

Voorjaar  
2019

# DIM ENS IES

Nikhef

Nationaal  
instituut voor  
subatomaire fysica

## UPGRADES

Van CERN tot Gran Sasso:  
overal wordt nu gesleuteld  
aan de experimenten

## ASTRODEELTJES

Vele vensters  
op het universum



# Maastricht zevende partner binnen Nikhef

Het Nikhef-samenwerkingsverband voor subatomaire fysica in Nederland is in februari 2019 uitgebreid met een zevende partner. De Universiteit Maastricht brengt het bestaande onderzoek in de (astro) deeltjesfysica bij de groep Fundamentele Natuurkunde van de Faculteit Science and Engineering onder de Nikhef-noemer. De groep werkt mee aan het LHCb-experiment op CERN dat speurt naar fundamentele verschillen tussen materie en antimaterie. Daarnaast doet de groep onderzoek naar zwaartekrachtsgolven in de LIGO-Virgo-collaboratie in Italië en de VS. Beide onderzoekslijnen sluiten naadloos aan bij de missie van Nikhef en zullen onderdeel worden van lopende onderzoeksprogramma's bij Nikhef.

'Een prachtige versterking van het nationale samenwerkingsverband', noemde Nikhef-directeur Stan Bentvelsen de komst van Maastricht bij de ondertekening van de overeenkomst. Het samenwerkingsmodel van Nikhef werd dit voorjaar ook geprezen in de zogenoemde Portfolio Evaluatie van de instituten van NWO en KNAW. Volgens de Commissie Frenkel kan Nikhef gelden als een voorbeeld van een samenwerking die nationale meerwaarde op een onderzoeksgebied geeft.

Universiteit Maastricht versterkt het (astro)deeltjesfysica-onderzoek verder met de aanstelling van Stefan Hild als hoogleraar Gravitational Research per 1 augustus. Zwaartekrachtsgolfexpert Hild was eerder verbonden aan de Universiteit van Glasgow in Schotland. Hij komt onder andere naar Maastricht vanwege de ambitie om daar ETPathfinder te bouwen. Deze R&D-faciliteit moet voor de toekomstige Einstein Telescope bijvoorbeeld precisietechnologie, coatings en optica ontwikkelen, maar ook meet- en regeltechniek, geotechniek, seismische isolatie, ICT, engineering, productie en materialen. Hild zei bij zijn aanstelling te hopen dat Maastricht een internationaal innovatiecentrum voor zwaartekrachtsgolfdetectie kan worden.

## WEBSITE

Op de vernieuwde website [Nikhef.nl](http://Nikhef.nl) is het dagelijkse nieuws te vinden van het Nationaal instituut voor subatomaire fysica en uit de wereld van de deeltjesfysica. Volg het instituut ook op twitter via @\_nikhef



## De menselijke dimensie

Met trots presenteer ik het eerste nummer van DIMENSIES, het magazine over de grensverleggende wetenschap van Nikhef. Dit magazine zal u tweemaal per jaar op de hoogte houden van de activiteiten van het Nikhef-samenwerkingsverband in de internationale wereld van de deeltjes- en astrodeeltjesfysica. Van de experimenten en resultaten, tot de toekomstplannen en drijfveren van wetenschappers en technici.

De natuurkunde van deeltjes klinkt vaak erg abstract en ingewikkeld. Maar uiteindelijk is het in alle opzichten mensenwerk. Fysici en technici bedenken theorieën, bouwen experimenten en verwerken de metingen. En wat ze ontdekken is een avontuur voor de hele mensheid. DIMENSIES maakt u deelgenoot van het avontuur.

Dit voorjaarsnummer van DIMENSIES heeft als hoofdthema 'upgrades'. Momenteel ligt de LHC-versneller op CERN voor twee jaar stil om de machine verder te verbeteren. Voor Nikhef betekent dat, na jarenlange voorbereidingen, dat we koortsachtig bezig zijn met de nieuwe detectoronderdelen die we installeren bij LHCb, ALICE en ATLAS ter verbetering van de metingen van de botsingen. In later jaren zullen we daarvan profijt hebben en kan de toename van de stroom meetgegevens efficiënt worden verwerkt.

Ondertussen vergeten we niet de huidige grote stapel botsingsgegevens van de afgelopen periode te analyseren, op zoek naar nieuwe resultaten.

De komende jaren staan in het teken van nog veel meer meetgegevens om onze kennis van de deeltjeswereld verder de duimschroeven te kunnen aandraaien. Begrijpen we echt hoe het universum op het allerkleinste niveau in elkaar steekt? We weten dat onze modellen niet perfect zijn. De vraag is waar en hoe het anders en beter kan.

Mensen zijn de verborgen dimensie aan alle wetenschap. Want grensverleggend onderzoek is één ding, maar het zijn de talentvolle studenten, onderzoekers, engineers, technici, promovendi en postdocs, vanuit Nederland en de hele wereld die het voor elkaar moeten zien te boksen.

**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 voor kosmische deeltjes, donkere materie en zwaartekrachtsgolven in de hele wereld.

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](mailto:info@nikhef.nl)  
+31 (0)20 592 2000

## DIMENSIES voorjaar 2019

### REDACTIE

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

### FOTOGRAFIE

Ronald Blinderman, Marco Kraan

### MEDEWERKERS AAN DIT NUMMER

Ans Hekkenberg, Dorine Schenk, Gieljan de Vries, Thijs Balder (graphics), Floris Tilanus (kunst), Mats van Soelingen (fotografie)

### VORMGEVING

Enchilada

### OP DE COVER

Nikhef-fysicus Kazu Akiba werkt aan de nieuwe pixeldetector voor het LHCb-experiment op CERN in Genève.  
Foto: CERN



# Repareren, verbeteren, verbouwen



De geopende ALICE-detector

De grootste deeltjesversneller ter wereld, de Large Hadron Collider in Genève, gaat op termijn met nog intensere bundels protonen de extremen van de deeltjeswereld verkennen. Sinds december hebben technici van deeltjeslab CERN twee jaar om de LHC-versneller daarop voor te bereiden. Voor de grote experimenten op CERN is de versnellerpauze een uitgelezen gelegenheid om apparatuur te repareren en soms zelfs ingrijpend te verbouwen.

DIMENSIES maakte een rondgang langs de koortsachtige werkzaamheden bij de Nederlandse groepen op CERN en in de Nikhef-werkplaatsen in Nederland. Van extra muonkamers voor ATLAS en het nieuwe hart van ALICE tot de totale make-over van het LHCb-experiment.

## Nikhef en CERN

De Large Hadron Collider is de grootste deeltjesversneller ter wereld. In een 27 kilometer lange cirkelvormige tunnel bij Genève laat deeltjeslab CERN deeltjes met hoge energie op elkaar botsen. Op vier plaatsen in de ring zijn grote detectoren opgesteld die de botsingen nauwkeurig in kaart kunnen brengen en signalen vastleggen van de nieuwe deeltjes die ontstaan. Bij drie ervan, ATLAS, LHCb en ALICE, is Nederland via het Nationaal instituut voor subatomaire fysica Nikhef nauw betrokken. De metingen worden gebruikt om theorieën te maken en te testen over de bouwstenen van het universum.

## ALICE

### Nieuw hart voor oerknal-detector

Het ALICE-experiment wordt geschikt gemaakt om veel meer botsende loodatomen tegelijk te kunnen bekijken dan voorheen.

In december botsten kort voor kerst op CERN middenin de ALICE-detector de voorlopig laatste loodkernen op elkaar en ontstonden nu en dan plasmadruppels van quarks en gluonen zoals kort na de oerknal hebben bestaan. Inmiddels is het voorjaar en staan diep onder de grond de grote rode deuren van de detector open en wordt er binnen druk gesleuteld aan de toekomst. Kabels worden losgehaald, onderdelen los geschroefd en weggetakeld. ALICE krijgt een nieuw hart, zeggen betrokkenen met gevoel voor drama.

ALICE-fysicus Paul Kuijer van Nikhef houdt een onderdeel van dat nieuwe hart voor zich op zijn hand. Drie staafjes koolstofvezel zo dun als een lucifer zijn met nog dunnere schuine dwarsverbindingen samengebracht in een verrassend stijve driekanten draagarm, een paar centimeter in doorsnee.

De vederlichte vakwerkconstructie is in al zijn nietigheid een cruciaal onderdeel van het 10 duizend ton wegende ALICE-experiment op CERN dat op een bijzondere manier naar het samenspel van quarks en gluonen kijkt. Die detector, een kleine 60 meter onder de grond, is volgepakt met sensoren die de brokstukken en straling van botsingen kunnen detecteren en vastleggen.

De ijle draagarmen, zegt Kuijer, zijn met kennelijk eindeloos geduld handgemaakt door Russische partners in het ALICE-experiment op CERN. Ze vormen de drager waarop dit voorjaar in een cleanroom op Nikhef siliciumpixel-chips worden verlijmd, plus koeling, plus bekabeling en ingebouwde elektronica. Elke chip heeft ruim een half miljoen microscopische pixels, die elk gevoelig zijn voor passerende hoogenergetische deeltjes. *Staves* worden de balkjes vol sensoren formeel genoemd, naar het Engels voor de duigen in een houten ton.

## Deeltjescamera

Deze duigen worden onderdeel van de nieuwe vatvormige binnenste deeltjescamera, het Inner Tracking System, of kortweg ITS. De ITS is ongeveer een halve meter in diameter en het onderdeel dat het dichtst bij de botsingen in de bundelpijp zit. In de vorige versie bekeek het experiment de lood-loodbotsingen vanaf minimaal 3,9 centimeter afstand, de diameter van de bundelpijp in het experiment. De nieuwe binnendetector komt tot op 2,3 centimeter. Het klinkt als een klein verschil, maar het geeft enorm veel meer detail.



ITS-draagarm in de Nikhef-cleanroom



In totaal heeft de deeltjescamera een oppervlak van 10 vierkante meter met ruim 12,5 miljard actieve pixels en minimaal energieverbruik. Het apparaat is in staat om tot op 5 duizendste millimeter precies een passerend deeltje te registreren.

Een *stave* betekent ongeveer een week geconcentreerd handmatig montagewerk, zegt ALICE-postdoc Goran Simatovic van Nikhef. In totaal zijn er voor de ITS honderd nodig, waarvan Nikhef er vijftwintig zal assembleren, testen en vershippen naar Genève. 'We moeten leren om flink tempo te maken', realiseert Simatovic zich.

### Trillingsvrij

Rond de jaarwisseling zijn de eerste paar Amsterdamse detectorduigen al in speciale trillingsvrije kratten naar CERN in Genève vervoerd, waar ze aan scherpe kwaliteitscontroles worden onderworpen. Nikhef is een van de vier labs in de wereld die zich wijden aan de massaproductie van de pixel-detectors. Aan het nieuwe binnenwerk wordt al sinds 2010 intensief gewerkt.

