

Najaar  
2021

Nikhef

Nationaal  
instituut voor  
subatomaire fysica

# DIM ENS IES

## DETECTOR R&D

Werken aan nog  
scherpere zintuigen  
voor de deeltjesfysica

## ALUMNI

Zeven levens na Nikhef:  
van chipresearch  
tot het Rode Kruis



# Renovatie Nikhef van start



Op 31 mei 2021 ging de lang voorbereide renovatie van het Nikhef-gebouw in Amsterdam officieel van start. Het is een hele operatie die naar verwachting twee jaar duurt. In 2023 moet al het werk afgerond zijn, met als eindresultaat een mooi en toekomstbestendig gebouw dat qua installaties, uitstraling en functionaliteit weer recht doet aan het baanbrekende onderzoek dat er plaatsvindt.

De renovatie is een hele logistieke uitdaging. Het gebouw blijft namelijk tijdens de renovatie in gebruik. De verschillende gebouwdelen worden daarom in verschillende fases aangepakt. Als eerste was de afdeling Mechanische Technologie aan de beurt. De verbouwing daarvan gebeurt in zo kort mogelijke tijd zodat de machines in de werkplaatsen niet te lang stil staan. In het najaar moet alles weer volop in bedrijf zijn. Als tweede fase is in september een begin gemaakt met de uitbreiding van het data-

center. Daarna worden de bestaande gebouwdelen 'N' en 'H' gerenoveerd, komt er een gloednieuw ontmoetingshart waar nu de binnentuin is, en een nieuwe entree aan de andere kant van het gebouw.

Een deel van de Nikhef-medewerkers heeft tijdens de werkzaamheden elders op Amsterdam Science Park tijdelijke huisvesting gekregen, en het onderzoek gaat gewoon door. Ondertussen wordt met spanning afgewacht, en van een veilige afstand bekeken, hoe de mooie tekeningen van de architect stap voor stap realiteit worden.

Foto's: Marco Kraan



## Werken aan verrassingen

In 1936 werd het muon ontdekt, toen een nieuw elementair deeltje dat niemand had verwacht of zien aankomen. Een zwaar broertje van het bekende elektron. 'Who ordered that?', merkte Nobelprijswinnaar Rabi op toen hij dit nieuws hoorde. Wie heeft dit besteld?

Tegenwoordig maakt het muon keurig deel uit van het Standaardmodel. Een vanzelfsprekende bouwsteen van het universum. Maar is dat echt zo? Recente metingen bij de LHCb-detector in Genève suggereren dat het muon mogelijk toch meer te vertellen heeft dan we lang hebben gedacht. Over een nieuwe, extra natuurkracht misschien wel.

Een opwindend verhaal dat niemand beter kan vertellen dan LHCb-programmaleider Marcel Merk. Zijn enthousiasme en passie voor het ontrafelen van de interne structuur van het Standaardmodel zijn aanstekelijk, zoals in dit nummer van DIMENSIES blijkt.

Verrassingen brengen ons als onderzoekers wel vaker op nieuwe ideeën en theorieën. En het is belangrijk om er voor open te blijven staan, en te blijven zoeken naar het onbekende. Dat is ook precies wat we doen in onze verschillende onderzoeksprogramma's. En met resultaat: Het onderzoek van botsende zwarte gaten en neutronensterren met detectoren als Virgo in Italië, geeft bijna iedere week nieuwe fysische inzichten. In de Middellandse Zee begint de KM3NeT-detector de eerste spookdeeltjes te zien. In Italië wacht de verbeterde XENON-detector de jacht op tekenen van donkere materie. En in Groningen nemen onderzoekers zelfs het elektron toch nog eens de maat.

Ondertussen blijven we op Nikhef bezig met het ontwikkelen van nieuwe detectie-apparatuur. Hierin speelt de afdeling Detector R&D een cruciale rol. In dit magazine een portret van de groep die de experimenten voorziet van de allerbeste zintuigen. Van meetsystemen voor zwaartekrachtsgolven tot de diverse detectoren in de versneller op CERN.

De laatste anderhalf jaar waren de gevolgen van de coronacrisis ook in de wetenschap aanzienlijk. Het was een moeilijke tijd. Dat we daarin toch boeiende resultaten boekten en bleven speuren naar verrassingen, tekent de kracht van nieuwsgierige onderzoekers. Die, zo lezen we elders in dit nummer, ook buiten de deeltjeswetenschap meer dan welkom zijn.

**Stan Bentvelsen, directeur Nikhef**

### Over Nikhef

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

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

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

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

### DIMENSIES najaar 2021

#### REDACTIE

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

#### AAN DIT NUMMER WERKTEN MEE

Roel van der Heijden (tekst), Harry Heuts (foto's), Marco Kraan (foto's), Bas Uterwijk (foto's), Maureen Voestermans (tekst)

#### ONTWERP EN VORMGEVING

Enchilada (ontwerp), Naïm Niebuur studio (vormgeving)

#### OP DE COVER

Nikhef-onderzoeker Jory Sonneveld, masterstudent Christina Tsolanta, en PhD-studenten Robbert Geertsema en Kevin Heijhoff werken aan sensoren en chips in het Detector R&D-lab in Amsterdam.

Foto: Marco Kraan



# Gevoel voor detectoren

Geen wetenschap zonder waarnemingen. Nikhef ontwerpt en test de zintuigen van de deeltjesfysica: snelle en slimme sensoren.



Hoe zie je een deeltje? Eigenlijk is het heel eenvoudig, zegt groepsleider Niels van Bakel van de afdeling Detector R&D van Nikhef in Amsterdam. Deeltjes op zich kun je niet zien. Maar ze laten onderweg wel sporen achter. Die sporen vinden en vastleggen, met de modernste technieken en zo precies mogelijk, dat is de missie van de groep.

Van Bakel, zelf van huis uit deeltjesfysicus: 'Ooit gebruikten onderzoekers fotografische platen, met sporen die met de hand moesten worden opgemeten. Later werden dat gasgevulde buizen, dradenkamers en elektronica. En inmiddels zijn we in de wereld van de halfgeleiders en de computers beland. Maar nog steeds met hetzelfde doel: deeltjes 'zien'.'

In essentie ontstaan de sporen doordat deeltjes een elektrische lading dumpen in het materiaal dat ze raken. De kunst is die lading te verzamelen en in een signaaltje om te zetten. Liefst met een exacte plaats en tijd.

In het hart van detectoren zoals die op CERN, omringen de sensoren de plaats waar in de versneller protonen of andere deeltjes op elkaar botsen. Alles wat er weg spat passeert ergens op een bepaald moment en een bepaalde positie een





sensor. Alles is erop gericht om uit die mêlee van signalen sporen te reconstrueren, die te vergelijken met wat de natuurkundige theorie voorziet en daarvan te leren.

Nikhef Detector R&D is in de kern een groep van nu vijf onderzoekers in Amsterdam, ingenieurs en fysici, omringd door een aantal studenten en postdocs. De groep, zegt Van Bakel, is natuurlijk nauw verbonden met de grote deeltjes-experimenten van het instituut en levert daarbij expertise die vaak te specialistisch is voor de experimentele fysici zelf. Die concentreren zich immers het liefst op de

gegevens die uit de apparatuur komen, op zoek naar nieuwe deeltjes of nieuwe details.

Tegelijk is het R&D team wel degelijk ook een zelfstandige onderzoeksgroep. 'We bestuderen de technische mogelijkheden in sensoren en uitlees-chips nu en voor de toekomst. Tien jaar is ongeveer de termijn waarop we vooruit proberen te kijken. Wat zit er aan te komen, wat kan het en wat kunnen we er precies in onze experimenten mee? Meer detail? Sneller? Dat zijn de vragen.'

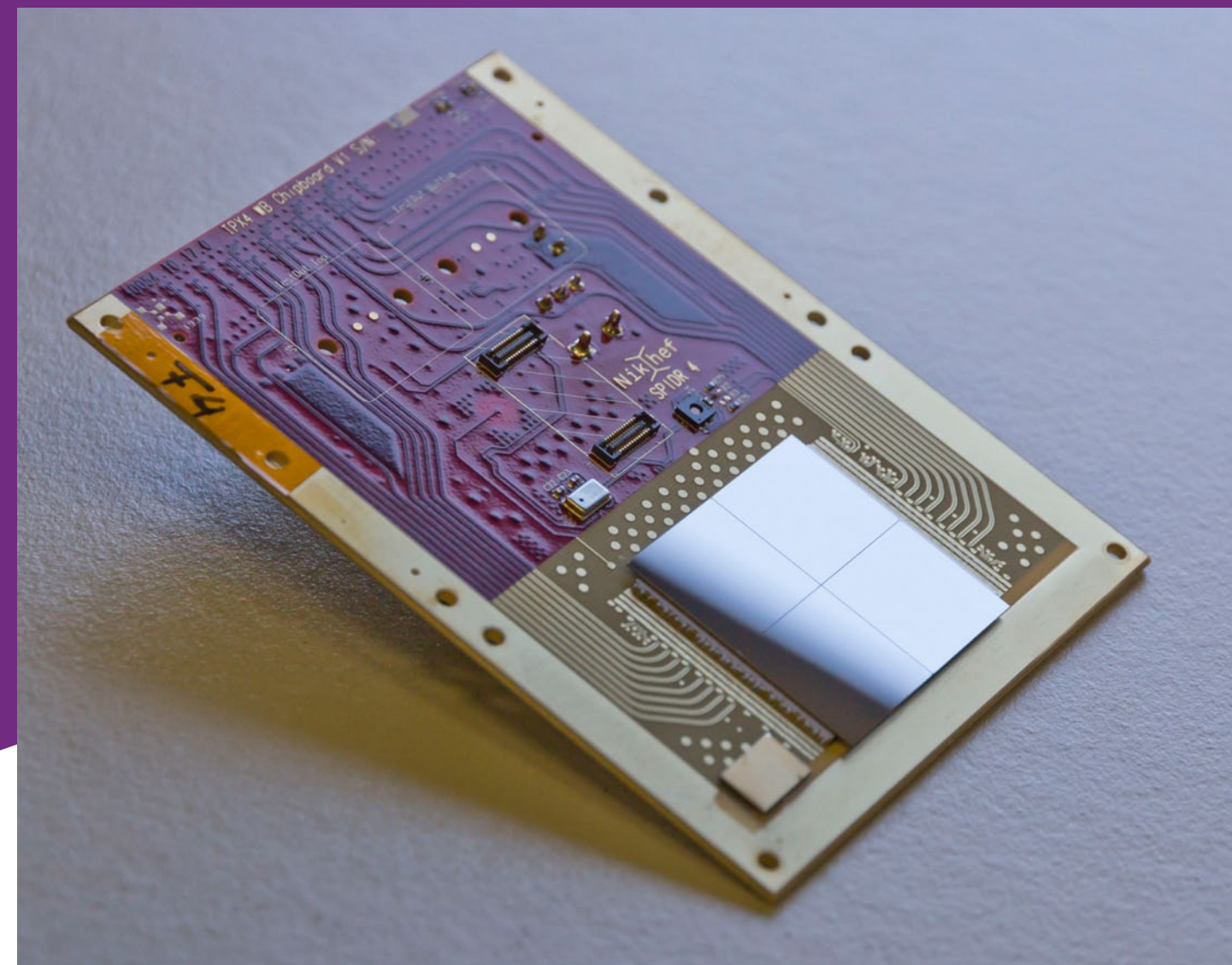
En dat zijn grote vragen, zegt Martin van Beuzekom van de R&D-groep. Hij is, van huis uit elektronicus, een van de pioniers in de zogeheten pixeldetectors, die in een internationale samenwerking worden ontwikkeld.

