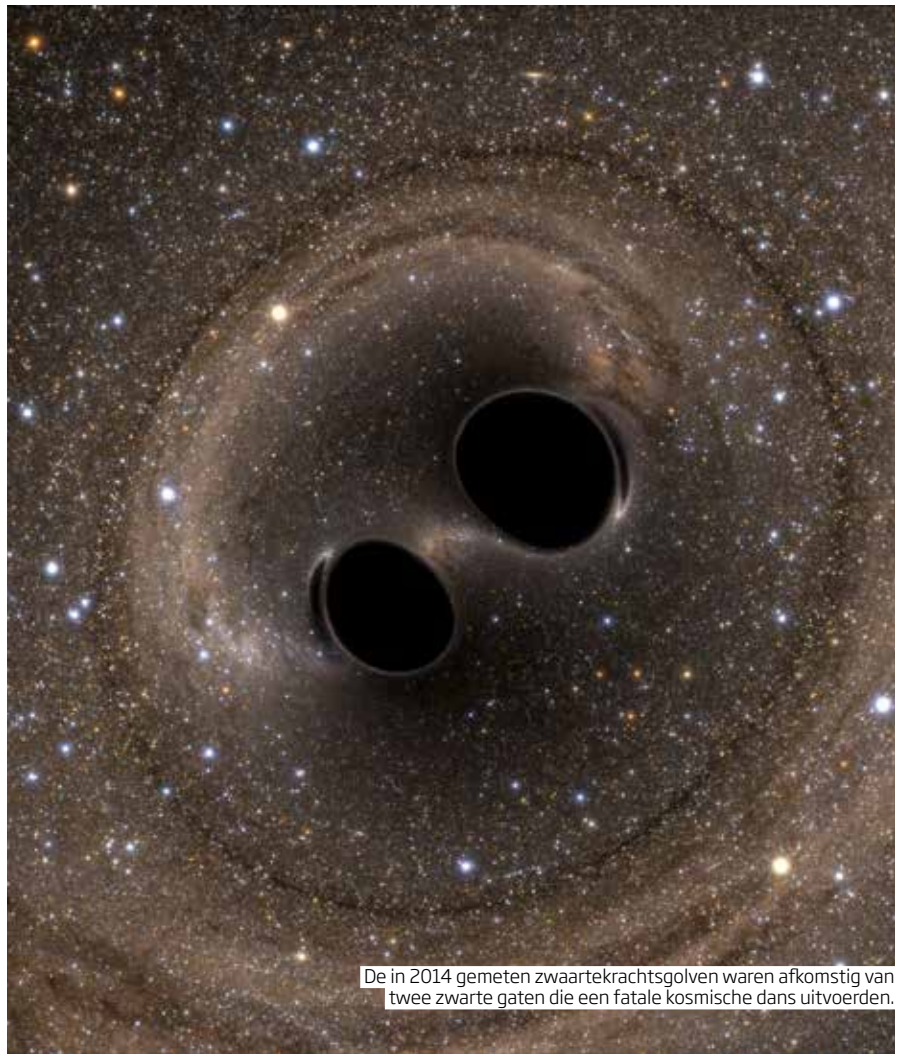
De armen waarin de laserbundels heen-en-weer kaatsen worden bij de Einstein-detector daarom langer dan bij LIGO en Virgo: tien kilometer in plaats van respectievelijk vier en drie kilometer. Die langere armen zorgen ervoor dat Einstein Telescope straks kleinere verstoringen kan meten. Bovendien zorgt de ondergrondse ligging ervoor dat de telescoop ruis beter onderdrukt. 'Daardoor wordt Einstein Telescope in totaal een factor tien gevoeliger dan LIGO en Virgo op hun best,' zegt Van den Brand.

Daardoor kunnen astronomen straks honderdduizenden signalen per jaar meten. Op die manier kunnen ze het heelal bekijken tot aan de dark ages: de periode waarin de eerste sterren werden gevormd. Dit opent de deur naar nieuwe en vooral ook veel nauwkeurigere metingen van de evolutie van de kosmos.