## LHCb Facelift voor de beauty-fysica

De LHCb-detector op CERN krijgt de komende twee jaar een ingrijpende makeover.

Diep onder de grond op toegangspunt-8 van CERN in Genève spert de LHCb-detector dezer dagen zijn karakteristieke muil voor ploegen gehelme wetenschappers en technici. Terwijl elders aan de LHC-versneller wordt gesleuteld, gaat meteen ook het experiment rond zogeheten beauty-fysica flink op de schop.

Nederland bouwt via Nikhef mee aan twee verbeteringen van LHCb: de VELO aan het begin van de detector, en de SciFi verderop.

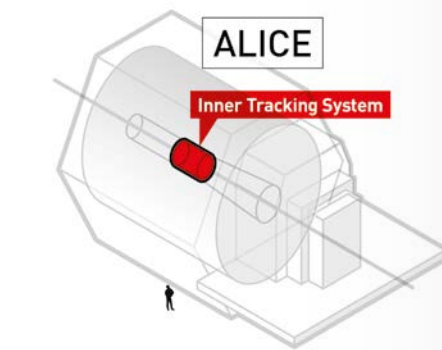
Uitgangspunt voor de upgrade-operatie is dat ALICE tot 100 keer meer meetgegevens kan gaan verzamelen dan in eerdere meetrondes van de versneller. Ook de elektronica zal door snellere en modernere versies worden vervangen, inclusief de trigger-apparatuur die beslist welke botsingen bijzonder genoeg zijn om vast te leggen. Het computersysteem dat data verzamelt en toegankelijk maakt wordt eveneens vernieuwd.

Het nieuwe hart van ALICE wordt rond de zomer van 2019 bovengronds op CERN in elkaar gezet en daar ook getest. Tegelijk wordt ook nieuwe elektronica ingebouwd, deels ontwikkeld door de ALICE-groepen van Nikhef en de Universiteit Utrecht. De elektronica is zo goed mogelijk bestand tegen de straling dichtbij de botsende loodbundels. In de loop van 2020 wordt de apparatuur onder de grond in ALICE ingebouwd en nog verder getest, zeggen de planschema's. De deadline is duidelijk. Begin 2021 komt de LHC-versneller met een intensere bundel en meer energie weer in bedrijf.

### Sensoren

Natuurkundige Wouter Hulsbergen van Nikhef is vooral betrokken bij de nieuwe VELO-detector. Voor de originele LHCb bouwde Nikhef vooral mee aan de benodigde infrastructuur voor VELO: delen van de vacuümtank, het systeem dat onderdelen mechanisch van en naar de bundel kan bewegen, koeling. 'Bij de huidige upgrade concentreren we ons juist sterk op de sensoren.'

In een van de cleanrooms van Nikhef in Amsterdam laat Hulsbergen, gehuld in verplichte witte labjas en haarnetje, zien waar zijn team sensormodules gaat



### ALICE-detector

Het ALICE-experiment op CERN maakt vooral van de LHC-versneller gebruik als die geen protonen rondjaagt, maar de veel zwaardere kernen van loodatomen. Als die botsen versmelten door alle energie de kerndeeltjes en ontstaat een ziedend plasma van quarks en gluonen, dat ook bij de oerknal heeft bestaan. ALICE is 26 meter lang en 16 meter hoog en weegt circa tienduizend ton. Met grote inbreng van Nikhef wordt in de huidige upgrade het Inner Tracking System gemoderniseerd.



SciFi-panelen in de maak

assembleren. Die modules komen uiteindelijk het dichtst bij het botsingspunt in de versneller te staan in de zogeheten VELO, zoals de vertex locator kortweg heet. Als een supersnelle digitale camera gaat dat apparaat het ontstaan van nieuwe geladen deeltjes uit de proton-botsingen vastleggen. Preciezer dan het oude systeem kon, en vooral ook voor veel meer deeltjes tegelijk.

'In feite bouwen we een geheel nieuwe detector', zegt LHCb-groepsleider Marcel Merk van Nikhef over de twee omvangrijke Nederlandse projecten, die de huidige

rustpauze van twee jaar helemaal in beslag nemen. LHCb is bedoeld voor het bestuderen van zogeheten beauty-fysica van deeltjes die zware quarks als beauty of charm bevatten en die verschillen tussen materie en antimaterie kan blootleggen.

Doel van het nieuwe systeem is om alle gemeten deeltjes vast te leggen, waar eerder een zogeheten trigger in de eerste oogwenk besloot of een signaal daarvoor wel interessant genoeg leek. Per bundel-botsing kon tot nog toe gemiddeld één proton-protonbotsing worden bekeken; in het vervolg zijn dat er zo'n 7 en worden tot 30 keer zoveel data genomen. Meer meetgegevens, is de hoop, geven meer zicht op heel zeldzame verschijnselen.

Nikhef gaat 30 van zulke modules in elkaar zetten: 26 voor de LHCb-vertex-detector, en nog vier als reserve. Britse universiteiten bouwen de rest. Voor de zomer moet de klus geklaard zijn, zegt Hulsbergen.

### Freesmachine

Onderdelen voor al die modules, van de grote silicium koelvin met ingeëtste microkanalen die verhitte voorkomt tot de speciale 256x256 pixelchips met micro-elektronica en hoogspannings-aansluitingen, worden door andere instituten in de hele wereld aangeleverd. Het Nikhef-team plakt en soldeert alle delen met extreme precisie aan elkaar, goeddeels handmatig, en stuurt het eindproduct na eigen tests naar een lab in Liverpool.

De pixelchips van ongeveer 1 bij 3 centimeter liggen in een L-vorm op het uiteinde van elke module, zodat ze in hun binnenhoek vlakbij de bundelpijp kunnen komen. De 26 modules staan in een uitgekend patroon op lange dunne stelten exact in elkaars verlengde en vormen met hun uiteinden de helft van een denkbeeldige tunnel die de bundel uiteindelijk zal omsluiten. Een tweede set van 26 zal de bundel van de andere kant insluiten.

Uniek aan de VELO is dat het instrument uit twee beweegbare helften bestaat, die mechanisch meer of minder dichtbij de bundel kunnen worden gebracht. De twee delen bevinden zich in een ander staaltje precisiewerk van Nikhef, de zogeheten RF-boxen. Dat zijn wigvormige aluminium trommels die precies om de rijen van 26 pixelmodules vormgegeven zijn, en die deze modules in het benodigde vacuüm houden.

In een reusachtige computergestuurde freesmachine creëren technici van de mechanische werkplaats in Amsterdam elke box uit een massief blok aluminium. Elke trommel, zegt Hulsbergen, is zeker vier maanden werk.

### SciFi

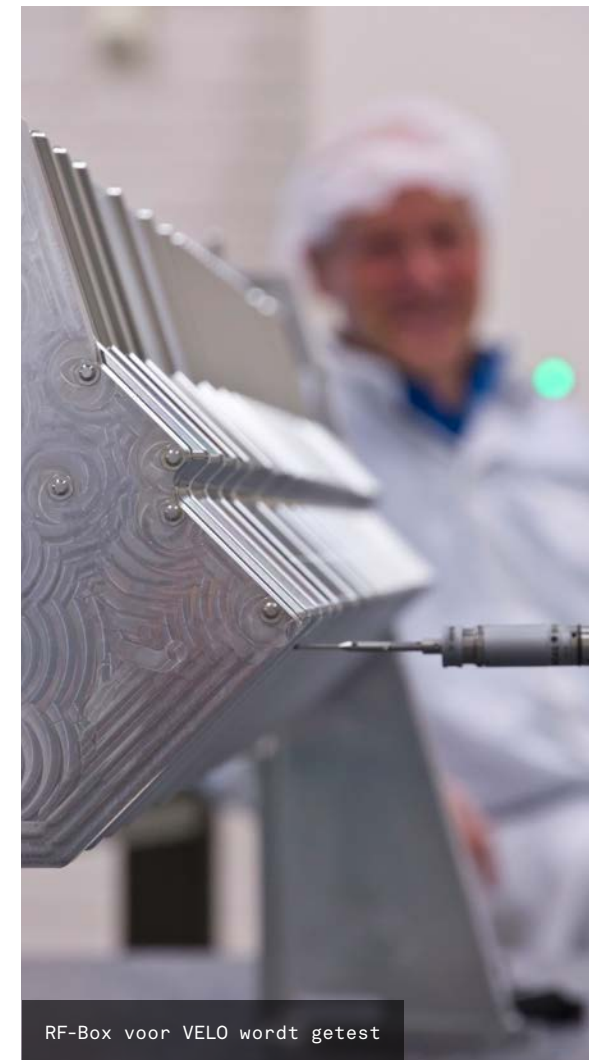
De VELO vormt in feite het beginpunt van de meetrein die LHCb verder loslaat op proton-protonbotsingen uit de LHC-versneller. De trechtervormige opstelling meet met hoge precisie deeltjesprocessen in de voorwaartse richting. Na de VELO-vertexdetector, die de plaats van de botsing moet bepalen, volgt nog een batterij aan trackers en muonkamers. Een deel daarvan is omringd door een gigantische elektromagneet, die geladen deeltjes een gekromde baan moet geven en die door alle sloopwerkzaamheden inmiddels oogt als een vervaarlijke open-gesperde bek.

Nikhef speelt ook een grote rol bij één van de detectorlagen na de magneet, een project dat pakkend SciFi heet, van *scintillating fibers*. Dat is een dicht pakket glasvezeldraden waarin passerende deeltjes een lichtflits veroorzaken die aan het uiteinde van elke fiber opgevangen wordt met een digitale fotochip.

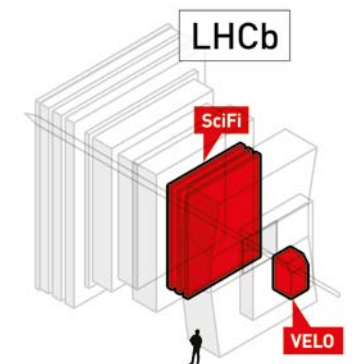
### Panelen

In het nieuwe systeem is zo'n 11.000 kilometer glasvezel verwerkt. Daarvan zijn matten vervaardigd die uiteindelijk in 140 panelen van 5 bij 0,5 meter zijn geplaatst. Nikhef construeerde 40 van zulke panelen. Daarnaast bouwt Nikhef een speciaal 3D-geprint titanium koelsysteem waarmee de detectoren tot 40 graden onder nul kunnen worden afgekoeld.

Begin dit jaar zijn onder toezicht oog van SciFi-projectleider Antonio Pellegrino in Amsterdam de SciFi-panelen van Nikhef in kratten met een vorkheftruc voorzichtig in de vrachtwagen geladen voor transport naar Genève. Inmiddels werkt een team van onder meer Nederlandse technici bovengronds op de LHCb-site aan de integratie van de panelen. Pellegrino is er week op week af zelf bij. Voorjaar 2020 moet het geheel door de schacht naar beneden en is de metamorfose van de LHCb-detector weer een stap dichterbij.