Een van de paradepaardjes ligt in een doosje op zijn bureau: de Timepix4-chip. Een geïntegreerd circuit zo groot als een

forse postzegel met meer dan zestigduizend afzonderlijke microscopische gevoelige punten, pixels, die aanslaan als er een deeltje doorheen is gevlogen en meten met welke energie dat is gebeurd. Bijzonder aan dit ontwerp dat vijf jaar geleden samen met CERN en de universiteit van Bonn is ontwikkeld, is de precisie van de timing. Het apparaat kan in elke pixel tot op ongeveer 200 miljoenste van een miljoenste seconde precies registreren wanneer een deeltje is langsgelkomen, en waar.

#### Voetstappen

Detectors maken afbeeldingen van deeltjesbotsingen, een beetje zoals een drone die een luchtfoto maakt van een strand vol voetstappen. Er is veel te zien, maar wat is er nou precies gebeurd? Welke stappen zijn van wie? Hoeveel wandelaars zijn er eigenlijk? Wat waren precies hun routes? Pas als de sporen zijn geïdentificeerd volgt de echte wetenschap: wat is de wandelaars onderweg overkomen? Zijn ze gestopt voor een praatje? Omgekeerd? Gebotst?



## 'Het doel is steeds beter kunnen 'kijken'.'

Niels van Bakel



In de eerste experimenten trokken deeltjes sporen, maar wanneer ze waren langsgelkomen was niet te zien. In pixeldetectors is dat anders. Een deeltje treft een pixel op een bepaald moment in de tijd. Hoe beter dat tijdstip wordt vastgelegd, des te beter is na te gaan wat er precies gebeurd is met het deeltje.

Het is het verschil tussen een foto van een strand vol voetstappen en een time-lapse opname, waarop de sporen steeds verder aangroeien. Met een voldoende nauwkeurige timing zelfs stap voor stap.

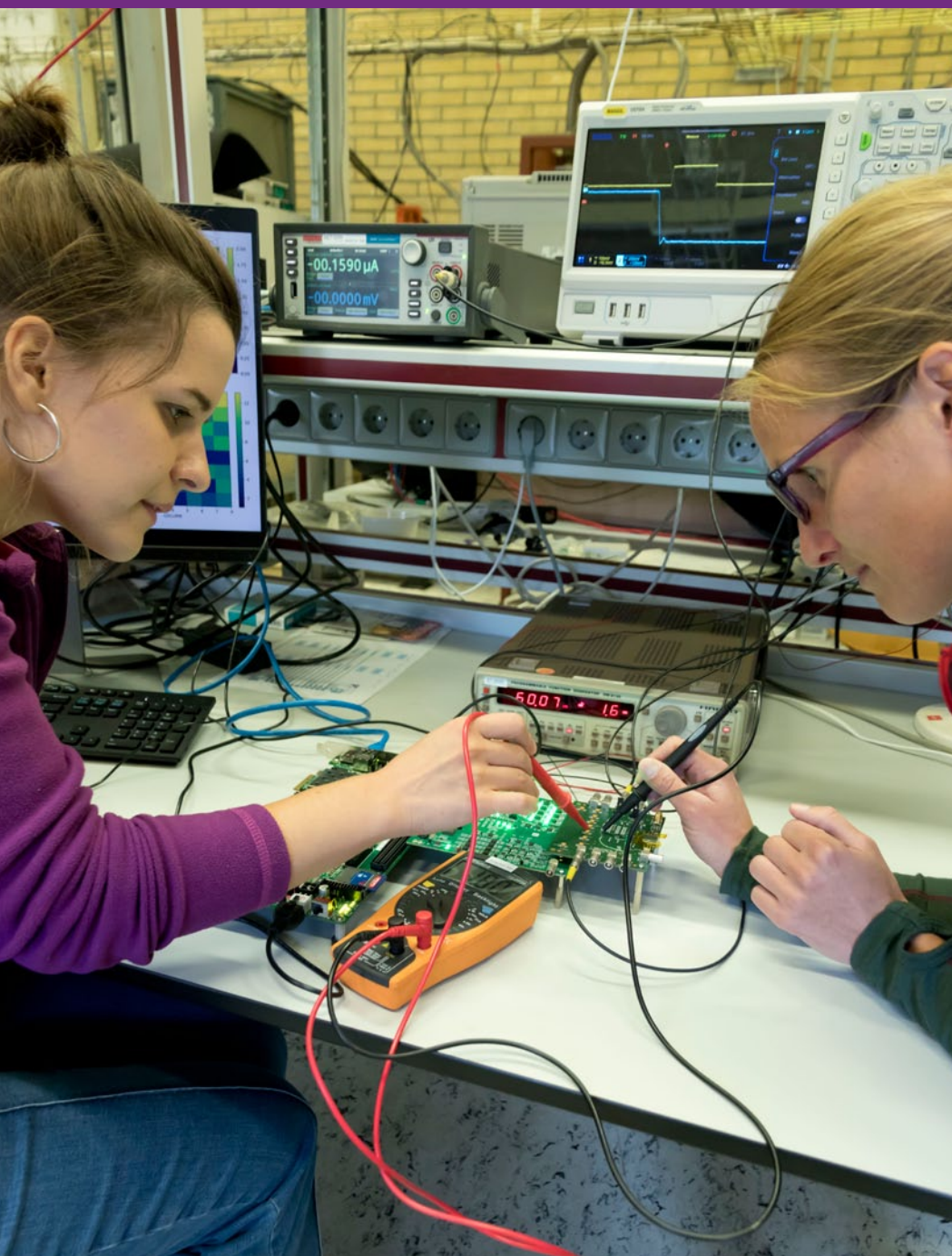
*Fast timing* is de laatste jaren de trend op detectorgebied, en het is ook voor de Nikhef-groep het sleutelwoord geworden. Ruimtelijk hoeven de pixels, nu al micrometers groot, vermoedelijk al niet veel kleiner meer. Maar de achterliggende microelektronica kan nog wel veel sneller, weten experts als Van Beuzekom en ook zijn collega Martin Fransen. 'We hebben gewone camera's en we willen naar high-speed camera's, dat is ongeveer het idee', zegt Fransen.

In een versneller als de LHC in Genève vliegen plukjes protonen met de lichtsnel-

#### Ook zwaartekrachtsgolven

Een groeiend deel van de werkzaamheden van Nikhef en dus ook de groep Detector R&D is het onderzoek naar zwaartekrachtsgolven. Nikhef is partner in het LIGO/Virgo consortium dat in 2015 de eerste ruimtetijdtrillingen ooit waarnam. De Virgo-detector in Pisa zit vol optische en mechanische techniek die mede door Nikhef is ontwikkeld. Heel andere technologie dan in de hoge-energiefysica, de wereld van de deeltjes, zegt Matteo Tacca van de R&D-groep vanuit Pisa. Maar zeker niet minder subtiel en gecompliceerd. Tacca leidde het afgelopen jaar de werkzaamheden aan de Virgo-detector, in het bijzonder voor een nieuw systeem dat via optische trucs de hinderlijke ruis in de gebruikte laserbundels nog verder onderdrukt. Nikhef werkte mee aan de optische sensoren in het nieuwe systeem. De detector komt waarschijnlijk in 2022 weer in bedrijf voor het waarnemen van zwaartekrachtsgolven uit de Melkweg, samen met LIGO in de VS en KAGRA in Japan. ►





### Spin-offs

Detector R&D beweegt zich van nature op het snijvlak van wetenschap en techniek. Dat leidt geregeld tot instrumenten die ook buiten de deeltjesnatuurkunde te gebruiken zijn. De Medipix-chip, ontwikkeld door CERN en tal van instituten, is daarvan een voorbeeld. De technieken daarin worden ook gebruikt om signalen in medische scanners op te pikken en te verwerken. Met meer precisie dan voorheen. Inmiddels werkt het bedrijf ASI (Amsterdam Scientific Instruments) op Amsterdam Science Park met de ontwikkelde sensortechnieken, voor toepassingen in röntgencamera's en elektronenmicroscopen.

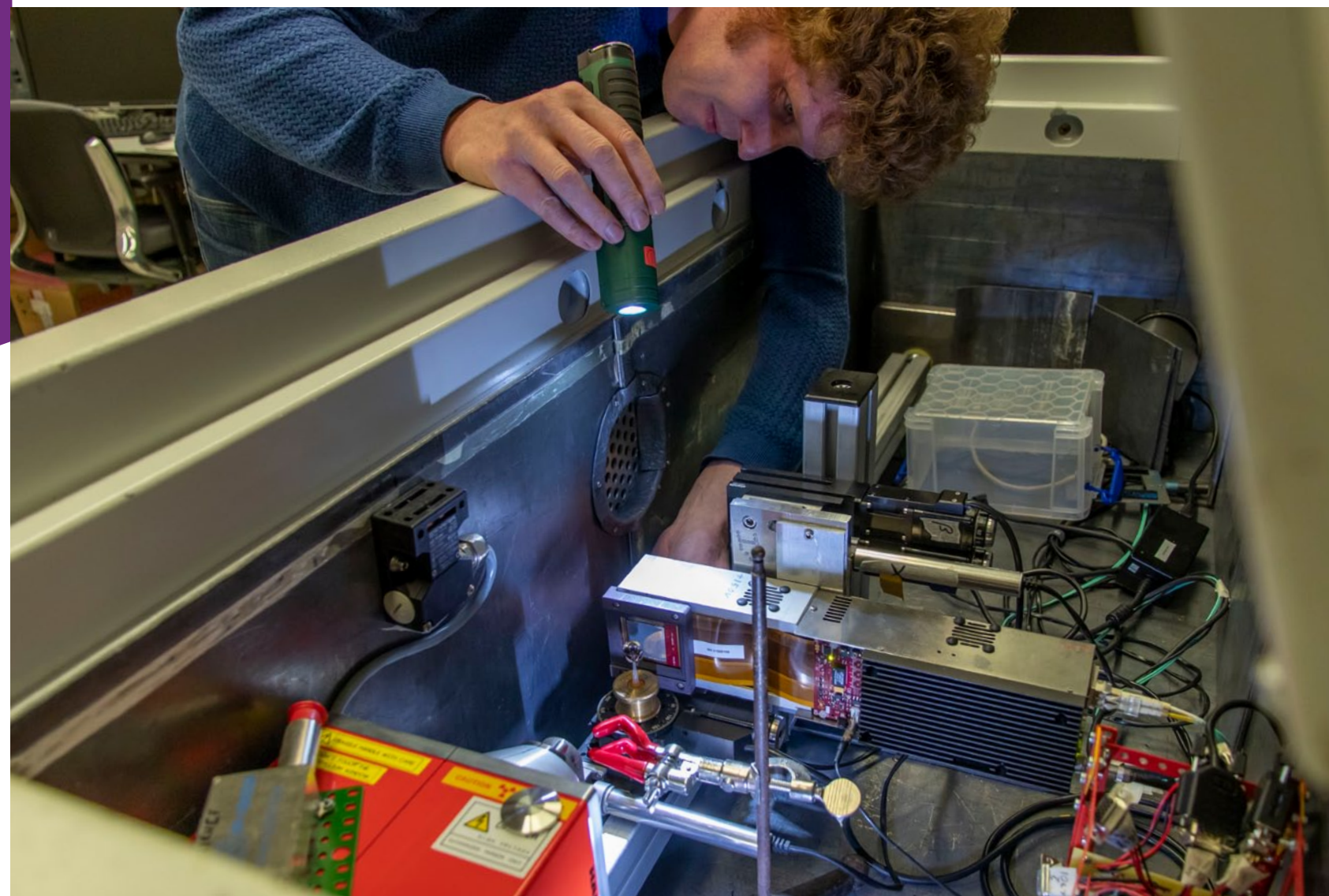
Een andere spin-off van Detector R&D is het bedrijf Innoseis op Amsterdam Science Park, dat gebruik maakt van microscopische bewegingssensoren die voor het onderzoek naar zwaartekrachtsgolven worden ontwikkeld. Inmiddels worden die her en der in industrieel seismologisch onderzoek gebruikt en bij de verkenningen voor de Einstein Telescope.