De reden dat Limburg voor die detector als serieuze optie op tafel ligt, is de unieke geologie van het gebied. 'Een detector moet zo min mogelijk last hebben van ruis,' zegt Van den Brand, die verantwoordelijk is voor het selecteren van potentiële locaties voor Einstein Telescope. 'Over de hele wereld hebben we gezocht naar plekken waar die ruis zo klein mogelijk is.' Daarbij heeft men bijvoorbeeld ook metingen verricht in oude zoutmijnen, die in verschillende landen te vinden zijn. 'Maar die waren ongeschikt omdat het zout in die mijnen beweegt. Limburg blijkt wel perfect.'

## Nieuw venster

Het belangrijkste wetenschappelijke wapenfeit van Einstein Telescope is dat deze de ultieme test van Einsteins relativiteitstheorie mogelijk maakt. Op basis van die theorie stippelden fysici bijvoorbeeld de voorspelde passen van de fatale dans van de zwarte gaten nauwkeurig uit, een patroon dat de zwarte gaten in werkelijkheid heel precies bleken te volgen. Door de theorie met de gemeten praktijk te vergelijken, konden Nikhef-onderzoekers voor het eerst een grens bepalen van mogelijke fouten in de relativiteitstheorie. De conclusie? De theorie kan er niet meer dan 10 procent naast zitten.



De in 2014 gemeten zwaartekrachtsgolven waren afkomstig van twee zwarte gaten die een fatale kosmische dans uitvoerden.

## 'De Einstein Telescope wordt een factor tien gevoeliger dan LIGO en Virgo op hun best'

Voorlopig zijn de instrumenten van LIGO en Virgo echter nog lang niet uitgespeeld. In de nacht van 25 op 26 december 2015 mat LIGO bijvoorbeeld een tweede set zwaartekrachtsgolven, ditmaal van iets minder zware samensmeltende zwarte gaten. Dat is een teken dat dergelijke signalen een stuk minder zeldzaam zijn dan vooraf gedacht. Ook is het een bevestiging van waar vooral astrofysici stevig op hopen: dat detectoren zoals LIGO en Virgo dienst kunnen doen als telescopen van de toekomst. Nu via elektromagnetische straling – bijvoorbeeld zichtbaar licht en radiostraling – het hele zichtbare universum in kaart is

gebracht, openen zwaartekrachtsgolven een spannend nieuw venster op de kosmos. Een revolutie die je kunt vergelijken met wanneer een dove, die tot voor kort de wereld alleen kon zien, diezelfde wereld plotseling ook kan horen.

De komende jaren moeten uitwijzen of die verwachting uitkomt. Met de mogelijke komst van Einstein Telescope naar Nederland is het voorlopig dus extreem spannend bij de zwaartekrachtsgolfgroep van Nikhef. 'We zouden de faciliteit van Einstein Telescope bouwen voor de komende vijftig tot honderd jaar,' zegt Van den Brand. 'Zodra we technisch verder zijn, kun je in diezelfde ruimte nieuwe apparatuur zetten.'

Als de Einstein-detector inderdaad naar Limburg komt, hengt ons land daarmee een project binnen waar het nog jaren mee voort kan. Als Van den Brand en zijn collega's gelijk krijgen, wordt Einsteins herschikking van de werkelijkheid straks dus diep in Nederlandse grond vervolmaakt. ■

# 'Nikhef brengt contact, kennis en credibiliteit'

Van promovendus bij Nikhef tot directeur van een sensorbedrijf. Als geen ander slaat Mark Beker de brug tussen onderzoek en commercie.

Door Dorine Schenk

## Waarover ging uw promotie bij Nikhef?

'Seismische trillingen rond gravitatiegolvendetectoren. Die detectoren zijn ontzettend gevoelig. Ze worden makkelijk verstoord door seismische activiteit. Om het trillen van de detectoronderdelen tegen te gaan, zijn geavanceerde trillingsonderdrukkingssystemen gebouwd.

'Seismische activiteit beïnvloedt de metingen echter ook op een andere manier. Na een trilling van de aarde is er lokaal even wat meer massa en daarna wat minder. Daardoor verandert de aantrekkingskracht van de aarde in dat gebied. Dat is een superklein effect, maar het is genoeg om de detector te verstoren. De enige manier om dat te voorkomen, is door een netwerk van seismische sensoren om de detector heen te bouwen en in de data te corrigeren voor de seismische effecten die de sensoren meten.'