RF-Box voor VELO wordt getest



### LHCb-detector

Het LHCb-experiment is een detector die in één bundelrichting met hoge precisie de botsingsprocessen van protonen bestudeert. De nadruk van het onderzoek ligt op het ontdekken van verschillen tussen materie en antimaterie. De asymmetrische detector is 21 meter lang en 10 meter hoog, en heeft een opvallende trechtervorm. Nikhef bouwt mee aan de nieuwe centrale VELO-detector rond de protonbotsingen in LHCb, en SciFi-detectorplaten verderop in het systeem.



## ATLAS

## Radertjes in de reuzendetector

Het ATLAS-experiment zet nu al stappen om de toekomstige LHC-versneller bij te kunnen benen.

Fysicus Tristan du Pree van Nikhef opent de deur van een hangar op een uit-hoek van het CERN-terrein bij Genève. Kijk, wijst hij naar twee reusachtige lichtblauwe cirkelschijven in grote stalen jukken aan een wand in de verte: de New Small Wheels (NSW). ‘Op CERN is klein nog steeds groot’, lacht hij.

Gehelmd CERN-monteurs manoeuvreren zichzelf in een hoogwerker naar de juiste werkpositie om meanderende kabels en leidingen op een van de schijven te draperen. Beneden turen experts afwisselend mee naar de werkzaamheden en naar hun beeldschermen met bouwtekeningen. Millimeterwerk op een reuzenschaal is het.

De NSW vormen momenteel misschien wel het meest tastbare deel van de upgrades die de grote ATLAS-detector op CERN de komende twee jaar ondergaat. De twee cirkelschijven omvatten kamers met gasbuizen die muonen betrapten die ontstaan bij de protonbotsingen in de LHC-versneller. Muonen, zwaardere verwanten van het bekende elektron, geven een spoor van elektrische ontladingen in het gas in de detector.

De New Small Wheels worden deel van de zogeheten trigger van ATLAS, het systeem dat helpt beslissen welke botsingen interessant genoeg zijn om er meetgegevens van te bewaren.

## Muonkamers

Du Pree coördineert gedurende de LHC-versnellerpauze tot 2021 voor Nikhef het onderhoud aan de al bestaande muondetectoren op de ATLAS-detector. Die liggen als een schild om een groot deel van de immense ondergrondse detector heen en zijn deels gebouwd door Nikhef. Sommige kamers zijn defect en moeten vervangen worden. Op termijn worden ze allemaal vervangen door systemen met dunnere gasbuizen, die meer details kunnen vastleggen.

Nikhef is van oudsher hoofdrolspeler in het uitlijnen van de muonkamers in ATLAS. Weten waar een signaal vandaan komt, is cruciaal om botsingen te reconstrueren en begrijpen. In ATLAS wordt daartoe een Nederlands uitlijnsysteem met rode lasers en videocamera's gebruikt. Bij een toekomstige versnellerpauze in 2024-2025 gaat dat vervangen worden door een systeem met nieuwe blauwe lasers en chipsensoren, vooral omdat die beter tegen de straling in de detector bestand zijn.

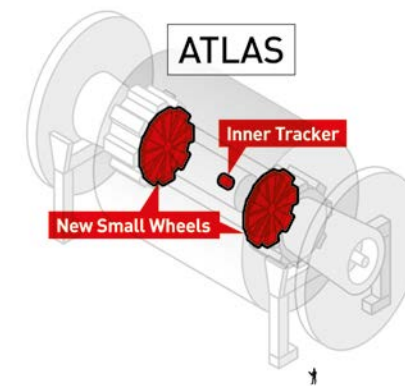
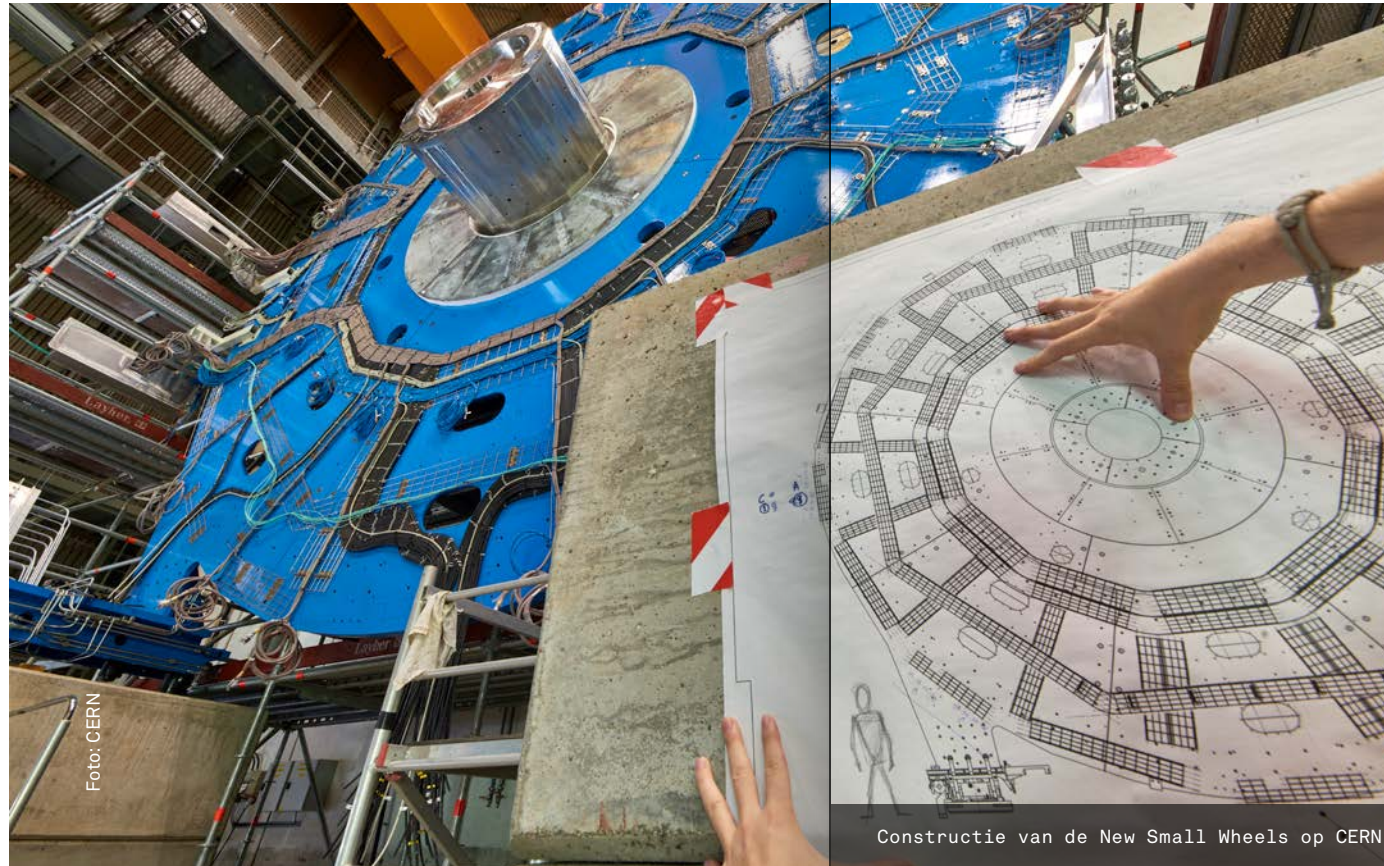
Du Pree heeft rode printplaatjes met het vertrouwde Nikhef-logo op zijn bureau liggen die de basis voor het nieuwe uitlijnsysteem moeten worden. Kleine elementjes in een reusachtige internationale samenwerking tussen fysici, elektronici, de mechanische werkplaatsen en informatici. ‘2025 klinkt verder weg dan het is’, zegt hij met een blik op de imposante werkschema's.

## Magneetsensoren

Op de New Small Wheels is de bijdrage van Nikhef relatief beperkt. Anderen ontwerpen en bouwen de systemen, maar Nederland levert sensoren voor magneetvelden en temperatuur. ‘Dat klinkt niet heel spectaculair, maar elk onderdeel telt’, zegt Du Pree.

Met het oog op de toekomstige data-vloed zal voor het eerst ook nieuwe elektronica voor data-afhandeling worden gebruikt: het digitale FELIX-systeem dat de laatste tien jaar ondermeer bij Nikhef in Amsterdam is ontwikkeld. Als het werkt, kan het later de standaard worden voor de uitlezing van het hele muonsysteem.

Komende augustus, vermelden de werkschema's, wordt het eerste New Small Wheel omlaag gelaten en gemonteerd. Of het tweede exemplaar ook de komende twee jaar wordt geplaatst, staat nog te bezien. ◀



## ATLAS-detector

De ATLAS-detector is de grootste deeltjesdetector op CERN. De installatie op 100 meter onder de grond is met 46 meter lengte en 25 meter diameter ongeveer zo groot als het Paleis op de Dam in Amsterdam. ATLAS ligt om de bundelpijp van de LHC-versneller en vangt de deeltjes die ontstaan bij botsingen van protonen. Hij werd gebouwd voor de jacht op het higgsdeeltje en het ontdekken van nieuwe deeltjes en processen. De ATLAS-groep bij Nikhef werkt bij de upgrade aan de muonkamers, uitlijnsystemen, en op termijn de nieuwe centrale ITk-detector.

## Voor de volgende shutdown: ITk

Nikhef speelt een belangrijke rol in het Inner Tracker (ITk)-project voor ATLAS, een upgrade die pas na 2024 plaatsvindt. De binnenste laag van de ATLAS-detector, die om het punt heen zit waar de bundels op elkaar botsen, wordt volledig vervangen. Zo kan het hart van de detector het straks weer aan om de deeltjessporen uit het interactiepunt heel nauwkeurig te reconstrueren. Ook als de High-Luminosity LHC vanaf ongeveer 2026 een nog veel intensere stroom aan botsingen gaat produceren.

Opgebouwd uit een middenstuk (de *barrel*, cilindrische 'tonnen' die om elkaar heen zitten) en twee eindstukken (de *endcaps*, verticale schijven die achter elkaar geplaatst zijn) omsluit de Inner Tracker het interactie-punt. Het apparaat van 6 meter lang en 2 meter doorsnee gaat helemaal bestaan uit silicium-pixel- en siliciumstripdetectoren. Dat is enorm groot voor zo'n soort detector.