heid in pakweg 25 nanoseconde door elkaar. Een oogwenk, maar in de deeltjeswereld ook een eeuwigheid waarin er onderweg van alles kan gebeuren. Fysici willen het liefst van moment tot moment weten wát precies. Timing helpt daarbij, als een time-lapse van de voetsporen op het strand.

Het streven, weer in internationaal verband want voor een afzonderlijk lab is de technologie veel te kostbaar, is daarom een tijdsresolutie van 200 picoseconde of zelfs nog sneller voor de pixelchips. Dat is nog eens een factor tien tot twintig preciezer dan voorheen. In het Timepix-programma worden ontwerpen gemaakt en getest door de verschillende partners. 'Het is een cyclus van ontwerpen naar testen naar verbeteringen', schetst Van Beuzekom de aanpak.

De kunst van *fast timing*, zegt Van Beuzekom, is om de vrijgemaakte lading zo snel mogelijk bij de elektronica te krijgen. Tot nog toe worden de sensoren op de microelektronica geplakt. Dat is niet alleen duur en ingewikkeld om te produceren, maar betekent ook relatief veel materiaal dat vrijkomende deeltjes in de weg zit. 'Metingen worden daardoor minder gevoelig voor met name laag-energetische deeltjes', zegt Jory Sonneveld van de R&D-groep. Sonneveld werkt samen met ALICE, het experiment op CERN dat net een heel nieuw hart met silicium pixel-technologie aangemeten kreeg.

Sinds een jaar stort ze zich bij de R&D-groep helemaal op wat in het vak monolithische pixelchips worden genoemd. Daarin is de sensorlaag niet meer op de microelektronica geplakt, zoals in de Timepix-series, maar er volledig mee geïnte-



greerd. Een heel praktisch voordeel daarvan, zegt Sonneveld, is dat de processen om deze sensoren te maken dezelfde zijn als die voor de sensoren in je mobiele telefoon. Minder complex en goedkoper en dus aantrekkelijk voor grote siliciumdetectors in de experimenten op CERN.

De veel dunnere sensoren verstrooien deeltjes met weinig energie ook minder, waardoor die beter te meten zijn. Die gevoeligheid kan belangrijk zijn om nieuwe theorieën in de deeltjesfysica te testen.

### Pixelchips

Maar eerlijk is eerlijk, veel daarvan is nog theorie of in ontwikkeling. Dat is de reden dat de R&D-groep zich ook toelegt op het intensief testen en karakteriseren van pixel-chipsystemen, samen met andere instituten in de wereld. 'Ik voel me een beetje als een vertaler', zegt Sonneveld. 'Wat kan een bepaalde chip voor de experimenten betekenen, en hoe kunnen we de chips nog beter op de vragen van de experimenten toesnijden.'

Meetwerk dat hard nodig is, zegt Martin van Beuzekom. 'Je kunt van alles op papier

ontwerpen, maar uiteindelijk moet je het in de echte wereld produceren en gebruiken. Als je gaat meten merk je meteen hoezeer je op het randje werkt. Dingen werken niet perfect, er zijn altijd defecten, gedrag is toch iets anders dan je denkt. Iemand moet dat uitvlooiën en er goed mee spelen voordat je het in een echte detector bouwt, anders komen we met zijn allen nooit verder.'

En er is nóg een reden om intensief mee te werken aan de nieuwste generaties detectorchips, zegt groepsleider Niels van Bakel. 'Het is belangrijk voor Nikhef om een serieuze speler te zijn en te blijven in dit veld. Wij willen de beste wetenschap bedrijven. Dan moeten we ook de beste technologie binnen handbereik hebben en meewerken aan relevante ontwikkelingen.'

### Detector R&D in space

Het LISA-project, een zwaartekrachtsgolfdetector in de ruimte, zal naar verwachting pas in 2037 realiteit zijn. Maar nu al spreekt het werk van Nikhefs Detector R&D aan het project tot de verbeelding. LISA bestaat uit een netwerk van kunstmanen op onderlinge afstanden van miljoenen kilometers. In Amsterdam wordt gewerkt aan digitale pixelcamera's die de onderlinge posities van de kunstmanen extreem precies kunnen meten. Bijzonder aan het project is dat onderdelen in ruimtevaartprojecten wel tien jaar voor de lancering al klaar moeten zijn voor eindeloos veel tests. Eenmaal in de ruimte is repareren of aanpassen immers geen optie. Nikhef en SRON kregen in september een NWO-M subsidie voor het project.



Nikhef-fysicus *Marcel Merk* kan soms niet slapen van de nieuwsgierigheid naar hoe het universum echt in elkaar zit. Maar zeg niet dat de deeltjestheorie niet werkt.

# De experimentator die alles wil snappen

'Cautiously excited', voorzichtig opgewonden. Dat waren de woorden die onderzoekers van het LHCb-experiment op CERN in het voorjaar gebruikten om een nieuw resultaat naar buiten te brengen. Opgewonden? Ja, er leken verschillen tussen elektronen en muonen gemeten te zijn die de theorie niet voorziet. Voorzichtig? Nou, de afwijkingen zouden best nog toevallige uitschieters kunnen zijn, die met meer metingen weer verdwijnen in de achtergrond.

De media waren minder voorzichtig. En reusachtig opgewonden. Eindelijk een bres in het Standaardmodel van de deeltjesfysica, was de teneur in veel kranten, op internet en op televisie. Dat is immers wat deeltjesfysici het liefst doen: hun theorieën breken, zodat er ruimte komt voor iets beters.

Marcel Merk, LHCb-programmaleider bij Nikhef en hoogleraar aan de Universiteit Maastricht en de Vrije Universiteit, zucht hoorbaar over het beeld dat zo gemakkelijk in de media ontstaat. Scheuren. Barsten. Kapotmaken. Hij moet er niks van hebben. 'Verdiepen is een beter woord.'

Het punt, zegt Merk, is dat het Standaardmodel geen bouwdoos met een handvol bekende deeltjes is, al wordt het

vaak wel zo verbeeld. 'Het Standaardmodel is een concept waarin quantumkrachten en symmetrieën centraal staan, een manier van beschrijven van de natuur die fantastisch blijkt te werken. We begrijpen de sterke kracht, de elektrozwakke kracht, de deeltjes die daarbij horen. Dat werkt perfect.'

***Zoiets moois wil je helemaal niet kapotmaken?***

'Natuurlijk niet. De theorie werkt zo goed dat het heel gek zou zijn als die opeens helemaal fout blijkt.'

***En toch zijn deeltjesfysici, bijvoorbeeld bij LHCb, op zoek naar veelzeggende afwijkingen.***

'Zeker, en met goede redenen. We weten dat het Standaardmodel een aantal dingen niet vertelt. Wat gebeurde er tijdens de oerknal? Waarom is er vooral materie en nauwelijks antimaterie? Waarom zijn er drie generaties deeltjes met enorme massaverschillen? Waarom hebben elektronen en protonen exact tegengestelde lading? Waarom zijn er drie dimensies?'

***Grote vragen. En geen antwoorden.***

'Waarbij je niet het kind met het badwater moet weggooien. Het is

overduidelijk dat de natuur zich goed laat beschrijven met symmetrieprincipes zoals die van het Standaardmodel. We hebben nog nooit duidelijke afwijkingen gevonden, hooguit wat suggesties. Daarom: als je weet dat zo'n model niet compleet is, is het logisch na te denken over een extra symmetrie. Een toevoeging. Een dieper overkoepelend principe dat antwoorden geeft op de diepere waarom-vragen.'

***Wat heb je dan aan afwijkingen in je metingen, bijvoorbeeld bij jullie LHCb-experiment?***

'Afwijkingen van wat het Standaardmodel voorspelt, kunnen je vertellen of er zo'n diepere laag is. Een extra symmetrie met deeltjes die we nog niet kennen. Een toevoeging aan het huidige Standaardmodel, die fundamenteel meer verklaart.'

***Een symmetrie die bij de oerknal bestond, maar daarna 'brak', zoals natuurkundigen zeggen.***

'Nog voordat de elektrozwakke kracht of de sterke kracht, en het higgsveld dat massa gaf aan de basisdeeltjes, ontstonden. Ik kan 's nachts wakker liggen van de vraag wat daar gebeurd kan zijn. Hoe is dat precies gegaan?'

***Wat hoop je te ontdekken?***

'Dat we de antwoorden echt vinden voor ik tussen zes plankjes lig. Dat we eindelijk snappen waarom bepaalde dingen zo extreem precies op elkaar aansluiten dat het echt geen toeval kan zijn. De koppeling van het higgsdeeltje met het top-quark, die is bij metingen precies 1 maar had ook tien tot de macht 40 groter of kleiner kunnen zijn. *Weird*. Er zijn redenen voor dingen, onderliggende principes die we nog niet zien. Daarvan ben ik behoorlijk overtuigd.'