## Hoe ontdekte u dat er andere toepassingen zijn voor de seismische sensoren?

'Nikhef heeft contact met het bedrijfsleven, met name met de industrie. Tijdens mijn promotie is er contact gelegd met een van die bedrijven: Shell. Het bleek dat de sensoren waar ik aan werkte, problemen konden oplossen met het testen van geofysische modellen. Zo is de bal gaan rollen. Dat contact leidde 3,5 jaar geleden tot het spin-offbedrijf Innoseis.'



## Wat is de rol van Nikhef bij Innoseis?

'Nikhef is erg belangrijk geweest in het opzetten van relaties met de industrie. Samenwerking tussen instituut, industrie en start-up heeft veel synergie. Nikhef brengt contact, kennis en credibiliteit. Shell brengt industriële kennis en geld. En de start-up zorgt voor innovatie.

'Verder staat Nikhef heel positief tegenover start-ups en het ondernemerschap. Start-ups worden op verschillende manieren ondersteund en valorisatie is een speerpunt van de wetenschapsfinancier NWO/FOM. Bovendien is het enorm waardevol om op het Science Park te zitten. Wij krijgen goede faciliteiten voor een goede prijs en zitten hier midden in de kennis en technologische ontwikkelingen.'

## Mark Beker

Mark Beker is directeur van Innoseis, een bedrijf gespecialiseerd in de ontwikkeling van seismische sensoren. Hij richtte Innoseis in 2013 op, samen met Nikhef-onderzoeker Jo van den Brand. Kort daarvoor was Beker bij Nikhef gepromoveerd op gravitatiegolvendetectoren. Voor zijn promotieonderzoek ontving hij de 2014 FOM valorisation chapter prize.

## Wat doet u bij Innoseis?

'Wij maken seismische sensoren die veel kleiner, lichter en goedkoper zijn dan onze competitie. Daarmee zijn ze ook veel eenvoudiger in het gebruik. Sinds de oprichting is er een continue samenwerking met Shell. Zij hebben honderd van onze sensoren gekocht en gebruiken die nu voor het testen van geofysische modellen. Met de sensoren krijgen ze een veel beter beeld van wat zich in de bodem afspeelt.

'Verder werken we samen met een Oost-Europees olie- en gasbedrijf dat nu een netwerk van onze sensoren leent voor tests. Waar we naartoe willen, zijn grote netwerken van wel 100.000 sensoren. Dan kunnen ze echt onder de grond 'kijken.'

## Zijn er naast de olie- en gasindustrie ook andere toepassingen voor de sensoren?

'Een voor de hand liggende toepassing waar we mee bezig zijn, is aardbevingsdetectie. Maar we zijn ook in gesprek met defensie en politie. Zij willen de sensoren gebruiken om in bepaalde gebieden te kijken waar iemand loopt of gelopen heeft, aan de hand van seismische trillingen. Bovendien kan de locatie van een explosie ermee worden bepaald.

'Tenslotte wordt binnen Nikhef nog steeds onderzoek gedaan voor gravitatiegolvendetectoren met onze sensoren. Daar leren wij zelf ook weer van. Er is dus een sterke terugkoppeling naar het vakgebied waar ik begon.' ■

# Steeds meer rekenkracht

De computerafdeling van Nikhef heeft in de eerste plaats de taak om onderzoek mogelijk te maken. Vaak leidt die faciliterende rol echter tot baanbrekende nieuwe computertechnologie. Zo had Nikhef een van de eerste websites ter wereld en gaf het Nederland de beste elektronische infrastructuur van Europa. Wat wordt het volgende IT-hoogstandje?

Door Yannick Fritschy

## World Wide Web

Computertechnologie stelt wetenschappers in staat nieuwe dingen te ontdekken, dat is alom bekend. Maar ook de omgekeerde weg wordt bewandeld: fundamenteel onderzoek leidt vaak tot de ontwikkeling van nieuwe computertechnologie. De eerste elektronische computer kwam in 1939 bijvoorbeeld voort uit fundamenteel fysisch onderzoek. Natuurkundigen hadden een theorie bedacht die de structuur van kristallen verklaart, maar konden hun theorie niet testen zonder een geavanceerdere rekenmachine dan de mechanische exemplaren die ze toen gebruikten.