Op Nikhef ontwerpen en bouwen technici de mechanische draagstructuur voor de twee *endcaps* van de silicium-stripdetectoren. ‘De grote uitdaging is dat deze structuren in feite oneindig stijf moeten zijn, maar tegelijkertijd eigenlijk geen massa mogen hebben’, zegt ingenieur Jesse van Dongen van de afdeling

Mechanische Technologie. Samen met ingenieur Martin Doets is hij verantwoordelijk voor ontwerp en constructie van dit project. ‘We maken de structuur nu van koolstofvezel met epoxy. Andere onderdelen zijn van kunststof, zoals Torlon. Metalen gebruiken we niet meer. Binnen Nikhef hebben we ondertussen expertise opgebouwd hoe we deze moderne materialen het beste kunnen toepassen.’

In de mechanische werkplaats op Nikhef is een prototype te zien. ‘We zijn trots dat ons ontwerp recent goedgekeurd is door de ATLAS-collaboratie. We staan op het punt om binnenkort te beginnen met de productie’, voegt Van Dongen toe.

Per *endcap* moeten deze draagstructuren zes lagen van 32 bloemblad-vormige siliciumstrip-detector-modules herbergen, de *petals*. Nikhef neemt de volledige integratie van één van de *endcaps* voor zijn rekening. Hiervoor is al één van de Nikhef cleanrooms gereserveerd die nogal druk in gebruik zijn voor alle upgrades. In 2021 arriveren de *petals* die op andere instituten worden gemaakt. Rond 2024 gaat de geïntegreerde en geteste *endcap* naar CERN.







# Data, koffie en house

Terwijl de versneller in Genève uit staat, werken studenten en promovendi gestaag door aan de analyse van een oceaan aan meetgegevens.

Tekst: Dorine Schenk

Op CERN in Genève of op Nikhef in Nederland, voor promovendus Luuk Vermunt van het ALICE-experiment is zijn werk overal hetzelfde. Waar hij ook is, hij zit achter zijn laptop, schrijft de software die metingen gericht moet analyseren, drukt op enter en haalt koffie. 'De analyses kunnen dagen duren, dus begin je gewoon aan de volgende analyse-codes. Er is altijd meer te doen.'

Vermunt is een van de tientallen studenten, promovendi en wetenschappers van Nikhef die dagelijks data uit de grote detectoren op CERN doorwerken. Op zoek naar meer details en eventuele afwijkingen van de standaardverschijnselen. Niet starend naar metertjes op CERN, maar in lange gangen met kleine kantoren met twee of drie mensen aan een bureau. Laptops. Een dikke dataverbinding. Koffie. En veel koptelefoons voor de concentratie.

Sinds december staat de LHC-protonenversneller na ruim drie jaar meten helemaal uit voor werkzaamheden. Maar voor de analisten van LHC Run2, de meetperiode tussen de zomer van 2015 en eind 2018, is het eigenlijk business as usual. Nog niet de helft van de meetgegevens bij de verschillende experimenten is serieus doorgewerkt. 'Bij de meeste echte publicaties zijn we nog maar in 2017, dus op de helft van de beschikbare data', zegt ATLAS-wetenschapper Ivo van Vulpen van Nikhef. 'Er zit gewoon nog heel veel aan te komen.'

## Vakantiefoto's

De bijbehorende getallen zijn in elk geval indrukwekkend. De LHC produceerde in Run2 ongeveer een miljard proton-protonbotsingen per seconde. Dat resulteert in 159 zogeheten inverse femtobarn, een maat die fysici gebruiken om de hoeveelheid botsingen te meten: bijna 160 miljoen botsingen, die in principe elk een waaier aan signalen in alle onderdelen van de detectoren kunnen geven. In totaal leverde Run2 op die manier ongeveer een petabyte aan ruwe data op, vergelijkbaar met zo'n tien miljard vakantiefoto's. Zoiets zou een stapel cd's van bijna 2 kilometer hoog vereisen, exclusief de doosjes.

Hoe vind je iets nieuws in zo'n oceaan aan meetgegevens uit de detectoren? Er is simpelweg niet genoeg ruimte op de harde schijven van de experimenten om alles op te slaan, vertelt Katya Govorkova,

promovenda bij het LHCb-experiment. 'Daarom selecteren automatische triggers razendsnel de gebeurtenissen waar we in geïnteresseerd zijn en gooien ze de rest weg.'

Zo'n hardware-trigger kijkt eerst of de energie van een gebeurtenis hoog genoeg is om interessant te zijn. Een software-trigger bekijkt vervolgens welke deeltjes er ontstaan en bewaart alleen de metingen met interessante gebeurtenissen. 'Na deze triggers komt er nog steeds elke seconde een dvd aan data uit elke detector', rekent Govorkova snel uit.

## Code

Het zijn die geselecteerde metingen, met informatie over de deeltjes die ontstaan zijn, hun massa, snelheid, en vervaltijd, die naar de computers van onderzoekers gaan.

Die laten daar hun eigen zelfgeschreven analyseprogramma's op los, toegesneden op de specifieke verschijnselen die ze als fysicus bestuderen. Die code is dan van tevoren al uitvoerig getest met modellen en simulaties. De uitkomst van de analyses wordt vergeleken met simulaties en voorspellingen. Doen de deeltjes wat je verwacht? De kleinste afwijking kan wijzen op iets nieuws. 'We persen alle informatie uit de metingen', vat ATLAS-promovendus Marko Stamenkovic zijn werk samen. 'En hoe meer data hoe beter. Dat maakt het zekerder dat een opvallend ding niet een gewoon meetfoutje is.'

Dat niet alle gegevens van Run2 al gebruikt worden, komt niet alleen door het immense datavolume, legt Van Vulpen uit. Meetperiodes worden altijd afgewisseld met tijd om te sleutelen. 'Om de hoogste kwaliteit informatie uit de metingen te halen, moeten er eerst veel dingen gecontroleerd en gecalibreerd worden. Dat kost tijd. Voor de jaren 2017 en 2018 zijn zulke calibraties nog in de maak.'

Maar zelfs de eerste twee jaar data van Run2 leveren handenvol werk aan tientallen promovendi en wetenschappers. Dat lijkt eenzaam werk, vertelt LHCb-onderzoeker Jacco de Vries, maar is het niet. 'Er is wekelijks overleg met groepsgenoten in het buitenland. En bijna dagelijks met mensen op dezelfde gang. We overleggen over hoe we iets gaan aanpakken of stellen vragen als we ergens niet uitkomen.'

Om afleidende geluiden buiten te sluiten werken de meeste analytici met een koptelefoon op. Wat ze luisteren? 'Van Indie en rock, tot jazz en punk', zegt Vermunt. 'Maar halverwege februari werkte ik zelfs even met carnavalsmuziek.'

Als De Vries zich moet focussen houdt hij het vaak op klassieke muziek of deep house. 'Maar ik luister ook naar classic rock.' Govorkova, een geboren Russische, vertelt de laatste tijd zelfs de Nederlandse hiphop te ontdekken.

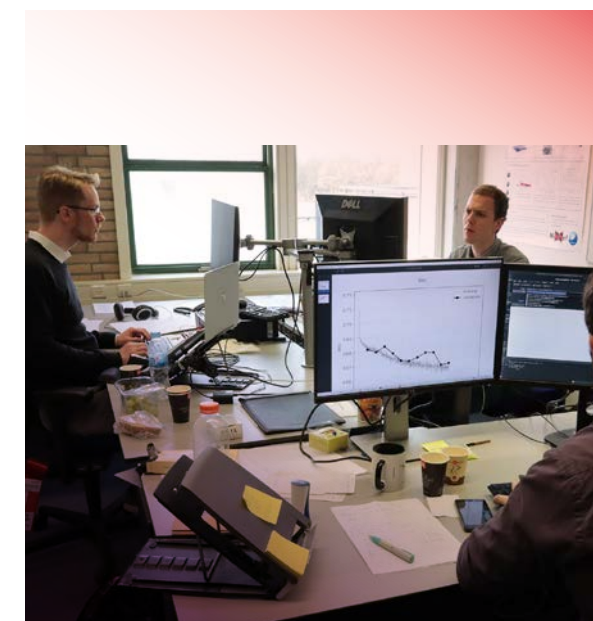
Wat in de zee van meetgegevens precies als een echte ontdekking geldt, verschilt per analyse. Overal worden grafiekjes gemaakt met daarin een lijn met de deeltjeseigenschappen die door modellen voorspeld zijn. In diezelfde grafiek worden de geanalyseerde metingen afgebeeld. Wijken die af van het voorspelde lijntje, dan heb je iets.

## Nieuwe kennis

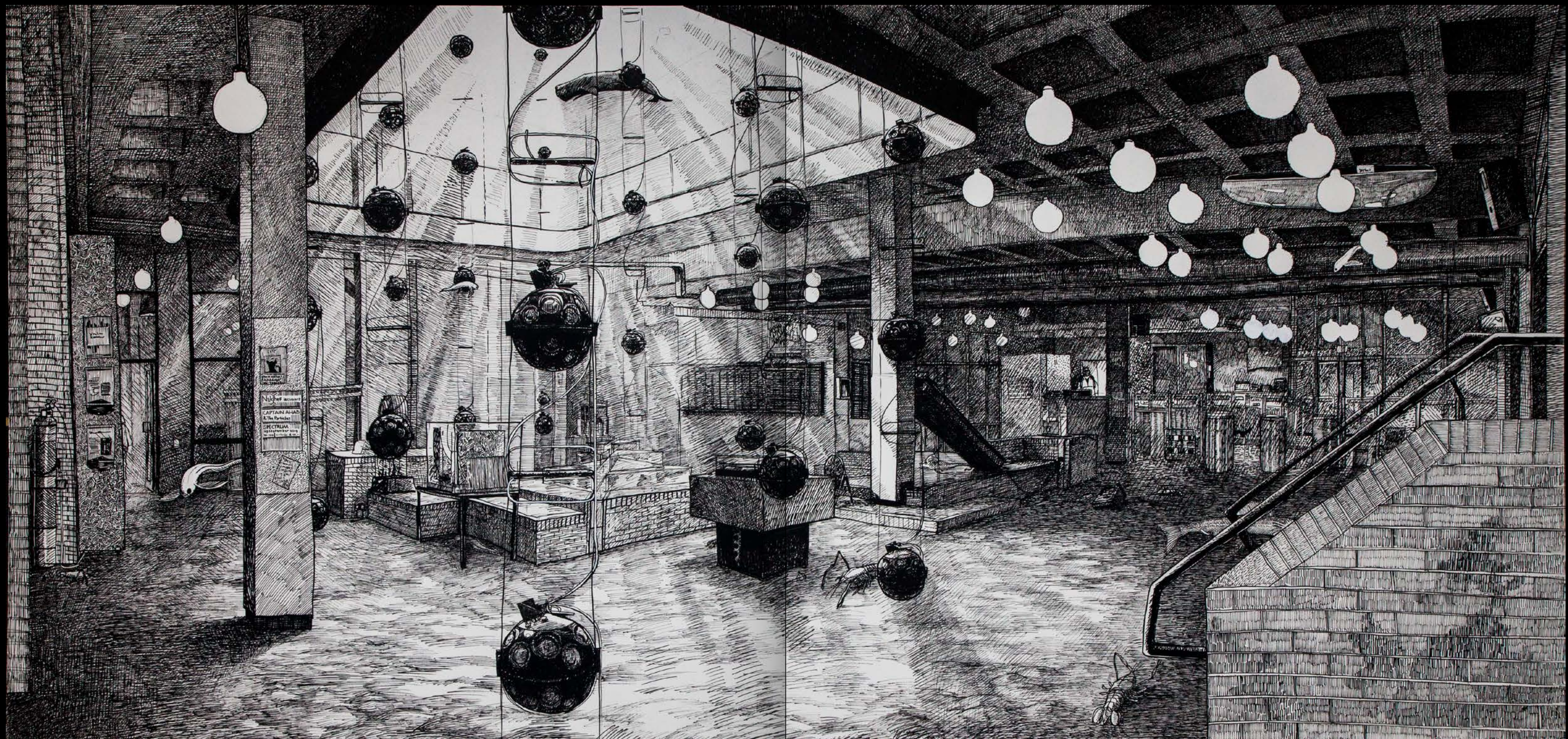
Maar dat is dan pas het begin, vertelt De Vries. 'Daarna moet je in de details van je analyses duiken, en elk 'wiebeltje' in de metingen begrijpen voordat je zeker bent van een ontdekking.'