***Wat voor principes?***

'Ik zie een universum voor me dat dingen uitprobeert. Kan ik met één generatie deeltjes uit de voeten? Nee. Met twee? Nee. En dan met drie opeens pats, het werkt! Alsof de dingen dan op hun

plaats vallen. Ik ben overigens geen theoreticus natuurlijk, het gaat allemaal heel gevoelsmatig. Intuïtief.'

***Je bent enorm nieuwsgierig. Gretig om te snappen.***

'Nadenken over hoe het universum werkt, dat is eigenlijk mijn enige hobby. Als ik een ommetje maak, denk ik daarover na. Wat is er gebeurd? Hoe kan het dat wij mensen dit allemaal kunnen begrijpen? Als ik in bed lig droom ik ervan. *Why 3*, is mijn motto, waarom drie? En mijn werk is om dat te meten met de instrumenten die we bouwen.'

***Er is nu sprake van voorzichtige opwinding bij LHCb, maar is het niet ontzettend frustrerend om meestal***

***alleen maar bevestiging van het Standaardmodel te meten?***

'Weet je, ik ben daarin heel agnostisch. Als experimenteel natuurkundige kun je onmogelijk teleurgesteld zijn in de natuur. De natuur is niet saai, het is wat het is. Zo simpel is het.'

***En als de mogelijke afwijkingen toch weer in de achtergrond verdwijnen als jullie verder meten?***

'Dat zou natuurlijk best jammer zijn. Maar ik ben van nature een optimist. We hebben al zo ongelofelijk veel wél geleerd over het universum. Vergelijk het met wat we wisten toen ik een jongetje in Maastricht was dat van vliegende schotels en sterren en planeten droomde. We moeten doorwerken en onderzoeken. Altijd.' ◀



# Meer xenon om donkere materie te vangen

Groter is beter. Dat adagium geldt voor gevoelige detectoren die met een tank xenon interacties met zeldzame materiedeeltjes proberen te detecteren. De verbeterde XENONnT-detector jaagt nu met 8,5 ton xenon op donkere materie.

Een pandemie komt nooit gelegen, maar toen het coronavirus zich in maart 2020 snel in Europa verspreidde was dat voor wetenschappers van het XENON-consortium wel een erg onhandig moment. Alle onderdelen van de splinternieuwe XENONnT-detector lagen klaar om te worden geassembleerd in het Gran Sasso-laboratorium, 1400 meter onder het gelijknamige Italiaanse bergmassief. 'Iedereen moest naar huis. Alleen een kleine technische crew bleef achter', zegt Nikhef-onderzoeker Patrick Decowski, hoogleraar experimentele astrodeeltjesfysica van de Universiteit van Amsterdam. Wachten tot reisversoepelingen was niet mogelijk. Het experiment zou niet alleen vertraging oplopen maar ook minder

gevoelig worden: kosmische straling activeert detectoronderdelen boven de grond. De zeer lichte radioactiviteit die dat oplevert verstoort het experiment. Het ding moest zo snel mogelijk de grond in. De detector is toen gedeeltelijk op aanwijzingen per videoverbinding in elkaar gezet. 'Niet ideaal, maar het is wonderwel gelukt', aldus Decowski.

Het hart van de detector, een cilindervormig vat van ongeveer anderhalve bij anderhalve meter, is inmiddels gevuld met 8,5 ton xenon, een doorzichtig edelgas dat bij een temperatuur van zo'n honderd graden onder nul een vloeistof is.

In dat xenonbad hopen de wetenschappers extreem zeldzame interacties met donkere materie te zien, specifiek met

WIMP's ofwel *Weakly Interacting Massive Particles*. Van deze WIMP's ontbreekt vooralsnog ieder spoor, maar hun bestaan zou astronomen erg goed uitkomen. Het kan donkere materie zijn, de 'onzichtbare materie' die zij zo hard nodig hebben om bewegingen van onder andere sterrenstelsels te verklaren.

De betrokkenen bij het XENONnT-experiment trekken in het nieuwe experiment nog meer registers open om de deeltjes te vinden. De natuur helpt al een handje: xenon heeft een relatief grote atoomkern. En bij een botsing produceert het atoom gemakkelijk veel lichtdeeltjes. Maar de meeste maatregelen zijn technisch van aard. In de nieuwe detector zit ten opzichte van het vorige experiment

XENON1T niet alleen meer xenon (8,5 in plaats van 3,5 ton), maar bevinden zich ook meer lichtdetectoren (494 in plaats van 253).

Als je extreem zeldzame interacties zoekt dan gaat het meeste werk juist zitten in het elimineren van de veelvoorkomende interacties. Zo weert de enorme steenlaag boven het lab de meeste muonen afkomstig van interacties in de atmosfeer van hoog-energetische deeltjes uit de diepe kosmos. Een omringend cilindervormig waterbassin van ongeveer tien bij tien meter is er onder andere om de muonen te detecteren die het experiment nog wel bereiken (en uit te sluiten van de metingen).

In het hart van de detector is alles brandschoon, het experiment tolereert

## Donkere materie of tritium?

In juni 2020 publiceerden onderzoekers op basis van XENON1T-metingen een artikel over iets dat *low energy electronic excess* is gaan heten: iets gaat onverwacht interacties aan met de elektronen van het xenon. Het artikel werd inmiddels honderden keren geciteerd. 'Het maakt veel los, er zijn in ieder geval veel mensen die een idee hebben over wat hier aan de hand is', zegt Decowski. Maar is dit daadwerkelijk een spoor voor 'nieuwe fysica'? Decowski is terughoudend. 'Dit zijn waarschijnlijk geen WIMP's, die botsen namelijk met de atoomkernen van het xenon. En gezien de lage energie van de interacties - maximaal zo'n 20 keV - lijkt dit op het verval van tritium. De detector is zo gevoelig dat zelfs enkele tritium-atomen per kilogram xenon al een signaal kunnen geven.' XENONnT kan uitsluitel geven. De wanden bevatten als het goed is minder tritium en de grotere verhouding volume versus wandoppervlak beperkt interacties. 'Terwijl een signaal van bepaalde donkere materie-vormen zoals zogenaemde axionen waarschijnlijker wordt, moeten tekenen van tritium juist verminderen. Mocht het signaal onverhoopt sterker worden dan zou dat een groot resultaat zijn', besluit Decowski.



geen vervuiling met mogelijk licht radioactieve isotopen. 'Het vuil onder je vingernagel is genoeg om het experiment te verpesten', aldus Tina Pollmann van Nikhef, die als universitair docent aan de UvA is verbonden. Ze onderzoekt onder andere de manier waarop lichtsignalen in de detector reflecteren. 'Ook selecteren we de materialen in de detector op een zo laag mogelijke radioactiviteit. Spullen uit de bouwmarkt zijn wat dat betreft al te vervuild.'

In de nieuwe versie van het experiment is extra aandacht besteed aan de stalen wanden van het vat, dat elektrolytisch gepolijst is. Het resulterende gladde oppervlak heeft weinig microscopische openingen waarin zich radioactieve atomen zoals tritium kunnen verstoppert.

Ook water en zuurstof die uit de bouwmaterialen ontsnappen kunnen de metingen beïnvloeden. Om de vervuiling te verwijderen beschikt XENONnT over een nieuw zuiveringssysteem met een grotere capaciteit. Daarin blijft het grootste deel van het xenon in de vloeibare fase, in tegenstelling tot het oude systeem dat het xenon eerst in gasfase bracht. 'We filteren nu ongeveer een kopje xenon per minuut, dat is genoeg voor ons', zegt Decowski. Dit nieuwe systeem komt bovenop het bestaande filtersysteem dat radioactief radon via cryogene destillatie verwijdert. Dat werd voor het eerst in XENON1T getest.

De verbouwing ging niet vlekkeloos. Het elektrisch veld in de detector is niet zo sterk als gehoopt. De spanning is wat lager, waarschijnlijk door een los contact, zegt Decowski. 'We kunnen daarmee werken, al duurde het een paar maanden om dat te

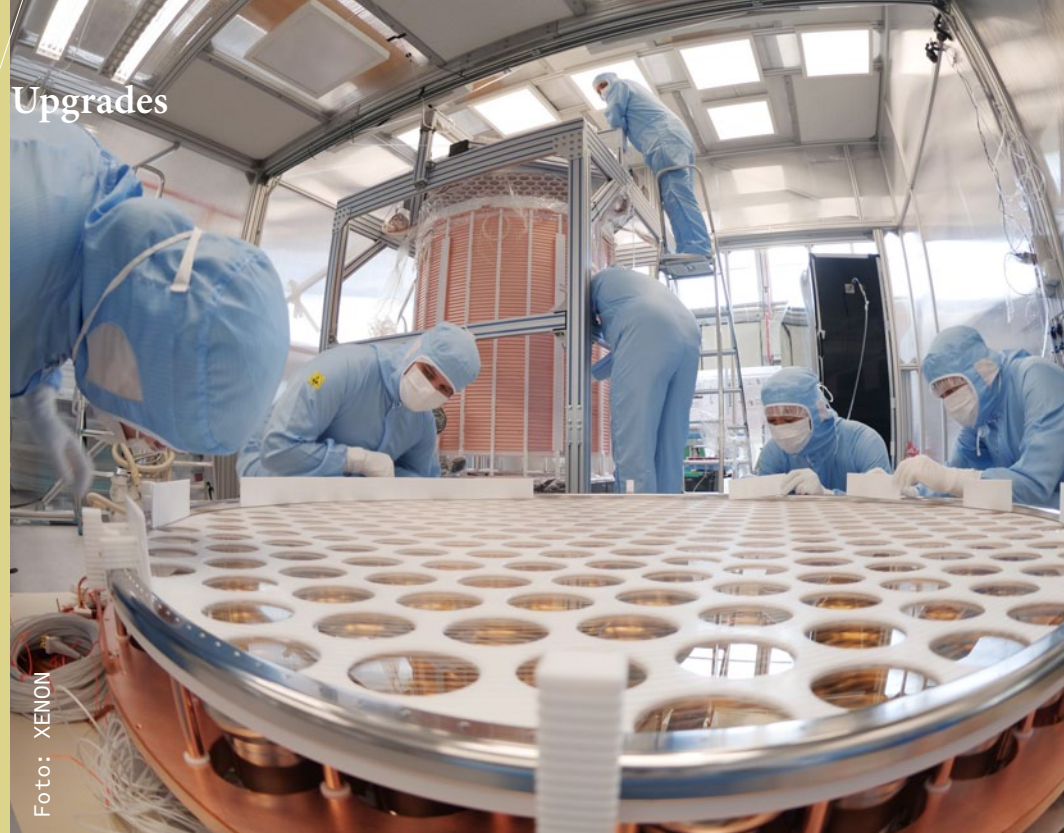


Foto: XENON

optimaliseren. Dat was nog altijd sneller dan het leegmaken en openschroeven van de detector. Dan ben je gauw een jaar verder.'