Een vergelijkbaar probleem deed zich voor eind jaren 80, toen de hoeveelheid data die CERN-onderzoek opleverde behoorlijk uit de klauwen begon te lopen. Om al deze gegevens te kunnen delen met andere deeltjesinstituten zoals Nikhef, bedachten IT-medewerkers Tim Berners-Lee en Robert Cailliau iets nieuws: een platform

‘Rond 2025 hebben we een factor tien tot honderd te weinig rekenkracht’

waar iedereen ter wereld zich via het internet op kan aansluiten. Ze dienden het voorstel in bij hun chef bij CERN. ‘Vaag, maar interessant’, was zijn commentaar. Twee jaar later was het World Wide Web geboren.

In 1992 sloot Nikhef zich als een van de eersten aan op het web, samen met het Amerikaanse instituut SLAC. Daarmee is [www.nikhef.nl](http://www.nikhef.nl) de oudste website van Nederland en nummer drie van de wereld. Inmiddels zijn er miljarden websites in de lucht; allemaal dankzij de IT-afdelingen van CERN, Nikhef en andere deeltjesinstituten.



Het Nikhef-datacenter staat wereldwijd bekend als internetverkeersknooppunt. NIKHEF / KEES HUYSER

## Big Grid

Het World Wide Web wordt tegenwoordig natuurlijk nog volop gebruikt, maar voor deeltjesfysici was het begin deze eeuw al niet meer toereikend. Op dat moment wisten ze dat de experimenten met de LHC in Genève, die in 2008 van start moesten gaan, jaarlijks enkele petabytes aan data zouden opleveren. Ter vergelijking: één petabyte staat ongeveer gelijk aan 2000 jaar muziek in mp3-fragmenten. Er moest een geavanceerd systeem worden opgezet om al deze gegevens te kunnen opslaan, delen, verwerken en analyseren.

De oplossing was de oprichting van het Grid. Dit is een verzameling van zo’n 500.000 processoreenheden verspreid over computers wereldwijd. Zo’n 10.000 van deze eenheden bevinden zich in Amsterdam. De computers zijn via razendsnelle netwerken met elkaar verbonden en allemaal uitgerust met dezelfde software, zodat ze samen als een supersnel cloudopslag-systeem functioneren.

De ontwikkeling van het Grid leidde in Nederland tot het BiG Grid-programma: een



Heeft Nikhef ook in 2025 nog voldoende rekenkracht om de LHC-gegevens te verwerken? NIKHEF / KEES HUYSER

project waar Nikhef een belangrijke rol in speelde. Daarbij ging de elektronische infrastructuur in ons land flink op de schop; in het begin door gebruik te maken van Grid-technologie. Dankzij de nieuwe e-infrastructuur kunnen onderzoekers gegevens verwerken via Grid-software, wat veel sneller gaat dan met andere software.

Grid en BiG Grid hebben de verwerking van LHC-data bij Nikhef enorm versoepeld. Maar ook andere vakgebieden profiteren ervan. Nederlandse astronomen, neurologen, chemici en biologen maken gretig gebruik van de razendsnelle infrastructuur om complexe berekeningen en simulaties uit te voeren.

‘We hebben de kern van de Nederlandse elektronische infrastructuur gebouwd’, zegt Jeff Templon, leider van het Nikhef-programma Advanced Computing for Research. ‘Nederland heeft daardoor inmiddels een van de beste e-infrastructuren in Europa. De meeste landen lopen helaas flink op ons achter, met name wat betreft een gecoördineerde, landelijke aanpak.’

## Toekomst

De experimenten van Nikhef zullen de komende jaren de grenzen van de computercapaciteit blijven opzoeken. De LHC zal na 2020 nog meer data opleveren, zodat de netwerken nog beter moeten worden. ‘Schattingen geven aan dat we rond 2025 een factor tien tot honderd te weinig rekenkracht hebben. Slimme algoritmen en strategieën zijn nodig om dat probleem op te lossen’, zegt Templon. ‘We zijn bezig met de volgende slag: aan de infrastructuur en het verbeteren van applicaties. Ook kijken we of we een ander model kunnen inzetten voor de gegevensanalyse.’