De Vries: 'Saai is dat nooit, maar het kost wel veel tijd en al dat gepuzzel kan frustrerend zijn en stress geven, vooral als er deadlines voor conferenties naderen. Maar uiteindelijk geeft het wel veel voldoening om iets volledig te begrijpen.'

Analyseren is altijd spannend werk, zegt Stamenkovic. 'Eerst weet je niets, je hebt alleen metingen. Daaruit leiden we soms zomaar nieuwe kennis af.'







De centrale hal van het Nationaal instituut voor subatomaire fysica in Amsterdam, gezien door de ogen van graficus Floris Tilanus. Met zwarte markerstift tekende hij op een groot paneel in extreem detail de entree van het instituut, terwijl Nikhef-staf en studenten om hem heen wandelden. Inclusief elementen die de voorbijgangers niet konden zien: kabels en glazen bollen van de KM3NeT-neutrinodetector zoals die momenteel diep in de Middellandse Zee wordt gebouwd. Links en rechts zwemmen vissen langs, terwijl hogerop in de open hal zelfs een potvis passeert.

Floris Tilanus (Amsterdam 1966) is beeldend kunstenaar en tekenaar. Hij werkt onder meer voor weekblad De Groene Amsterdammer. Tilanus illustreerde de laatste jaren een reeks boeken, waaronder een nieuwe vertaling van de Fabels van LaFontaine. Hij tekende eerder in het openbaar op een grote bouwschutting in de Utrechtsestraat in Amsterdam en een wand in het Amsterdam Universitair Medisch Centrum. Het werk van 2.40 bij 1.20 meter is speciaal voor DIMENSIES vervaardigd, maar krijgt uiteindelijk een plaats in de hal van Nikhef.



# ‘Onderlinge tolerantie, dat is CERN’

Drie jaar lang was de Nijmeegse hoogleraar natuurkunde *Sijbrand de Jong* van Nikhef voorzitter van de CERN Council, het hoogste orgaan van het Europese centrum voor deeltjesonderzoek in Genève. Nog steeds een plek voor idealen, benadrukt hij.

Tekst: Gieljan de Vries

## Wat is het geheim van CERN?

‘CERN is opgericht met idealen voor ogen en dat merk je nog steeds. CERN draait om de handen ineenslaan om kennis te vergaren én een bijdrage te leveren aan de maatschappij. Pioniers zoals Pierre Auger en Eduardo Amaldi hadden in de jaren vijftig een groot cultureel ideaal, het verheffen van mensen. Daarom is CERN ook opgericht via UNESCO, de VN-organisatie voor onderwijs, wetenschap en cultuur. Om lidstaat van CERN te worden moet een land vandaag nog steeds de parlementaire goedkeuring bij UNESCO deponeren.’

## Dat ideaal leeft nog steeds?

‘Als onderzoeker merk je dat het nauwelijks wringt op de werkvloer, ondanks het onwaarschijnlijk grote aantal verschillende nationaliteiten en culturen op CERN. Natuurlijk zijn er incidenten geweest, bijvoorbeeld het bekladden van LGBT-posters of de vrouwonvriendelijke uitspraken van Strumia. Maar die zijn veel zeldzamer dan wat je meemaakt in de Nederlandse maatschappij. Door het gezamenlijke doel zijn onze mensen tolerant naar elkaar, dat is deel van de CERN-cultuur.’

## Wanneer wordt het pittig, als voorzitter van de CERN Council?

‘In mijn optiek moet de voorzitter een zo groot mogelijke eenheid in de raad krijgen. Dat is vooral uitdagend in de discussie over onze langetermijnplannen, want voor de tijd na de LHC-versneller zijn de plannen nog niet uitgekristalliseerd.’

## Is die rol extra complex door de 22 lidstaten en vele partners?

‘Het bestuur van CERN is helemaal niet zo complex. We hebben een groot commitment vanuit de 22 lidstaten. Het budget is daardoor extreem stabiel en je kunt ruim van tevoren plannen maken. Daarbinnen heeft de Directeur-Generaal veel autonomie, zolang de afgesproken prestaties maar worden gehaald.’

## De fysica dan. Veelgehoorde kritiek is dat er na het higgsdeeltje weinig nieuws uit de LHC komt.

‘Nou, we sluiten juist allerlei mogelijkheden uit, de randvoorwaarden voor nieuwe fysica staan steeds scherper. Er worden bijvoorbeeld maar geen supersymmetrische deeltjes gevonden, of sporen van extra ruimtedimensies. Dat betekent niet dat er geen nieuwe fysica is. Maar wel dat een belangrijke denkrichting aan het wankelen is, waarin veel mensen veel hebben geïnvesteerd, zoals de snaartheorie. Die energie kan ook naar andere denkrichtingen.’

## Hoe dan verder?

‘Zelf kijk ik uit naar de High Luminosity-versie van de LHC na 2026. Dat is echt niet ‘meer van hetzelfde’, zoals weleens wordt gedacht. Als je maar nauwkeurig genoeg meet, kun je zelfs van simpele, bekende processen iets nieuws leren. Interacties in een versneller voelen namelijk de invloed van alle deeltjes die maar kunnen bestaan, ook deeltjes die wij nog niet hebben waargenomen.’

## En wat leer je daaruit?

‘Zo kun je bijvoorbeeld meten hoeveel gluonen er in een elektron zitten. Voor studenten is dat totaal onverwacht, want er is toch geen interactie tussen elektronen en die boodschappers van de sterke kernkracht? Maar indirect wel: als het elektron een virtueel foton produceert, kan dat splitsen in een quark en een antiquark die dan weer een gluon produceren. Die onwaarschijnlijke mogelijkheid beïnvloedt heel lichtjes de eigenschappen van het elektron.’

## De moderne versie van hoeveel engelen er kunnen dansen op de punt van een naald?

‘Als je maar nauwkeurig genoeg meet, worden zulke quantumcorrecties zichtbaar. De LHC krijgt wat dat betreft dubbele slagkracht: zowel het energiebereik als de precisie om nieuwe effecten te meten.’

## Is dat de droom, telkens iets nieuws vinden?

‘Mijn hoop is dat ik in mijn leven alles kan begrijpen. Voor mij is het een nachtmerriescenario dat we maar een fractie zien, en dat er nog veel meer zo is. Maar ik ben bang dat het heelal zich daar weinig van aantrekt. Het Standaard Model verklaart niet alles, dat is volstrekt helder. Om maar wat te noemen: het verschil tussen materie en antimaterie is honderd miljoen maal groter dan wat het Standaard Model voorspelt. Te groot voor een rekenfout, het betekent dat er nog iets anders aan de hand moet zijn.’

## Komen de doorbraken uit de Future Circular Collider?

‘Dat is de hoop. Een nieuwe versneller van 100 kilometer omtrek. Maar het is ook lastig. Gaan we voor een versneller die nieuwe natuurkunde zoekt? Of voor een gespecialiseerde higgs-fabriek, omdat het higgsdeeltje waarschijnlijk als een soort doorgangshuis interactie heeft met nog onbekende deeltjes? Er is geen overduidelijke beste keus, het is een kwestie van smaak, durf en haalbaarheid. Zolang we voor ogen houden dat CERN er is om samen te doen wat we alleen niet kunnen, komen we eruit.’

## Zelf onderzoekt u kosmische straling met het Pierre Auger-observatorium op de Argentijnse pampa.

‘Kosmische straling is een cadeautje uit het heelal: snelle atoomkernen met soms wel een miljard maal meer energie dan in de LHC. Al zijn het er maar tientallen per jaar, we krijgen ze gratis. Daar móeten we gebruik van maken.’

## Nikhef en de Radboud Universiteit ontwikkelden nieuwe detectormodules voor Auger. Wat gaan die meten?

‘De 135 detectormodules die wij maken zijn onderdeel van de upgrade van Auger’s 1660 bestaande meetstations. We voegen ook een compleet nieuwe detectielaag van radio-antennes toe, onder meer gefinancierd via een Nederlandse NWO-Groot subsidie. Met die uitbreidingen kunnen we de muonen bestuderen die ontstaan bij de allereerste ultra-hoog-energetische botsingen. En dat wordt interessant.’

## Ook een manier om voorbij de LHC-versneller te kijken?

‘Bij zulke enorme botsingsenergieën meten we veel meer muonen dan al onze modellen kunnen verklaren. In die muonen zou zomaar de sleutel kunnen liggen voor totaal nieuwe fysica.’ ◀

Vergadering van de CERN Council in 2018



# Alle instrumenten op scherp

Illustratie: NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet

Neutrino's. Zwaartekrachtsgolven. Licht. Radiogolven. Astronomen en natuurkundigen leren steeds beter door hun eigen vensters naar dezelfde kosmische verschijnselen te kijken. 'De vakgebieden vinden elkaar.'

Tekst: Ans Hekkenberg

Op 17 augustus 2017 meten de Virgo- en LIGO-detectoren een schommeling in de ruimtetijd. De buitenwereld kijkt daar niet echt van op. Het is allang niet meer de eerste keer dat we zwaartekrachtsgolven registreren en na de eerste meting, in 2015, heeft het grote publiek zijn verwondering alweer wat verloren. Voor astronomen en fysici is dat anders. Zij keken al jaren reikhalzend uit naar dit moment.