Of alle inspanningen genoeg zullen zijn om donkere materie te vangen moet nu blijken. Voorloper XENON1T deed van 2016 tot eind 2018 metingen, en vond daarbij geen sporen van WIMP's. Overigens wél een onverwacht signaal (zie kader pagina 13). Dat er opnieuw geen sporen van donkere materie opduiken is zeker mogelijk, zegt Pollmann. Er wordt voorzichtig gedacht aan wat het apparaat in dat geval kan doen. 'Op dit moment is de machine geoptimaliseerd voor het detecteren van WIMP's, maar het experiment wordt nu zo gevoelig dat achtergrondsignalen in signalen veranderen. Je kunt bijvoorbeeld neutrino-interacties bestuderen, zeker als je de detector daarvoor optimaliseert', zegt ze.

Ook een betere data-aquisitie biedt mogelijkheden voor uitbreiding. Decowski zegt dat XENONnT in tegenstelling tot zijn voorganger ook een meetkanaal heeft

waarin zogenoemd neutrinoloos dubbel-bèta-veral kan opduiken. Een vooralsnog hypothetische interactie die – als zij bestaat – misschien een verklaring kan leveren voor de relatief lage massa van neutrino's of een hint kan geven over waarom er zoveel meer materie dan antimaterie in het universum is. Het apparaat krijgt zo meer mogelijkheden om (on)bekende interacties te onderzoeken. XENONnT doet sinds april 2021 een meting die waarschijnlijk tot in het najaar duurt.

Of dat niet een beetje saai wordt, jarenlang (misschien tevergeefs) zoeken naar donkere materie? Zowel Pollmann als Decowski prijzen de veelzijdigheid van het werk. 'In vergelijking met de LHC-experimenten is XENONnT klein. Je kunt hier als onderzoeker nog min of meer een allrounder zijn. Hardware en software bouwen met je eigen handen, analyses doen en papers schrijven. Dat vind ik erg bevredigend', zegt Decowski. 'Ik voel me hier soms een beetje zoals de pioniers à la Marie Curie.'

#### Samenwerken voor een tienmaal zo gevoelige detector

Nu al denken de onderzoekers na over de volgende stap in hun zoektocht naar donkere materie. Technologisch gezien is er ruimte voor een nóg grotere en gevoeliger

detector. Organisatorisch worden de handen hiervoor ineengeslagen met het concurrerende Amerikaanse LUX-ZEPLIN-experiment (LZ). Afgelopen juli tekenden leden van het XENON- en LZ-consortium een overeenkomst die moet leiden tot een intense

samenwerking én een detector met maar liefst veertig tot vijftig ton xenon. Die detector, genaamd DARWIN, zou zo'n tien keer gevoeliger zijn voor interacties van donkere materie. Bovendien kan hij axionen uit de zon meten, het eerder genoemde

neutrinoloos dubbel-bèta-veral én neutrino's afkomstig van de zon en supernova-explosies. DARWIN is zogenoemd een duizendpoot. De nieuwe detector zou na 2027 gebouwd worden, op welke locatie is nog niet beslist.

## Nikhef, en dan verder



**Zeven alumni over hun ervaringen. Wat vinden ze het leukst aan hun huidige werk? En wat hebben ze op Nikhef geleerd dat nog steeds van pas komt?**

Nikhef is niet alleen een broedplaats voor natuurkundige onderzoekers. Veel vaardigheden die jonge promovendi hier opdoen, nemen ze mee naar soms totaal andere werkomgevingen. Het Rode Kruis bijvoorbeeld. Of naar de supermarkt. Uit de gegevens van alle gepromoveerden die

sinds 2017 Nikhef hebben verlaten blijkt dat ongeveer een derde van hen een doorstart heeft gemaakt in de wetenschap en twee derde elders is gaan werken. Nikhef-alumni komen na hun promotie op uiteenlopende plekken in wetenschap en maatschappij terecht.

Tekst: Maureen Voestermans



Jacopo Margutti

Geboren:  
1990, Milaan, Italië  
Gepromoveerd:  
2018, ALICE-groep



Huidige  
werkgever:  
Rode Kruis  
Nederland

Ik heb mijn PhD bij het ALICE-experiment van de LHC gedaan, waar ik zocht naar eigenschappen van het quark-gluonplasma. Vlak nadat ik mijn proefschrift had ingeleverd (dan heb je meestal een paar maanden vrij in de zomer) heb ik me aangesloten als vrijwilliger bij het Rode Kruis in Nederland. Hier werk ik nu inmiddels als vaste werknemer en dat bevalt me erg goed! In mijn

werk maak ik data- analyses die de mensen in het veld helpen om crisissituaties beter aan te kunnen. Eigenlijk ben ik afwisselend op drie niveaus bezig: ik coördineer het onderzoeksteam - dus degenen die een wetenschappelijk onderzoek doen binnen het Rode Kruis naar bijvoorbeeld nieuwe methodologieën; daarnaast werk ik aan de zogenaamde 'operalisatie' van onze computermodellen, dat wil

zeggen dat ik zorg dat onze computermodellen ook echt bruikbaar zijn in het veld; en ten slotte geef ik ook trainingen, wereldwijd, in de crisisgebieden, zodat de mensen daar ter plekke - nadat voor ons het project afgerond is - zelf nog vooruit kunnen. Wat ik leuk vind aan mijn werk is dat de noodzaak ervan heel duidelijk is. Het is daarnaast ook enorm dynamisch en intens,

energiek ook wel. De nadelige kant hiervan is dat de dynamiek soms wel wat aan de hectische kant is. Dan wil je alles heel goed en gestructureerd doen, maar door de drukte lukt het soms maar half. Daar moet je tegen kunnen. Nikhef heeft mij veel geleerd. Niet alleen de technische aspecten zijn heel waardevol in mijn werk nu, maar ook de mindset: hoe breek je een complex probleem op in kleine stukjes, stap voor stap. Mensen die van Nikhef komen kunnen echt goed met complexe problemen overweg, denk ik. Nu ik dat zeg: we zoeken hier altijd nog vrijwilligers! Mocht iemand zich roepen voelen...

Rosemarie Aben

Geboren:  
1985, Amsterdam  
Gepromoveerd:  
2015, ATLAS-groep



Huidige  
werkgever:  
Ingenieursbureau  
Gemeente Amsterdam

Bij Nikhef werkte ik aan het ATLAS-experiment. Mijn proefschrift ging over de spin en pariteit van het higgsdeeltje. Ik ben een geluksvogel, want tijdens mijn PhD werd het higgsdeeltje ontdekt. Dus dat was echt een bijzondere tijd. Daarnaast heb ik veel aan outreach-activiteiten gedaan met als hoogtepunt het meewerken aan een aflevering voor Het Klokhuis. Inmiddels werk ik bij het Ingenieursbureau van de gemeente Amsterdam als strategisch adviseur en doe ik verschillende projecten, zoals werken aan een autoluwe stad en aan het herstel

van bruggen en kademuren. Ik kies meestal projecten waar data-analyse en onderzoek onderdelen van zijn. Mijn werk is heel gevarieerd, ik ben ook een tijd wekelijks naar de TU Delft en Deltares gereisd om daar met onderzoekers samen te werken aan een nieuwe berekeningsmethode. Het leuke van mijn werk zijn de complexe vraagstukken, waarbij de oplossing waar je aan werkt ook een directe impact heeft op de stad. Dus ik ben nog altijd analytisch bezig, maar tegelijkertijd ook praktisch. Het is ook leuk dat ik steeds weer aan een ander project kan werken en

daarbij nieuwe mensen ontmoet. Minder leuk is dat de gemeente soms een logge organisatie is. Het is heel helder dat bepaalde dingen beter of efficiënter kunnen, maar het is soms lastig dit daadwerkelijk te bewerkstelligen. Wat ik meegenomen heb uit mijn Nikhef-periode is doorzettingsvermogen en vertrouwen. Als ik bij een bepaald vraagstuk of project denk dat we er niet meer uit gaan komen, hoeft ik maar aan m'n PhD te denken - waar ik dit soort momenten regelmatig heb gehad - en dan weet ik dat ik ook dit project tot een goed einde kan brengen.

Jochem Snuverink  
Geboren:  
1979, Enschede  
Gepromoveerd:  
2009, ATLAS-groep



Op Nikhef heb ik mijn promotie gedaan bij het ATLAS-experiment. Ik heb meegeholpen met de commissioning van de door Nikhef gebouwde MDT (Muon Drift Tube) detectoren: eerst heb ik die op Nikhef allemaal getest, en toen nogmaals op CERN voordat ze geïnstalleerd werden in ATLAS. Erg leuk was het om de allereerste data, kosmische muonen weliswaar, uit de ATLAS-detector te kunnen analyseren. Een tegenvaller was wel dat de LHC toen stuk ging, en ik

Laura van der Schaaf  
Geboren:  
1989,  
Wettingen, Zwitserland  
Gepromoveerd:  
2020, zwaartekrachtsgolven-groep



Huidige  
werkgever:  
Nederlands Kanker  
Instituut (NKI) Antoni  
van Leeuwenhoek-  
ziekenhuis

Ik ben tijdens de coronacrisis begonnen bij mijn nieuwe werk aan het Nederlands Kanker Instituut (NKI), binnen de afdeling radiotherapie. Mijn promotieonderzoek bij Nikhef ging over zwaartekrachtsgolven. Bij Nikhef maakten we plaatjes met de *phase camera* om de laserbundel in de interferometer te optimaliseren, bij het NKI maken we (onder andere) CT-scans om

de behandelbundel te optimaliseren. Het doel is om de bundel aan te passen aan hoe de tumor op de behandeling reageert en hoe de tumor in de patiënt beweegt door bijvoorbeeld ademhaling. Zo wordt het gezonde weefsel om de tumor niet onnodig beschadigd. Ik werk nu veel samen met professionele programmeurs en die werken heel gestructureerd, dat

zijn ik en ook de andere onderzoekers van het NKI niet gewend. Op Nikhef was ik regelmatig in het lab te vinden, in het ziekenhuis moeten we van de apparatuur af blijven. Soms vind ik dat wel jammer want dan zou ik graag aan de apparatuur willen sleutelen. Maar dat mag echt niet. Wat leuk is bij het NKI is dat de projecten een paar maanden duren,

bij Nikhef waren dat altijd jaren. Zo sluit je wat sneller een project af en weet je ook meteen of je goed bezig bent. Er lopen hier trouwens veel Nikheffers rond. Wat Nikhef mij geleerd heeft is om zelf initiatief te nemen, dat wordt erg gewaardeerd. Ook moet je snel kunnen leren en taken durven aanpakken die je nog nooit eerder gedaan hebt. Ik moest mijzelf ook een boel medische termen eigen maken. Het enige wat ik dus soms mis is met die apparaten bezig zijn. Misschien dat ik in de toekomst nog eens richting een Philips lab beweeg waar ze dit soort apparaten bouwen.