Daarnaast werkt Nikhef ook nu nog aan praktische toepassingen van computertechnologie. De laatste jaren heeft de computing-groep belangrijke bijdragen geleverd aan de realisatie van *single sign on* voor onderzoek. Dat is het bundelen van internetactiviteiten onder één inlogcode. ‘Denk bijvoorbeeld aan wat je allemaal kunt met je Google- of Facebook-ID’, zegt Templon. ‘Dat willen wij bereiken met je ID uit je onderzoeksinstelling.’

In Nederland kun je al enkele jaren op die manier inloggen met het systeem SURFconext, ontwikkeld door SURFnet. Het systeem gebruikt dezelfde ‘taal’ als vergelijkbare systemen in het buitenland, zodat onderzoekers over de hele wereld kunnen samenwerken.

Een deel van de infrastructuur van SURFnet draait in het Nikhef-datacenter, dat wereldwijd bekend staat als internetverkeersknooppunt. Nikhef zorgde ervoor dat je met je SURFconext-inlogcode het Grid op kunt. Zo kun je – als je voldoende vertrouwd wordt binnen het systeem – zonder problemen petabytes aan data verwerken.

Het aantal SURFconext-gebruikers groeit snel: van bijna een half miljoen in 2013 tot meer dan een miljoen in 2016. Een online dienst om data-uitwisseling tussen onderzoekers te verbeteren: de vergelijking met het [www](http://www) is snel gemaakt. Wie weet is SURFconext over enkele jaren ook niet meer weg te denken uit de maatschappij. Maar dan is de computing-afdeling van Nikhef waarschijnlijk zelf alweer tien jaar verder vooruit aan het kijken. ■

## Column

Christa Hooijer is interim-directeur van de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM), die 1 januari 2017 opgaat in NWO.

## ‘Ik moet deeltjes zoeken!’

Tegen Stan Bentvelsen grap ik weleens dat deeltjesfysica een soort biologie is. Iets waar Nikhef ook zelf op inspeelt door tijdens de open dag een deeltjesdierentuin-speurtocht te organiseren. ‘Nee,’ riep mijn zoon (9) tegen de enthousiaste Nikhef medewerker, ‘ik heb geen tijd voor die uitleg, ik moet deeltjes zoeken!’

Het deeltjes zoeken begeistert iedere medewerker op dit instituut en in het mooie vakgebied van de subatomaire fysica. Wat je treft, bij Nikhef, bij CERN en bij de diverse astrodeeltjesfysica-experimenten midden in bergen, diep in de zee, op de pampa’s van Argentinië en, wie weet, straks ook in de mijnen van Limburg, is grenzeloze nieuwsgierigheid, ambitie en vernuft. Grenzeloos geduld ook: volhouden op jacht naar een deeltje of golf, al duurt het honderd jaar. En letterlijk grenzeloosheid: ongeacht de politiek werken in deze teams Russen met Amerikanen, Palestijnen met Israëli en Chinezen met Taiwanese. En ja, als er dan een ontdekking wordt aangekondigd,



ROGIER CHANG

kun je niet anders dan heel diep onder de indruk zijn van wat mensen in samenwerking kunnen bereiken.

FOM is trots op de onderzoekers en technici van Nikhef die gezamenlijk polderend de Nederlandse inbreng in de internationale experimenten bij CERN en daarbuiten verwezenlijken. En ik zeg u: Nederland mag heel trots zijn op Nikhef, want deze nationale krachtenbundeling is uniek in de wereld en zorgt ervoor dat Nederland een veelgevraagde en onmisbare bijdrage levert aan de fundamentele kennis over het diepste wezen van de natuur.

Christa Hooijer  
Interim-directeur FOM

# Ideeënmachine zoekt naar nieuwe natuurkunde

Nu het higgsdeeltje gevonden is, is de vraag of er nog meer is relevanter dan ooit. Bij Nikhef speurt de theoriegroep naar natuurkunde voorbij het standaardmodel. Hoe zelfs kleine correcties de frontlinie van de fysica fundamenteel kunnen verschuiven.