De nieuwe zwaartekrachtsgolf, GW170817, is namelijk veroorzaakt door twee botsende neutronensterren, terwijl eerdere zwaartekrachtsgolfmetingen allemaal van samensmeltende zwarte gaten kwamen. En waar zwarte gaten geen licht uitzenden, ook niet als ze versmelten, is dat voor neutronensterren anders. Daar geeft de botsing een immense lichtflits.

Dat betekent dat nu voor het eerst een botsing met zwaartekrachtsgolven is gemeten die óók in het elektromagnetisch spectrum oplicht. We kunnen deze straling zien. En dat doen we volop. Zeventig observatoria, verspreid over de wereld én in de ruimte, meten het elektromagnetisch signaal van de botsing. Nikhef-directeur Stan Bentvelsen noemde het in een persbericht 'het event van de eeuw'.

De meting van de botsende neutronensterren was een mijlpaal voor de multimessenger-astronomie – het vakgebied dat, simpel gezegd, ons leert onze zintuigen te combineren, van telescopen tot deeltjesdetectoren.

Voorheen registreerden we gebeurtenissen in het heelal op een beperkt aantal manieren. Astronomen namen een sterexplosie bijvoorbeeld waar met zichtbaar

licht en radiostraling. Ze konden de knal dus 'zien' en 'horen'. Langzaam leerden we een nieuw zintuig te gebruiken: de eerste detectie van zwaartekrachtsgolven in 2015 (waarbij Nikhef ook volop betrokken was) betekende dat we de kosmos nu voor het eerst ook konden 'voelen'.

Inmiddels staan al onze zintuigen op scherp. Met een grote diversiteit aan detectoren ontvangen we een signalenmix die reikt van radio- tot gammastraling, en van zwaartekrachtsgolven tot neutrino's. Door alle informatie te combineren, kunnen wetenschappers kosmische gebeurtenissen beter dan ooit in kaart brengen. 'Multimessenger-astronomie verandert het vakgebied op twee manieren', zegt Gijs Nelemans, hoofd van de sterrenkundeafdeling van de Radboud Universiteit in Nijmegen en verbonden aan



Nikhef. ‘De eerste manier spreekt voor zich: meer informatie is beter. Soms bekijken we met behulp van twee verschillende signalen hetzelfde verschijnsel. Een voorbeeld is radiostraling en röntgenstraling. Beide vertellen ons wat de verdeling is van supersnelle elektronen in de buurt van een zwart gat. Als je de informatie van radio- en röntgensignalen combineert, heb je dus twee zienswijzen waarmee je één en hetzelfde fenomeen kunt bestuderen.’

‘Het komt ook voor dat verschillende signalen elkaar aanvullen omdat ze juist verschillende onderdelen van één complexe gebeurtenis laten zien. Neem botsende zwarte gaten. Als we daar met zwaartekrachtsgolven naar kijken, leren we de massa's van de gaten kennen en de manier waarop ze draaien. Maar je leert weinig over de afstand of positie. Die aspecten kunnen we juist weer met behulp van elektromagnetische straling meten. Zo zorgen verschillende typen signalen voor een compleet plaatje.’

En de tweede manier waarop multimessenger-astronomie het veld verandert? ‘Die ligt misschien wat minder voor de hand, maar het is minstens zo belangrijk’, zegt Nelemans.

‘Het gaat om *alerts*. Wanneer we in één signaal iets opvallends zien, sturen we tegenwoordig een *alert* naar andere observatoria. Die kunnen hun meetapparatuur dan op hetzelfde plekje aan de hemel richten om te kijken of ze óók iets zien. We attenderen elkaar op interessante gebeurtenissen in het heelal.’

Die *alerts* vormen een gigantisch voordeel, met name omdat de hemel simpelweg te groot is om alles constant in de gaten te houden, zegt Nelemans. ‘Met detectoren voor zwaartekrachtsgolven en neutrino's kun je bijna de hele hemel in de gaten houden; optische telescopen kunnen dat niet. Dat betekent dat we elke

dag spannende kosmische gebeurtenissen missen omdat we naar de verkeerde plek kijken. Dankzij *alerts* hoeven we de mooiste events nu niet langer mis te lopen.’

### Blazar gespot

*Alerts* bewezen hun nut op 22 september 2017 toen de IceCube-detector op Antarctica plots opvallend veel neutrino's registreerde. IceCube zond een *alert* naar allerlei telescopen, in de hoop dat zij, via andere signalen, de bron van de neutrino's konden achterhalen. Al snel volgde een *match*. Zowel de Fermi-ruimtetelescoop als de MAGIC-telescoop op La Palma vonden op dezelfde locatie in de hemel een opvallende piek in gammastraling. Die straling was afkomstig van TXS 0506+056: een zwart gat, een *blazar*, waar twee enorme bundels geladen materie uit knallen. Deze detectie was opnieuw een mijlpaal voor de multimessenger-astronomie: het was de eerste keer dat een object met zowel neutrino's als gammastraling werd bekeken.

Een *alert* kan ook zinvol zijn om gericht op zoek te gaan naar iets interessants in een grote berg data, zegt Nelemans. ‘Neutrino's meet je altijd, want een groot deel van de neutrino's is afkomstig uit de atmosfeer. Neutrinodetectoren vinden dus een constant achtergrondsignaal waarin slechts soms een klein piekje te zien is van neutrino's uit het heelal. Het kan lastig zijn om in een grote hoeveelheid meetgegevens de echt interessante gebeurtenissen te vinden. Maar als je een *alert* ontvangt, dan kun je plots nauwkeurig zoeken. Dat maakt de analyse een stuk effectiever.’

Astronomen van de Radboud Universiteit bouwen om die reden in Chili de BlackGEM telescopen die speuren naar licht van botsende neutronensterren op *alerts* van de LIGO-Virgo-zwaartekrachtsgolfdetectoren.



Foto: Mats van Soelingen

Gijs Nelemans

‘We attenderen elkaar op interessante gebeurtenissen in het heelal’

### Sterbotsing in alle kanalen

Op 17 augustus 2017 wordt de samensmelting van neutronensterren gemeten door legio detectoren. Eerst is er de zwaartekrachtsgolvendetectie door LIGO en Virgo <sup>1</sup>. Nikhef leverde hiervoor belangrijke bijdragen in de vorm van zowel instrumentatie als data-analyse. 1,7 seconden later gaan bij NASA's Fermi-ruimtetelescoop en bij ESA's ruimtetelescoop INTEGRAL <sup>2</sup> de lampen branden: het event verschijnt daar als een heldere gammaflits. Elf uur later komt het optisch signaal binnen bij verschillende observatoria in Chili <sup>3</sup> en bij de Hubble ruimtetelescoop. Het signaal verschijnt ook als radiostraling, ultraviolet licht en röntgenstraling, onder andere bij röntgentelescoop Chandra.



Foto: Virgo



Foto: ESA

### Combideal

Het GW170817-signaal combineerde zwaartekrachtsgolven met elektromagnetische straling. Het TXS 0506+056-signaal combineerde elektromagnetische straling met neutrino's. Het is verleidelijk om aan te nemen dat multimessenger-onderzoekers nu vol ongeduld zitten te wachten op het eerste event dat in alle signalen zichtbaar is: als zwaartekrachtsgolf, als elektromagnetische straling, als kosmische straling en als neutrinopiek. Toch is dat niet zo, zegt Nelemans. ‘Natuurlijk zou het kunnen gebeuren dat we bij één object nog meer signalen kunnen combineren, maar vooralsnog zijn we daar niet per se naar op zoek. Momenteel willen we vooral herhalen wat we al gedaan hebben. We willen bijvoorbeeld nogmaals een botsing van neutronensterren bekijken en dan nagaan of de signalen – zowel de zwaartekrachtsgolven als de elektromagnetische straling – er hetzelfde uitzien als bij de vorige detectie. Op die manier kunnen we veel leren over de fysische processen erachter.’

‘Het combineren van twee signalen was al een enorme stap’, benadrukt Nelemans. ‘En met de events die we nu gemeten hebben, zijn we nog lang niet klaar. Er is zo'n rijkdom aan meetgegevens dat we er nog jaren werk aan zullen hebben.’

### Samenwerken

Dat het combineren van de verschillende signalen mooie wetenschap oplevert, dat moge duidelijk zijn. Maar het is niet altijd gemakkelijk tot een samenwerking te komen, geeft Nelemans toe. Sterker nog, het is een flinke uitdaging om binnen de multimessenger-astronomie alle neuzen dezelfde kant op te krijgen.

‘Bij multimessenger-astronomie moeten deeltjesfysici, astrodeeltjesfysici en astronomen intensief samenwerken. Dat zijn we niet gewend, en dus is het zoeken en aftasten. Dat is logisch.

Elk vakgebied kent haar eigen gewoontes. Zo zijn deeltjes- en astrodeeltjesfysici gewend om in grote samenwerkingsverbanden te werken, bij CERN in Genève, neutrinodetector KM3NeT in de Middellandse Zee of de Amerikaans-Europese LIGO-Virgo samenwerking. Sterrenkundigen hebben daarentegen juist kleine teams waar veel competitie tussen bestaat. Dat heeft ook effect op de manier waarop je omgaat met data. Maak je je data openbaar of juist niet? De deeltjesfysica deelt de data traditioneel niet, omdat daar de samenwerkingsverbanden zo groot zijn dat experts van verschillende teams elkaars werk kunnen controleren. Dat zie je bijvoorbeeld bij CERN. In de sterrenkunde, waar kleine teams gebruikelijk zijn, wordt juist bijna alle data vrijgegeven. Er is zelden een dataset die slechts voor één team beschikbaar blijft.’

‘Het één is niet beter dan het ander’, zegt Nelemans. ‘Deze tradities zijn ontstaan met een reden. Maar het zijn wel verschillende manieren van werken, en wanneer mensen uit verschillende vakgebieden de handen ineenslaan, levert dat onvermijdelijk wrijving op. Verwachtingen verschillen. Manieren van communiceren verschillen. En dat is knap lastig.’

Dan is er ook nog eens de kwestie van financiering. Nelemans: ‘In veel landen, waaronder Nederland, is er veelal een sterke scheiding tussen financieringsbronnen voor verschillende vakgebieden. Bij het aanvragen van onderzoeksgeld moet je dus kiezen voor fysica óf astronomie terwijl het werk op het grensvlak gebeurt.’