Huidige  
werkgever:  
Paul Scherrer  
Instituut (PSI),  
Zwitserland



Jeroen Meidam  
Geboren:  
1984, Oss  
Gepromoveerd:  
2018,  
zwaartekrachtsgolven-  
groep



Huidige  
werkgever:  
Jumbo Supermarkten

de eerste botsingen niet meer heb meegemaakt. Na mijn proefschrift besloot ik maar om versnellerfysicus te worden! Dat doe ik nu bij het Paul Scherrer Instituut (PSI), het op één na bekendste versnellerinstituut van Zwitserland. Ik werk daar in de groep cyclotronontwikkeling en straaldynamica, aan de twee protonenversnellers die we daar hebben en aan PROSCAN - één van de eerste protontherapiecentra van Europa. Mijn groep is verantwoordelijk voor de langetermijnstrategie, maar ook voor de ondersteuning van de controlekamer, die continu bezet is en de dagelijkse operatie van de in totaal 4 PSI-versnellers waarneemt. Ikzelf maak en onderhoud applicaties voor de controlekamer; simuleer en test mogelijke verbeteringen aan de versnellers;

en analyseer de data en gedane metingen; ook begeleid ik een aantal studenten en postdocs. Op dit moment ben ik druk met het uitwerken van een nieuwe straallijn voor de productie van medische isotopen. Het leukste aan mijn werk vind ik het interdisciplinaire aspect van deeltjesversnellers. Ik werk met veel verschillende groepen samen en er komen diverse vakgebieden bij kijken; van natuurkunde, engineering, informatica tot wis-kunde. Ook de combinatie van kortetermijn- en langetermijnstrategie maakt het interessant. Veel basisvaardigheden zoals bijvoorbeeld het geven van presentaties en wetenschappelijk schrijven met hoge kwaliteits-eisen heb ik bij Nikhef en ATLAS geleerd, en daar maak ik nog steeds goed gebruik van.

Ik werk als data-engineer en heb momenteel als klant de supermarktketen Jumbo. Ik heb steeds wisselende opdrachtgevers, dat is heel leuk. Bij Nikhef heb ik gewerkt aan het testen van de algemene relativiteitstheorie in sterke dynamische zwaartekrachtsvelden. Mijn werk nu heeft niets meer met zwaartekrachtsvelden te maken! Het belangrijkste bij mijn werk nu is dat ik help met het doorsluizen van data van A naar B. Ik bouw zogenaamde *data pipelines* op cloud-platformen. Daarnaast doe ik ook veel machine learning. Mensen zijn soms wel eens bang dat je met machine learning banen wegneemt, maar in feite geef je gewoon het écht saaie werk uit handen, daar is iedereen toch wel blij mee. Een andere belangrijke taak is dat ik de data-modellen hanteerbaar maak voor de gebruiker. Je moet echt goede pro-

grammeerskills hebben voor mijn werk. Bij Nikhef ben ik hier al mee begonnen en ook de hele mindset die ik opdeed tijdens mijn promotieonderzoek is handig, want ik ben nu nog steeds aan het knutselen en uitproberen met codes. Vallen en opstaan. Het leuke van mijn werk nu is dat ik echt iets vanaf de grond opbouw en ook werk aan zo duurzaam mogelijke oplossingen. Tegelijkertijd gaat alles in de IT-wereld ook heel hard en ik vind het leuk om zo steeds weer bij te moeten leren. IT-technieken zijn heel interessant, maar soms mis ik de echte wetenschap wel een beetje. Ik heb nog steeds een grote interesse in sterrenkunde. Daarom schreef ik onlangs ook een kinderboek: "Anne verkent het zonnestelsel" over een meisje dat door de ruimte reist. Voor de hoofdrol heb ik bewust een meisje gekozen. Alle tekeningen heb ik zelf gemaakt! ►



Ik ben vooral gefascineerd door fundamentele vragen rondom deeltjesfysica en kosmologie. In mijn proefschrift deed ik onderzoek naar welke rol het higgsdeeltje speelde tijdens de allereerste momenten van ons heelal. Toen is het heelal in een hele korte tijd extreem uitgedijd, de inflatieperiode. Mogelijk is dat gebeurd onder invloed van het higgsveld, dat zou ik graag willen weten. Inmiddels zit ik nu twee jaar bij DESY in Hamburg en ik ben nog steeds met higgs bezig! Zo wil ik meer weten over de zogenaamde elektrozwakke fase-overgang, waarin de higgs massa ging geven aan de deeltjes uit het Standaardmodel. Mogelijk heeft de higgs hier een rol gespeeld in het ontstaan van de asymmetrie

**Jorinde van de Vis**  
Geboren:  
1991, Delft  
Gepromoveerd:  
2019, theorie-groep



Huidige  
werkgever:  
DESY, Duitsland



**Erik Hogenbirk**  
Geboren:  
1991, Alkmaar  
Gepromoveerd:  
2019, donkere  
materie-groep

Bij Nikhef heb ik meegewerkt aan de donkere materie experimenten bij XENON in Italië. In het Nikhef-lab heb ik hiervoor samen met collega's de XAMS-detector gebouwd. Mijn werk bij Amsterdam Scientific Instruments ligt aan de ene kant dicht bij wat ik op Nikhef deed,

omdat ik ook hier detectoren/sensoren ontwikkel, maar aan de andere kant is de werkcultuur weer heel anders. Dit is wel echt een bedrijf: alles is hier meer gericht op resultaat en efficiëntie, minder op het vrij exploreren. Bij Nikhef was het zo dat als je iets raars tegenkwam, je ook echt de tijd kreeg om dat verder te onderzoeken. Hier wordt in maanden gerekend bij projecten, in plaats

onderzoek wilde doen. Ik vind het nog steeds heerlijk als ik zelf in een flow zit bij een berekening, maar het is natuurlijk ook echt een *group effort* – je komt gezamenlijk geleidelijk tot een inzicht. Tijdens mijn promotie heb ik nog wel even overwogen of ik misschien iets anders wilde dan onderzoek doen, maar in mijn derde jaar keerde dit. Ik moest

toen meer seminars geven en daardoor zag ik steeds meer de relevantie van mijn werk in. Jonge onderzoekers hebben vaak een beetje last van het imposter syndroom, denk ik. Maar daar kom je wel overheen!

Huidige  
werkgever:  
Amsterdam Scientific  
Instruments (ASI)

van jaren zoals in de academische wereld gebruikelijk is. Ik heb na mijn promotie uiteindelijk toch de keuze gemaakt om niet door te gaan in de wetenschap. Ik zag zelf wat minder kansen liggen op het academische carrièrepad, qua vaste baan en zekerheid. Bovendien was ik nieuwsgierig naar het bedrijfsleven, ik wilde daar graag een andere sfeer proeven. Eigenlijk is het wel gek dat binnen de wetenschap het een beetje als 'falen' gezien wordt als je een ander pad kiest. Terwijl ik juist denk dat een

van de doelen van de wetenschappelijke wereld óók het opleiden van mensen voor de hoogopgeleide arbeidsmarkt behelst. Ik sluit niet helemaal uit dat ik nog een keer terugkeer naar de wetenschap, maar ik heb het nu ook eigenlijk wel heel goed naar mijn zin. ASI is een snelgroeiend bedrijf en er zit veel energie in, dat is heel leuk. Wat ik ook leuk vind is het contact met industrie, zo blijft het afwisselend. ASI is trouwens een spin-off van Nikhef, en nu met jullie verbouwing zijn we echt overburen op het Amsterdam Science Park! Het ligt dus in mijn geval allemaal ook letterlijk dicht bij elkaar.

# Vragen naar de basis

Wisselen neutrino's steeds van smaak? Hebben zwarte gaten haar? Zijn elektronen perfect symmetrisch? Eerste resultaten van drie Nikhef-projecten op zoek naar antwoorden op de natuurkundige basisvragen.



Neutrino's zijn elementaire deeltjes, een cruciaal onderdeel van het Standaardmodel van de deeltjeswereld. Maar ze zijn met veel raadsels omgeven. Ze zijn ongeladen en vrijwel massaloos, en haast niet te vangen in hun vlucht door de kosmos. KM3NeT heeft een voldoende groot detectorvolumen om nu en dan toch een passant te zien.

ORCA is speciaal gericht op een verschijnsel dat neutrino-oscillaties wordt genoemd. Dat is het effect dat er drie smaken neutrino's bestaan (elektron, muon en tau) waartussen een neutrino voortdurend wisselt. Theoretisch kan dat alleen wanneer de drie neutrino-types verschillende massa's hebben.

De grote vraag, zegt De Jong, is de zogeheten massahierarchie: de neutrino's wegen alledrie haast niks, maar welke is dan het lichtst, en welke het zwaarst? De theorie doet daar geen uitspraak over, hier kan alleen het experiment spreken.

En ORCA spreekt, laat Heijboer zien. De detector neemt deeltjes waar die van boven komen en hoogstwaarschijnlijk muonen zijn, hoog in de atmosfeer gemaakt door inslaande kosmische straling. Belangrijker zijn de signalen van onderaf. Dat zijn muonneutrino's die aan de andere kant van de aarde in de atmosfeer zijn gemaakt door kosmische inslagen, en daarna ongehinderd dwars door de hele aarde zijn gevlogen.

Uit de eerste gegevens blijkt al dat onder bepaalde hoeken de neutrinostroom minder is dan uit andere richtingen. Een eerste aanwijzing voor neutrino-oscillaties, zegt De Jong. 'Van muonneutrino's naar een smaak die we met ORCA nog niet kunnen waarnemen. Het wegvallen van het signaal is daarvoor een eerste aanwijzing.'

En op termijn, gaat Heijboer verder, worden de grafieken zo scherp dat de details zichtbaar worden die kunnen vertellen welke neutrino zwaarder is dan welke andere. 'Dan zetten we een echte stap in de natuurkunde.'

duister van de diepzee, veroorzaken passerende elementaire deeltjes lichtflitsen als ze door het zeewater bewegen.

KM3NeT is een woud van lichtdetectoren, rijen fotosensoren aan lange verticale kabels vanaf de zeebodem, die deze lichtflitsen oppikken. Uit de signalen zijn de deeltjessporen te reconstrueren, en daarmee kunnen natuurkundigen de eigenschappen van de deeltjes onderzoeken.

Naast het ORCA-deel van KM3NeT in Frankrijk, is er nog een groter Italiaans deel bij Sicilië: ARCA. Waar ORCA vooral toegesneden is op de fundamentele vragen over neutrino-deeltjes zelf, is ARCA meer bedoeld voor onderzoek naar de bronnen waar de kosmische neutrino's vandaan komen.

ORCA heeft nu zes werkende lijnen, ARCA acht werkende lijnen met een reeks lichtgevoelige detectorbollen. Een aanzienlijk deel van deze DOM-bollen is op Nikhef ontworpen en gebouwd. ORCA krijgt 115 lijnen, ARCA uiteindelijk 230. De detector zou rond 2025 voltooid kunnen zijn.