Door George van Hal

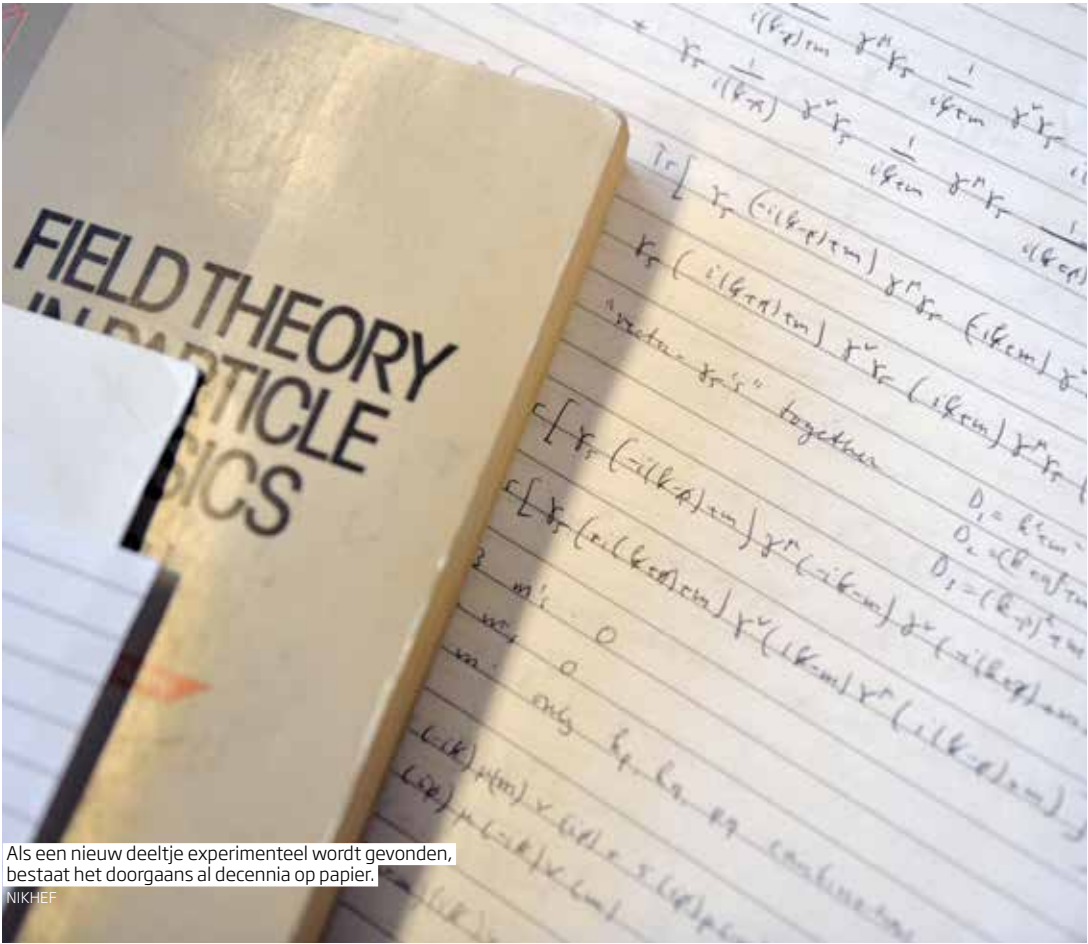
De theoriegroep heeft één overkoepelend thema’, zegt groepsleider Eric Laenen. ‘We zoeken naar manieren om het standaardmodel te falsificeren.’ Dat standaardmodel is de ultieme samenvatting van onze huidige natuurkundige kennis over elementaire deeltjes. Het vangt al die deeltjes en hun onderlinge interacties in één enkel wiskundig raamwerk. Toch zijn fysici ervan overtuigd dat er meer moet zijn dan het standaardmodel. Zo bevat het model naast deeltjes waaruit de materie is opgebouwd – quarks en elektronen, bijvoorbeeld – ook zogeheten ‘krachtdragende’ deeltjes: deeltjes die als boodschappers dienen om krachten over te dragen. Het bekendste voorbeeld van zo’n deeltje is het foton, als drager van de elektromagnetische kracht. Tot nu toe werkt dat model uitstekend, maar de zwaartekracht, een van de vier fundamentele krachten, past met geen mogelijkheid in het systeem. Alleen dat al is een