Ondanks deze uitdagingen is Nelemans positief over de toekomst. ‘De samenwerkingsverbanden binnen de multimessenger-astronomie zijn nog jong en ik zie veel positieve ontwikkelingen. Er is steeds meer overleg en we weten

### Nikhef en multimessenger-astronomie

Nikhef is volop betrokken bij verschillende meetinstrumenten. Zo is er Virgo, de detector in Italië die zwaartekrachtsgolven detecteert. Nikhef levert detectoronderdelen en werkt mee aan de data-analyse. Jo van den Brand van Nikhef is er woordvoerder. Nikhef is ook één van de initiatiefnemers voor een nog gevoeliger detector voor zwaartekrachtsgolven, Einstein Telescope, die mogelijk ooit in Zuid-Limburg wordt gerealiseerd. Ook is er KM3NeT, een enorme detector op de bodem van de Middellandse Zee, die speurt naar kosmische neutrino's. De glazen bollen die deze deeltjes detecteren, worden onder meer bij Nikhef in elkaar gezet. Nikhef neemt ook deel in het Pierre Auger-observatorium in Argentinië, het grootste kosmische stralingsexperiment ter wereld. Nikhef gaat daaraan in de komende jaren een 3000 km² radiodetectielaag toevoegen.

elkaar steeds beter te vinden. Bovendien groeit nu ook het besef dat een brede steun een voorwaarde is voor het succes van multimessenger-astronomie. Kijk, Nikhef's zwaartekrachtsgolvenexpert Jo van den Brand en ik, als astronoom, kunnen enorm op één lijn zitten, maar om echt succesvol te zijn moeten we aansluiting vinden binnen de Nederlandse onderzoeksschool voor astronomie NOVA en Nikhef. Het gaat niet alleen om de astronomen die geïnteresseerd zijn in deeltjesfysica, en deeltjesfysici die geïnteresseerd zijn in astronomie. Het mooie is dat verschillende vakgebieden elkaar in de multimessenger-astronomie vinden’, zegt Nelemans met enige trots. ‘Daar zit de kracht van dit jonge veld.’ ◀



Foto: ESO



# Meer xenon onder de berg

Diep onder de Apennijnen wordt druk gebouwd aan de gevoeligste detector voor donkere materie ter wereld: XENONnT.

Gran Sasso. De Grote Steen heet de berg waarin Nikhef-onderzoekers Auke-Pieter Colijn en Patrick Decowski hun bezoek door lange tunnels naar hun wetenschappelijke experiment leiden. Een besneeuwd blok graniet van 2912 meter hoog dat de hoogste piek vormt van de Apennijnen tussen Rome en de Adriatische kust.

Van die reuzenberg hangt hier in het ondergrondse laboratorium zo'n anderhalve kilometer gesteente boven onze gehelmde hoofden, als een prachtige

natuurlijke afscherming tegen veel kosmische straling. Het lab is alleen bereikbaar via een afslag in de snelwegtunnel dwars door de bergen, bewaakt door gewapende carabinieri.

LNGS, het Laboratori Nazionali del Gran Sasso, is je reinste James Bond. Stalen branddeuren, TL-buizen die knipperen, water drupt langs wanden, kabelgoten en ventilatiepijpen volgen het tunnelplafond. Links en rechts andere internationale experimenten die geduldig wachten op zeldzame deeltjes.

## Edelgas

In zaal-B van het ondergrondse laboratorium wordt sinds december hard gewerkt aan een verdere upgrade van het XENON-experiment, dat speurt naar donkere materie. Het experiment gebruikte al jaren een flink volume van het uiterst kostbare edelgas xenon, drie ton in totaal, waar de donkere materie in theorie nu en dan een atoom van kan raken. De komende maanden moet dat acht ton xenon worden. Dat betekent een groter opslagvat, betere pompen en reiniging van het gebruikte edelgas, nieuwe elektronica voor de dataverwerking.

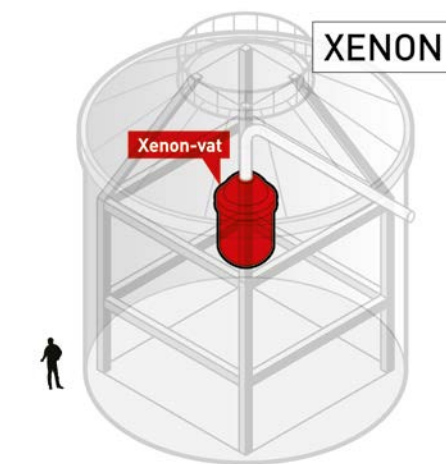
Een hoop werk, zegt Colijn, die als technisch coördinator voor het project vrijwel wekelijks voor Nikhef van Amsterdam via Rome naar Gran Sasso pendelt. Persoonlijk dichtbij zijn is essentieel, zegt hij. 'Je moet technici en collega's ontmoeten, met ze praten, koffie drinken, lunchen. Heel Italiaans. Maar op afstand werkt zoiets niet.' In het naburige berg-hotel hangt op zijn favoriete kamer een eigen naambordje, grapt Colijn, die inmiddels al redelijk Italiaans spreekt.

Momenteel zijn grootste zorg: de aanleg van de luchtsluis rond de toegang tot de detector, bedoeld om stof weg te houden uit het systeem. Het golfplaten bouwwerk vordert, maar de betrokken technici zijn ook parttime sneeuw-schuivers voor de straten in de regio L'Aquila waar het lab zijn basis heeft en nu stagneert het werk. Dus moet er in het besneeuwde hoofdkwartier overlegd worden met de baas van de sneeuwploeg. Ook als de Italiaanse collega's hem verzekeren dat zoiets al goed komt.

Het XENON-experiment heeft een plek ergens diep in het ondergrondse lab. Zaal-B blijkt een langgerekte halfronde hal zo groot als een kathedraal, met een glad afgewerkt plafond. Een binnengereden bestelbus oogt in het overwelldigende decor als een speelgoedauto, geparkeerd naast de enorme stalen watertank met daarbinnen de echte detectoropstelling. Ernaast staat onder het hoge dak een glazen gebouw van drie verdiepingen, dat de controlekamer en xenon-zuivering herbergt.

## Lichtflits

Op de watertank hangt een huizenhoog banier met een grafische afbeelding van het binnenwerk en de naam van het in december afgeronde XENON1T-experiment. In de watertank hangt een stalen isolatievat waarin het diepgekoelde vloeibare xenon zit.



## XENON-detector

Het XENON-experiment is gebouwd om zogeheten WIMPs op te vangen, zware donkere-materiedeeltjes zonder veel interactie met gewone materie. Het bestaan van WIMPs is nog niet aangetoond. Als ze bestaan, geven WIMPs bij een botsing met een xenonatoom een lichtflits en een elektrisch signaal. XENON bestaat uit een vat vloeibaar xenon, omgeven door een 10 meter hoge watertank. Bij de huidige upgrade onder supervisie van Nikhef wordt het xenon-vat vergroot van 3 naar 8 ton. Ook wordt de xenon-zuivering verbeterd en de elektronica vervangen.

Nu is het werkzame volume een ton, zegt Decowski, maar dit najaar moet dat een veelvoud zijn.

Het xenonvolume is omringd door 254 lichtgevoelige fotobuizen. Die moeten lichtflitsjes oppikken die als het goed is ontstaan als een donkere-materiedeeltje uit de ruimte op een xenonatoom botst. In het vat heerst bovendien een hoogspanning, die elektronen die bij een botsing vrijkomen wegtrekt, waardoor een tweede lichtflits ontstaat. De combinatie van twee lichtflitsen is voor de onderzoekers een aanwijzing dat er iets bijzonders kan zijn gebeurd in het meetvolume.

## Witte pakken

Een experiment als XENON is een kwestie van precies meten en heel veel geduld. De opstelling staat onder de berg om zoveel mogelijk achtergrondstraling uit de kosmos uit te sluiten. De kunst is zo goed mogelijk voor die straling te corrigeren, bijvoorbeeld met lichtdetectoren in het watervat zelf, die binnenkomende muonen moeten verraden.

XENON, zegt Decowski, slaagt daarin als geen ander. Maar tot nog toe is er met de supergevoelige detector nog geen enkel donkere-materiedeeltje gezien. Vandaar de behoefte aan meer meetvolume.

In december werden de metingen met XENON1T afgerond en werd de grote watertank leeggetapt. Aanvankelijk was onduidelijk hoe de tank er aan toe zou zijn. Jaren geleden bleek bij reparaties aan de installaties dat ijzelvijsel roest gaf in de watertank. Ditmaal, blijkt in het voorjaar, is daarvan geen sprake. Maar voor de zekerheid is er nu de luchtsluis, die stof en vuil buiten houdt als de technici in witte pakken naar binnen gaan.

Binnen moet de cryostaat uit zijn juk worden getakeld en uit de watertank gehaald. Het vat zal door een industriële partner worden opgezaagd, waarna er een extra ring tussen wordt geplaatst voor

voldoende volume. De ophanging van het manshoge vat en de buis waarin alle aansluitingen aan de bovenkant zitten, zijn ontworpen door Nikhef. Ook daaraan moet voor de upgrade opnieuw van alles gebeuren. Nu en dan zullen studenten en promovendi uit Nederland komen om mee te sleutelen. Tegen het eind van 2019 moet XENONnT een feit zijn, klaar om in een ruk vijf jaar door te meten. Het grotere volume maakt het experiment twintig keer gevoeliger dan zijn voorganger, zegt Decowski. 'Als we dan nog geen donkere-materiedeeltjes vinden moeten we ons achter de oren gaan krabben.'

De Amsterdamse fysicus loopt een etage boven de nu verlaten controlekamer glimlachend rond tussen de rekken met elektronica en xenon-installaties. Een experiment als XENON, zegt hij, is ongeveer zijn ideaal van natuurkunde bedrijven: een niet te groot team met een eigen opstelling waarvan je de onderdelen kent en begrijpt en uiteindelijk data die je zelf kunt analyseren. 'Lekker hands-on.' Als er nou ook nog eens donkere materie zou opduiken, zou hij de gelukkigste natuurkundige op aarde zijn. ◀

## Donkere materie

Sinds de vorige eeuw is bekend dat veel sterrenstelsels veel meer massa bevatten dan de zichtbare sterren. Sindsdien is de vraag wat deze donkere materie zou kunnen zijn. Het vermoeden is dat het gaat om nog onbekende deeltjes, die geen licht uitzenden maar wel massa hebben. In experimenten als XENON wordt gezocht naar zeldzame botsingen van zulke deeltjes met gewone materie. Tot nog toe zonder dat er een donkere-materiedeeltje is gevonden.



### Japan aarzelt over INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER

De Japanse regering heeft nog geen uitsluitsel gegeven over de plannen voor een nieuwe internationale deeltjesversneller in het land. Op een persconferentie begin maart in Tokio zei voorzitter Geoffrey Taylor van de internationale commissie voor toekomstige versnellers ICFA teleurgesteld te zijn, maar niettemin hoop te houden op een ILC-versneller in Japan. De International Linear Collider is bedoeld om de eigenschappen van het higgsdeeltje met grote precisie te onderzoeken. De ILC laat volgens de technische plannen elektronen en positronen op elkaar botsen vanuit twee lineaire versnellers van elk 15 kilometer lang. 'Deze higgs-fabriek is de logische volgende stap in het deeltjesonderzoek', zei Taylor. Hij zei ook dat de VS en Europa bereid zijn met Japan te onderhandelen over de verdeling van de kosten voor het project. Als Japan afziet van het project, zou de versneller ook in Europa of de VS gebouwd kunnen worden.