De productie is in volle gang, maar nu al beginnen de eerste zinnige resultaten binnen te druppelen. 'Zodra een lijn geplaatst is en aangesloten zetten we hem aan en kunnen we waarnemen', zegt KM3NeT-groepsleider Paul de Jong van Nikhef en legt de nodige grafieken op tafel. De neutrinojacht is begonnen.

## KM3NeT krijgt de smaak te pakken

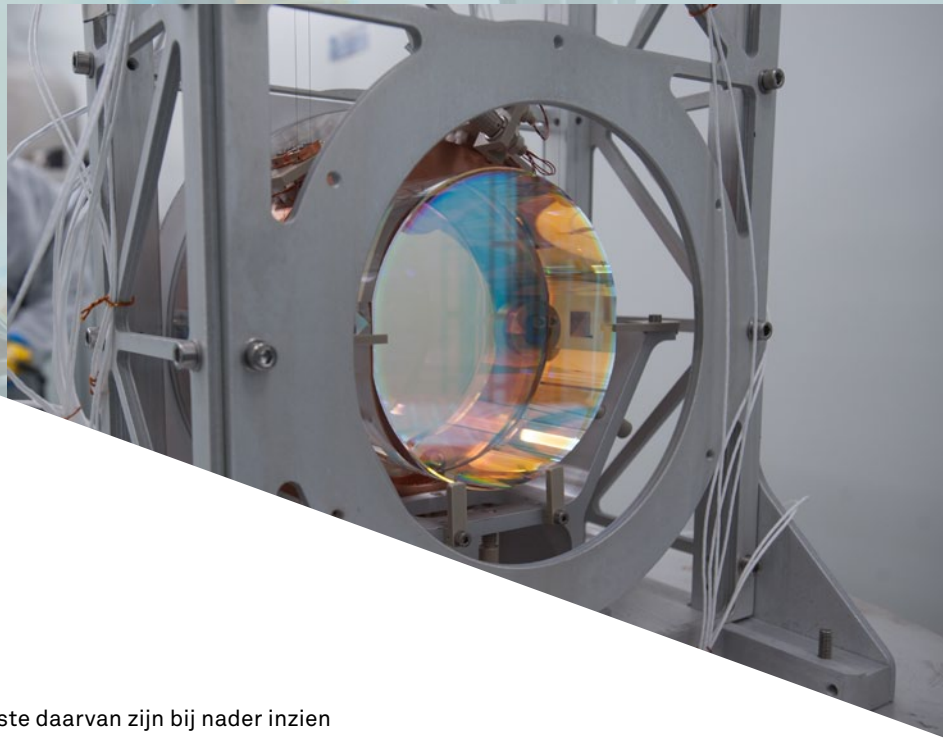
1 De KM3NeT-neutrinodetector op de bodem van de Middellandse Zee begint de smaak van neutrino-jagen te pakken te krijgen. Deze zomer presenteerde het experiment de eerste resultaten uit de Franse ORCA-sector op de *International Cosmic Ray* conferentie in Berlijn.

'Dit zijn pas zes van de uiteindelijk 115 lijnen van de detector, maar wat we zien is heel hoopvol', zegt Nikhef-onderzoeker en *physics coordinator* Aart Heijboer van het KM3NeT-experiment. 'We kunnen ons nu al meten met andere experimenten, en het wordt alleen maar beter.'

ORCA is het Franse deel van KM3NeT, en ligt zo'n 40 kilometer uit de kust bij Toulon op 2,5 kilometer diepte. Daar, in het



## Oogsttijd voor zwarte gaten



**2** De coronapandemie en de daaropvolgende lockdowns legden in het voorjaar 2020 wereldwijd de metingen van zwaartekrachtsgolven stil. Maar de analyses van al bestaande observaties gingen onverminderd door, bijvoorbeeld bij de *Gravitational Waves* groep van Nikhef.

Eigenlijk, zegt zwaartekrachtsgolven-specialist Chris Van Den Broeck van de Nikhef-groep in Utrecht, zijn het ronduit prachtige tijden voor zijn onderzoek. 'Mijn Amerikaanse echtgenote noemt het de 'salad days': elke dag een bord vol nieuwe spannende dingen.'

De GW-groep is gespecialiseerd in het vinden van zwaartekrachtsgolven tussen alle toevallige trillingen in detectoren als LIGO in de VS en Virgo in Pisa, Italië. Zulke detectoren meten met lasers met extreme precisie afstanden tussen spiegels in de kilometerslange detectorarmen.

Die afstand varieert voortdurend door storingen of toeval. Maar daartussen zit nu en dan een signaal dat de ruimte zelf even golfde door een kosmische botsing ver weg en lang geleden, zoals Einstein vorige eeuw al voorspelde. Onderzoekers als Van Den Broeck's collega Sarah Caudill bouwen verfijnde computerfilters om tussen alle ruis zulke echte golven te isoleren.

De filters leiden tot *pipelines* en naarmate er meer data door de analysepijp worden gehaald, groeit het aantal opmerkelijke waarnemingen. In 2015 werd voor het eerst een zwaartekrachtsgolf waargenomen, een primeur die goed was voor een Nobelprijs. Maar inmiddels telt de catalogus van gebeurtenissen meer dan 1200 kandidaten.

De meeste daarvan zijn bij nader inzien niet geloofwaardig genoeg. LIGO/Virgo denkt nu dat 44 golfpatronen echt door kosmische botsingen zijn veroorzaakt. En de variatie in bronnen is enorm.

Van Den Broeck loopt langs de resultaten die afgelopen zomer op de internationale conferentie voor zwaartekrachtsgolfonderzoek werden gepresenteerd. Een lange lijst van bevindingen waarvan een paar jaar geleden alleen maar te dromen was.

Van Den Broeck: 'Dat we zwaartekrachtsgolven waarnemen is intussen niet zo bijzonder meer. Maar wat we uit de golfpatronen afleiden leidt voortdurend tot nieuwe verrassingen, vooral over zwarte gaten zelf.'

De Utrechtse onderzoekers gebruiken de metingen om Einsteins zwaartekrachtstheorie te testen, de Algemene Relativiteitstheorie. 'Tot nog toe vinden we geen discrepanties. Maar het is ronduit fascinerend om de consequenties van algemene relativiteit in detail terug te zien.'

Bron van zulke details zijn onder meer wat de onderzoekers de boventonen van de ruimtetijdtrillingen noemen: extra trillingen boven op het gewone signaal, als in een galmende piano.

Ook de zogeheten *ringdown* is een bron van informatie: het nagalmen van het

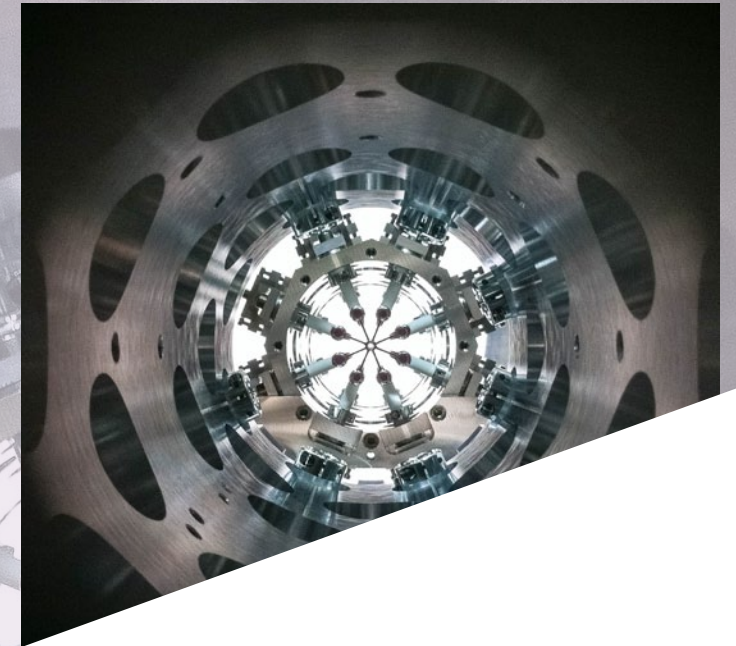
nieuwe zwarte gat dat bij de versmelting van twee botsende zwarte gaten ontstaat. Daarmee is onder meer een test mogelijk van de zogeheten '*no-hair*' stelling: het idee dat een zwart gat maar twee eigenschappen heeft, de massa en de rotatie en verder geen enkel detail.

Tot nog toe, vat Van Den Broeck samen, lijken zwarte gaten inderdaad geen haar te hebben. Of in elk geval heel weinig. 'Naarmate we meer en betere detectoren bouwen worden de inschattingen beter.'

Dat geldt bijvoorbeeld ook voor studies naar het idee dat er kleine zwarte gaten bij de oerknal zijn ontstaan, die nog steeds rondwaren. Of het idee dat de zwaartekracht door een deeltje, een graviton, wordt gedragen. Er staat nu een scherpe bovengrens op de gravitonmassa.

De waarnemingen leiden ook tot nieuwe gedachten over de kosmologie en sterevolutie. Sommige botsingen zijn afkomstig van zwarte gaten die in theorie te zwaar zijn om uit stervende sterren te zijn ontstaan. Mogelijk, is nu een vermoeden, zijn zulke zwaargewichten ontstaan bij eerdere versmeltingen van lichtere gewone zwarte gaten.

## Gelukt: superslome moleculen in Groningen



**3** Het einde van de eerste coronalockdown in Nederland betekende bij de Nikhef-groep op het Van Swinderenlab in Groningen een extra bevrijding. Er kon weer gewerkt worden aan een belangrijk doel: een wolkje strontiumfluoridemoleculen die vrijwel stilstaan. Dat is nu bereikt.

'Eigenlijk zijn we zelfs al voorbij ons doel', zegt Nikhef-groepsleider Steven Hoekstra, hoogleraar in Groningen. 'Voor ons onderzoek hebben we langzaam bewegende moleculen nodig. Stilstand biedt zelfs nog extra opties voor onderzoek. Zachte botsingen. Koude chemie.'

Hoekstra leidt het Groningse onderzoek naar wat het elektrische dipoolmoment van het elektron (eEDM) wordt genoemd. Dat is een kleine extra component in het elektrische veld rond het elektron. Volgens de gangbare ideeën over elektronen ziet dat veld er van alle kanten hetzelfde uit.

Maar een kleine asymmetrie zou een spectaculair nieuw inzicht zijn, en een uitdaging voor de bestaande deeltjestheorie. Net als in experimenten op CERN, maar niet door deeltjes enorm te versnellen, maar door alles juist haast stil te zetten.

Punt is wel, zegt Hoekstra's voormalige promovendus Parul Aggarwal vanuit haar nieuwe werkplek in Boulder, Colorado, dat

eventuele afwijkingen in metingen pas ergens ver achter de komma zichtbaar worden. 'Dat betekent een enorme technische uitdaging aan je complexe en delicate apparatuur. Elk detail moet kloppen. En als er iets niet werkt, kost het meteen dagen of weken om het op te lossen.'