stevige aanwijzing dat er meer moet zijn. Op jacht naar wat dat ‘meer’ dan is, richten fysici van de theoriegroep zich in eerste instantie op het zo nauwkeurig mogelijk in kaart brengen van de wetten van het standaardmodel. ‘We willen de hogere-ordecorrecties op de achterliggende quantumchromodynamica in kaart brengen,’ zegt Laenen. Met dergelijke correcties kun je van lastig uit te rekenen vergelijkingen steeds dichterbij de echte uitkomst aanschuren. Dat is geen gemakkelijke opgave, want elk stapje nauwkeuriger maakt de berekening direct enorm veel complexer. Dat kun je bijvoorbeeld zien aan de hoeveelheid Feynmandiagrammen die je nodig hebt om een berekening in te vangen. Zo’n Feynmandiagram is een schematische weergave van de interacties tussen verschillende deeltjes. ‘Bij hogere ordes heb je er meer en meer van nodig. In de laagste orde is het er maar eentje, maar als je naar een derde-ordecorrectie gaat kijken, heb je er soms al honderdduizend nodig.’ Het lastige van het werk aan dit soort hogere-ordecorrecties is volgens Laenen dat je het alleen kunt doen door listige nieuwe methodes te ontwikkelen. ‘Veel

van de berekeningen kunnen simpelweg niet met de huidige technieken. Daarvoor moeten we nieuwe wiskunde ontwikkelen, maar ook nieuwe computermethodes.’ Een daarvan, het computerprogramma FORM, ontwikkelde Jos Vermaseren bij Nikhef. ‘Dat programma wordt nu over de hele wereld gebruikt,’ zegt Laenen. Een van de toepassingen was een berekening van de magnetische eigenschappen van het elektron. ‘Die eigenschappen kennen we nu tot 12 cijfers achter de komma. Dat is ongekend. Het is de nauwkeurigst beschreven eigenschap van de natuur die we kennen.’ Om nieuwe natuurkunde te ontdekken, richten fysici hun pijlen nu vooral op higgs: het deeltje dat andere deeltjes hun massa geeft. De vondst van dat deeltje was volgens Laenen niet alleen bijzonder omdat het zo lastig was om te doen. Het higgsdeeltje is ook bijzonder omdat het het eerste deeltje is zonder spin, de quantummechanische versie van het klassieke hoekmoment. ‘Met het higgsdeeltje hebben we eigenlijk een stukje van het vacuüm gevonden,’ zegt Laenen. Waar mensen jarenlang dachten dat de lege ruimte echt leeg was, blijkt

‘We zijn een vraagbaak voor experimentele fysici die met een theoretisch probleem zitten’

sinds de opkomst van de quantumfysica dat het een schuimend geheel vol deeltjesactiviteit is. Het gedrag van higgs schijnt mogelijk voor het eerst licht op het mysterieuze gebied. ‘Als er al nieuwe fysica bestaat, is de kans groot dat het opduikt bij reacties waarbij het higgsdeeltje betrokken is.’ De speurtocht is er een van de lange adem, maar de mogelijke beloning is groot. ‘Zelfs als we maar een hele kleine afwijking vinden van wat het standaardmodel voorspelt, hebben we toch iets te pakken.’ Een ander deeltje dat de theoretici nauwlettend in de gaten houden, is het topquark, het zwaarst bekende deeltje uit de deeltjesdierentuin. ‘Dat deeltje is zo zwaar omdat het een sterke koppeling met het higgsdeeltje heeft,’ zegt Laenen. Dat alleen al maakt het topquark interessant.