### 30 jaar WORLD WIDE WEB

Op 12 maart vierde het World Wide Web zijn dertigste verjaardag, met webcasts en blogs vanaf CERN en andere deeltjeslabs. In 1989 stuurde informaticus Tim Berners-Lee op CERN een memorandum aan zijn chef waarin hij schetste hoe computers van verschillende afdelingen en instellingen via internet met elkaar verbonden konden worden via een nieuw protocol. Daardoor konden de aangesloten partijen via het aanklikken van hyperlinks elkaars bestanden raadplegen zonder steeds de toegang te organiseren. Berners-Lee's chef vond het plan 'vaag, maar opwindend', en de rest is geschiedenis. In 1992 waren de eerste drie websites een feit, waaronder de eerste van Nederland op Nikhef. 'Het leek me wel een handig systeem', zei toenmalig ict-specialist Willem van Leeuwen van Nikhef later over het web.

### App brengt oerknal ONDER HANDBEREIK

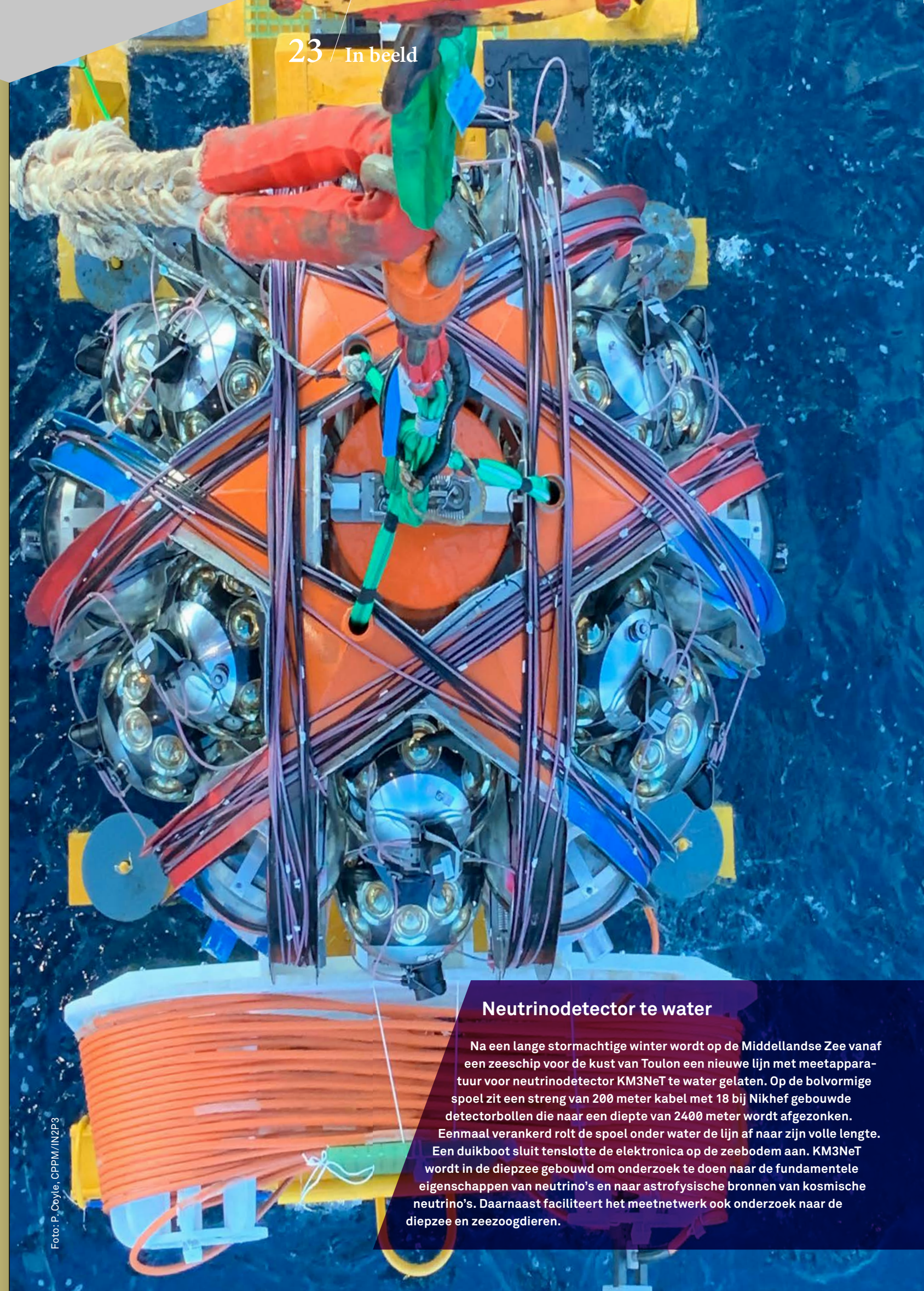
Oscar-winnende actrice Tilda Swinton doet de voice-over in een nieuwe educatieve app van CERN die met *augmented reality* de oerknal letterlijk onder handbereik brengt, de BigBangAR app. Ze begeleidt de kijker in zeven minuten van een ziedende quarkgluon-soep via de vorming van protonen en neutronen, de evolutie van atomen en moleculen, en de geboorte van sterren en planeten, naar het universum van vandaag. Wie wil, kan een selfie van zichzelf als sterrenstof aan zijn vrienden versturen.

### Ideeën uitgewerkt voor FUTURE CIRCULAR COLLIDER

Half januari verschenen bij CERN de uitgewerkte ideeën voor een nieuwe cirkelvormige deeltjesversneller van 100 kilometer omtrek in de regio Genève. Deze Future Circular Collider (FCC) is een van de mogelijke opvolgers van de LHC-versneller van 27 kilometer op CERN. De ondergrondse tunnel voor de FCC zou deels onder het Meer van Genève door tot ver in Frankrijk reiken. In de machine kunnen deeltjesbundels op elkaar worden geschoten met tot bijna tienmaal zoveel energie als met de huidige LHC-versneller. Daarmee kan het higgsdeeltje beter worden bestudeerd, en kan men zoeken naar nieuwe onbekende deeltjes. Voor de bundels in de FCC zijn nieuwe geavanceerde supergeleidende magneten nodig. Op vier plaatsen in de ring komen ruimtes voor grote detectoren. Het FCC-document is bedoeld als bijdrage aan de Europese strategiediscussies van de komende twee jaar over de toekomst van het Europese deeltjesonderzoek. In 2020 zullen de conclusies daarvan bekend worden. Een besluit over een eventuele nieuwe versneller volgt pas later.

### Boren voor EINSTEIN TELESCOPE

In de wintermaanden heeft bij het plaatsje Terziet in Zuid-Limburg een boring plaatsgevonden voor een seismisch meetpunt voor het internationale Einstein Telescope-project. Nederland, België en Duitsland overwegen een voorstel voor de bouw van een internationale detector voor zwaarte krachtsgolven in de grensregio. In de boorschacht wordt volgens de plannen op ruim 250 meter diepte een gevoelige trillingsmeter geplaatst. Daarmee zal worden nagegaan in hoeverre de Limburgse ondergrond in de grensregio voldoende rustig is om er de extreem gevoelige Einstein Telescope (ET) in te bouwen. ET is volgens de ontwerpen geplaatst in een driehoekig tunnelstelsel met zijden van tien kilometer. Daarin doen lasers afstandsmetingen die zo precies zijn dat ze trillingen van de ruimtetijd verraden. Die ontstaan volgens Einsteins Relativiteitstheorie uit 1916 als zwarte gaten of neutronensterren in het heelal met elkaar botsen. Einstein Telescope kan trillingen opvangen uit vrijwel het hele heelal. Belgische, Duitse en Nederlandse universiteiten, overheden en bedrijven hebben belangstelling voor het project in de Euregio.



### Neutrinodetector te water

Na een lange stormachtige winter wordt op de Middellandse Zee vanaf een zeeschip voor de kust van Toulon een nieuwe lijn met meetapparatuur voor neutrinodetector KM3NeT te water gelaten. Op de bolvormige spoel zit een streng van 200 meter kabel met 18 bij Nikhef gebouwde detectorbollen die naar een diepte van 2400 meter wordt afgezonken. Eenmaal verankerd rolt de spoel onder water de lijn af naar zijn volle lengte. Een duikboot sluit tenslotte de elektronica op de zeebodem aan. KM3NeT wordt in de diepzee gebouwd om onderzoek te doen naar de fundamentele eigenschappen van neutrino's en naar astrofysische bronnen van kosmische neutrino's. Daarnaast faciliteert het meetnetwerk ook onderzoek naar de diepzee en zeezoogdieren.





Interview

# *De droom van Sarah Caudill*

## Waggelende zwarte gaten vinden

'We kunnen sinds 2015 met onze detectoren de trillingen van de ruimtetijd opvangen van botsende zwarte gaten of neutronensterren in het heelal. Dat dat lukt is een wonder. Zwaartekrachtsgolven hebben een minimale invloed op aarde, ze geven trillingen kleiner dan een atoomdiameter. Zo'n klein signaal gaat gemakkelijk verloren in alle ruis en trillingen uit de omgeving van detectoren als LIGO en Virgo. De manier waarop je toch het gezochte signaal kunt vinden, is door je metingen voortdurend te vergelijken met een bekend patroon, een sjabloon. Zo'n sjabloon vertelt je of er een trillingspatroon is dat hoort bij versmeltende zwarte gaten, of neutronensterren. Op die manier hebben we ondanks alle ruis inmiddels elf zwaartekrachtsgolven gedetecteerd, een hele catalogus dus. Prachtig. Maar dat zijn natuurlijk allemaal signalen die precies passen bij de sjablonen die we toepassen. En die zijn allemaal berekend uit relatief eenvoudige situaties van twee zwarte gaten die precies in dezelfde richting om hun as draaien. Voor waggelende zwarte gaten hebben we geen sjablonen, en die herkennen we dus gewoon niet in de metingen. Terwijl ze er vast ook zijn. Ik heb een VIDI-beurs bij NWO aangevraagd om de bibliotheek met sjablonen uit te breiden naar waggelende zwarte gaten. Dan heb je het als je niet uitkijkt meteen over miljoenen sjablonen in plaats van tientallen. Dus zoiets moet je slim doen, eventueel met kunstmatige intelligentie. Mijn droom is uiteindelijk echt te zien hoe waggelende zwarte gaten samensmelten. Niet alleen omdat je dan veel meer botsingen gaat zien in het universum. Het golfsignaal van zulke botsingen geeft bovendien een heel strenge test voor Einsteins Algemene Relativiteitstheorie. Die kan er namelijk best naast zitten. En Einstein corrigeren zou natuurlijk totaal cool zijn.'