De van oorsprong Indiase Aggarwal is eerste auteur van een recent door *Physical Review Letters* (PRL) geaccepteerd artikel over de Groningse methode om moleculen te vertragen en uiteindelijk stil te zetten. Afgelopen zomer promoveerde ze in Groningen op haar inspanningen om de opstelling echt aan de praat te krijgen.

'Daar hebben we tien jaar met heel veel mensen naartoe gewerkt en nu is het dan echt zover', zegt Hoekstra die verwacht binnen twee jaar de eerste echte metingen van het elektrische dipoolmoment van het elektron te kunnen doen. Een betrouwbare bundel supertrage moleculen is daarvan een begin.

Traag is daarbij een relatief begrip. De wolkjes onderling stilstaande moleculen bewegen nog wel met een snelheid van ongeveer 100 kilometer per uur door de opstelling. Maar dat is langzaam genoeg om ze tientallen milliseconden te kunnen observeren terwijl ze met een laser worden aangeslagen. Tienmaal langer dan in andere experimenten lukt, zegt Hoekstra.

Het uiteindelijke onderzoek van een eventuele asymmetrie in het elektron zal in Groningen worden uitgevoerd met trage

moleculen bariumfluoride, BaF. Die zijn nog zwaarder dan strontiumfluoride, SrF, en geven daardoor meer detail in de cruciale metingen. Meer, is de hoop, dan andere bestaande en nieuwe eEDM-experimenten in de wereld. Groningen is de enige groep die het via directe vertraging probeert. Lastig, want uniek. Maar wel veelbelovend, denkt Hoekstra.

De BaF-moleculen hebben grofweg de vorm van een sneeuwpop, niet toevallig het logo van het project in Groningen. Barium is het logge lijf, fluor de kop en tussen de twee atomen heerst heel plotseling een extreem sterk elektrisch veld, dat meer invloed heeft op de elektronen in het molecuul dan de grootste versnellers op aarde.

Die interactie is waar de onderzoekers zo precies mogelijk naar willen kijken. De theorie van elektronen met een kleine elektrische asymmetrie is in Hoekstra's groep ver uitgewerkt. Maar het echte kunststuk is de opstelling in het lab aan de rand van Groningen.

Centraal daarin staat een vijf meter lange bundelpijp met daarin duizenden exact uitgelijnde metalen hoepeltjes waarin passerende moleculen uit een bron stap voor stap voor stap worden afgeremd. Aan het andere uiteinde worden de moleculen beschenen met zorgvuldig afgestemd laserlicht, waarmee de resonantie-eigenschappen van de gestopte moleculen worden afgetast.

Hoekstra: 'We zullen zien wat dat oplevert en hoe ver we komen. Het dipoolmoment kan niet groot zijn, dat weten we. Gevoelige metingen kunnen bepaalde theoretische uitbreidingen uitsluiten. Dat zou al belangrijk nieuws zijn. Wat het wordt? Ik ben een optimist, maar ook een experimenteel fysicus die weet dat de metingen zullen moeten spreken.'





### Eerste steen voor CERN SCIENCE GATEWAY

In juni werd de eerste steen gelegd voor Science Gateway, het nieuwe bezoekers-centrum van CERN. Het wordt een iconisch, duurzaam gebouw met veel ruimte voor tentoonstellingen, publiekslabs, een groot auditorium, en tal van andere interactieve educatie- en outreachmogelijkheden. De opening van de Science Gateway is gepland in 2023. Honderdduizenden bezoekers per jaar kunnen dan een boeiende reis maken door de wetenschap, de ontdekkingen en de technologie van CERN.

### ATLAS-detector krijgt nu al TWEEDE NEW SMALL WHEEL

De opknappbeurt van de ATLAS-detector gaat na de corona-perikelen op CERN voor-spoedig. In augustus is besloten ook de tweede *New Small Wheel* te plaatsen voordat de LHC-versneller volgend jaar weer start. De *New Small Wheels* zijn twee ruim 9 meter grote schijfvormige muondetectoren die als een deksel aan de twee uiteinden van de ATLAS-detector zitten. Dat is nodig als later de LHC-bundels intenser worden; bovendien wordt er nieuwe elektronica in getest die uiteindelijk in het hele ATLAS-experiment ingezet gaat worden. Afgelopen zomer werd de voltooide NSW-A al ingebouwd. Inmiddels staat vast dat NSW-C aan de andere kant in het najaar wordt geplaatst.



Flavia de Almeida Dias



Jordy de Vries



Jessica Steinlechner

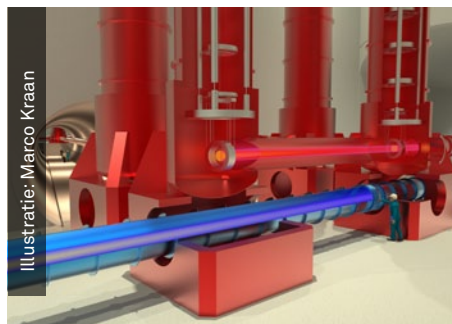
### Nikhef-onderzoekers scoren DRIE NWO-VIDI SUBSIDIES

Met een Vidi-subsidie van elk 800 duizend euro gaan drie jonge Nikhef-onderzoekers de komende jaren hun eigen innovatieve onderzoekslijnen ontwikkelen. Flavia de Almeida Dias (Nikhef en UvA) gaat met de ATLAS-detector bij CERN experimenteel processen bestuderen waarbij twee W- of

Z-deeltjes betrokken zijn. Theoretisch natuurkundige Jordy de Vries (Nikhef en UvA) gaat onderzoek doen naar zogenaamde steriele neutrino's. En Jessica Steinlechner (Nikhef en UM) is betrokken bij het ontwikkelen van verbeterde detectoren voor metingen van zwaartekrachtsgolven, zoals de toekomstige Einstein Telescope.

### Einstein Telescope op EUROPESE ROADMAP

Het European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI) heeft de Einstein Telescope opgenomen in de upgrade van de

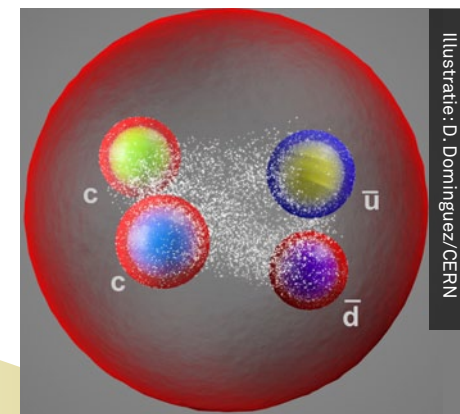


Illustratie: Marco Kraan

routekaart voor 2021. Dit bevestigt het belang van dit zwaartekrachtsgolfobservatorium voor de toekomst van onderzoeksinfrastructuur in Europa en het zwaartekrachtsgolvenonderzoek wereldwijd. Deze officiële Europese goedkeuring brengt het project in een nieuwe fase. De betrokken wetenschappelijke instellingen uit tien landen (België, Duitsland, Hongarije, Italië, Noorwegen, Spanje, Zwitserland, Polen, Nederland en het Verenigd Koninkrijk) zullen nu nóg intensiever werken aan hun onderzoek- en technologieontwikkeling. Ook lopen er bodemstudies die de eigenschappen van de ondergrond van de twee kandidaat-locaties verder in kaart brengen.

### LHCb-experiment ontdekt BIJZONDER TETRAQUARK

In nieuwe metingen van het LHCb-experiment is een spectaculaire piek van een nieuw deeltje te zien dat soms kortstondig ontstaat bij proton-protonbotsingen in de LHC-versneller in Genève. Het bestaat uit twee charm-quarks en een antiup- en anti-down-quark. Doorgaans bestaan deeltjes uit twee of drie quarks, niet uit vier. Tetraquarks worden daarom ook wel 'exotisch' genoemd, en leiden tot veel theoretische discussie omdat ze slecht passen in de theorie van de sterke kernkracht. Ze werden al in de jaren '60 van de vorige eeuw voorspeld, maar pas in 2004 voor het eerst gedetecteerd. Tot nog toe waren



Illustratie: D. Dominguez/CERN

alleen tetraquarks met een charm- en een anticharm-quark bekend, of met maar één charm-quark.

## Jessica Steinlechner wil een hele stille spiegel maken

'Wat ik nu eigenlijk probeer te doen is een hele stille spiegel maken. Die hebben we nodig om in een laserinterferometer zwaartekrachtsgolven te detecteren. Ik ben dan vooral geïnteresseerd in het meten van laagfrequente golven. Deze zijn lastiger te meten omdat er veel ruis om het signaal heen zit, maar met een hele stille spiegel verminder je die ruis. De coating van de spiegel die zorgt voor reflectie bestaat eigenlijk uit een heleboel laagjes: zo zorgt een laagje er bijvoorbeeld voor dat de spiegel niet opwarmt door de laserstralen, en een ander laagje vermindert weer de thermale ruis door de bewe-

gende moleculen in het materiaal zelf.

Het materiaal dat we gebruiken is heel kwetsbaar en duur, dus we kunnen niet zomaar allerlei soorten laagjes maken en die testen. Eerst doen we daarom onderzoek aan de hand van simulaties. Ik ben overigens wel echt een experimenteel natuurkundige en geen theoreticus! Astronomische onderwerpen vond ik wel altijd interessant en het is leuk dat ik daar nu experimenten mee kan doen.

Wat ik vooral hoop is dat we een verrassende meting doen,

iets zien dat we echt niet verwachten. Ik kan natuurlijk ook zeggen dat ik graag dé vrouw achter de spiegel van de toekomstige Einstein Telescope zou willen zijn... maar zo werkt dat niet. We werken in grote collaboraties waar iedereen een steentje bijdraagt. Ook als een bepaalde aanpak niet goed blijkt te werken is die kennis voor iedereen nuttig. Wat dat betreft is de *Gravitational Wave Community* wel bijzonder denk ik; er is

vooral sprake van veel samenwerking en minder van competitie. Tegenwoordig zijn er ook steeds minder barrières die een goede communicatie in de weg staan, zoals taalbarrières of cultu-rele barrières. Wat dat betreft kan de wereld denk ik best een voorbeeld nemen aan de wetenschappelijke community!

Tekst: Maureen Voestermans/Foto: Harry Heuts

Jessica Steinlechner is Nikhef-onderzoeker en universitair docent aan de Universiteit Maastricht





## INHOUD

**2 Renovatie**  
van start

**3 Stan Bentvelsen**  
Werken aan  
verrassingen

**4 Detector R&D**  
Zintuigen voor  
de deeltjesfysica

**10 Marcel Merk**  
Experimentator  
wil alles snappen

**12 XENONnT**  
Verbeterde  
donkere materie-  
detector

**15 Nikhef Alumni**  
in wetenschap  
en maatschappij

**19 Nieuwe resultaten**  
van drie Nikhef-projecten

**23 De droom van**  
Jessica Steinlechner  
over een hele stille spiegel