Als een nieuw deeltje experimenteel wordt gevonden, bestaat het doorgaans al decennia op papier. NIKHEF



Om de uitkomsten van vergelijkingen dichterbij de werkelijkheid te laten komen, is nieuwe wiskunde nodig. NIKHEF

Toch hoeft de volgende stap in de fysica niet te komen uit het nauwkeurige boekhoudwerk van door het standaardmodel voorgestelde deeltjesinteracties. Daarom bestudeert Robert Fleischer wat er gebeurt bij het LHCb-experiment, dat probeert te verklaren waarom er zoveel meer materie in het universum is dan antimaterie. ‘Het leuke is dat hij zelfs samen met de LHCb-groep publiceert,’ zegt Laenen. Het is een teken dat theorie en experiment steeds nauwer naar elkaar toegroeien, iets dat past bij de taak die Laenen aan zijn groep toeschrijft. ‘We zijn niet alleen een ideeënmachine, maar verbinden ook de verschillende universiteiten met dit instituut. En we vormen een brug tussen theorie en experiment. We zijn daarom ook een vraagbaak voor experimentele fysici die met een theoretisch probleem zitten.’ Theoriegroepleden Piet Mulders en Juan Rojo zijn bezig met de structuur van het proton te doorgronden, een structuur die zijn sporen zou kunnen nalaten in de deeltjesbotsingen in de Large Hadron Collider, de deeltjesversneller van Cern. Nog weer anderen kijken juist voorbij de fysica die op dit moment in Geneve gebeurt. Zo onderzoekt Jan-Willem van Holten de theorie achter botsende zwarte gaten en zwaartekrachtsgolven, een belangrijke onderbouwing van de resultaten van zwaartekrachtsgolfdetectoren LIGO en Virgo. Bernard de Wit onderzoekt de theoretische fundamenten van zwarte gaten en hun generalisaties. En Bert Schellekens bekijkt waar het standaardmodel vandaan

komt. ‘Hij kijkt naar de lage-energielimiet van de snaartheorie,’ zegt Laenen. Daaruit komt soms het standaardmodel naar voren en soms een andere theorie die daar sterk op lijkt. Door de snaartheorie en het standaardmodel bij elkaar te brengen, slaat hij bovendien een brug tussen de kosmologie en de deeltjesfysica. Marieke Postma bestudeert een zo mogelijk nog grootschaliger idee. De vraag of het higgsboson niet toevallig hetzelfde is als theoretisch deeltje dat ook geen spin zou moeten hebben: het inflaton. Dat inflaton is als het bestaat verantwoordelijk voor de inflatie, de versnelde uitdijning van het universum dat volgens de meeste theoretici kort na het ontstaan van de oerknal plaats moet hebben gevonden. Tot slot ontbreekt ook een van de grootste mysteriën uit de moderne fysica niet in het portfolio van de theoriegroep. Kalliopi Petraki bestudeert namelijk de mysterieuze donkere materie. ‘Zij bekijkt of die deeltjes niet ook bepaalde interacties met elkaar hebben,’ zegt Laenen. Bewijs voor zulke interacties zou kunnen opduiken in de manier waarop sterrenstelsels clusteren. ‘We zijn als theoriegroep de afgelopen jaren enorm gegroeid,’ zegt Laenen. Dat is niet voor niets. Met het recente experimentele succes van de vondst van het higgsdeeltje, is de blik weer stevig op de horizon gericht. ‘We hebben nu ruim veertig personen in deze groep zitten die op zoek zijn naar die nieuwe fysica,’ zegt Laenen. Aan hen is de schone taak om de fysica van de toekomst vandaag alvast op papier te zetten. ■

## INGEZOOMD

### Paradepaardje

Dit reuzeapparaat is CERNs parade-paardje: de ATLAS-detector. ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) is even groot als het Paleis op de Dam. Met de detector meten onderzoekers de deeltjesbotsingen in de LHC. Die metingen bewezen in 2012 samen met CMS-metingen het bestaan van het higgsboson.

De verschillende onderdelen van de detector zijn als uien schillen geplaatst rond de plek waar de deeltjes botsen. De buitenste laag bestaat uit muonkamers, die in Amsterdam zijn ontworpen, gebouwd en getest. Ook hebben onderzoekers van Nikhef hardware en software ontwikkeld voor de ATLAS-metingen en werken ze veelvuldig mee aan de gegevensanalyse.

ATLAS produceert jaarlijks meerdere petabytes aan data. Fysici van onder andere CERN en Nikhef proberen in die gegevensbrij aanwijzingen voor nieuwe deeltjes te vinden. —YF

CERN

