

Najaar  
2020

Nikhef

Nationaal  
instituut voor  
subatomaire fysica

# DIM ENS IES

## ELEKTRONICA

Van CERN tot in de diepzee:  
geen deeltjesexperiment  
kan zonder printplaten

## THEORIE-GROEP

Het gedrag van deeltjes  
doorgronden met  
pen, papier en krijt



# Neutrinojagers bouwen hun sensorbollen in Amsterdam



In de PIMU-hal van Nikhef op het Amsterdam Science Park is afgelopen zomer de massaproductie gestart van onderdelen voor de reusachtige internationale KM3NeT neutrino telescoop die op de bodem van de Middellandse Zee wordt gebouwd.

Wekelijks kunnen daar acht tot twaalf grote glazen bollen met fotodetectoren worden geassembleerd, die uiteindelijk passerende deeltjes in de donkere diepzee kunnen waarnemen. Deze waterdichte en drukbestendige DOM-bollen (Digital Optical Modules) met een diameter van 40 centimeter en 31 fotobuizen zijn grotendeels door Nikhef ontworpen. KM3NeT komt op twee locaties: voor de Franse en Italiaanse kust.

De PIMU-hal heeft voor Nikhef ook historische waarde. Het betonnen gebouw hoorde lange tijd bij de eigen deeltjesversneller van het instituut langs de Ringdijk. Nadat de versneller zelf in 1998 werd gesloopt, is de PIMU-hal jarenlang door andere instituten gebruikt als lab, maar nu is hij speciaal voor de KM3NeT-productie ingericht.

KM3NeT speurt naar bronnen van neutrino's uit het heelal en kijkt naar de eigenschappen van deze spookachtige deeltjes. De detector bestaat uit honderden drijflijnen op de zeebodem met lichtgevoelige bollen. Het woud van sensorlijnen bekijkt permanent ongeveer een kubieke kilometer donker zee-water. Passerende neutrino's kunnen daarin lichtsporen veroorzaken. Uit de waarnemingen vanuit verschillende bollen kunnen de fysici de sporen reconstrueren.

In Amsterdam worden de DOM's uit onderdelen met de hand samengesteld en getest, en uiteindelijk verbonden aan de

detectorlijnen. Deze lijnen gaan naar de Franse en Italiaanse partners die ze verder afbouwen, en uiteindelijk vanaf een kraanschip op de zeebodem plaatsen en met een onbemande duikboot aansluiten op de voeding en datakabels.

KM3NeT telt nu zes lijnen op 2,5 kilometer diepte, zo'n 40 kilometer uit de kust bij Toulon. Als het weer op zee het toelaat, komen er het komende half jaar nog zeven lijnen bij. Uiteindelijk moeten daar rond 2024 115 detectorlijnen staan, goeddeels *made in Amsterdam*. Het Italiaanse deel volgt later.



## Deeltjes in tijden van corona

Een van de meest bijzondere verhalen in dit nieuwe nummer van het Nikhef-magazine DIMENSIES gaat over de vervanging van een centraal onderdeel van de LHCb-detector op CERN. Normaal zou dat een spectaculaire operatie zijn, met technici die samen geconcentreerd de klus klaren, diep onder de grond in Genève.

Maar in tijden van corona is alles anders.

Ditmaal was er maar een klein team op CERN ondergronds, en reikten Nikhef-engineers via een online videoverbinding de helpende hand. Gewoon vanuit hun werkkamer thuis, in Amsterdam. Het was een operatie op afstand en dat werkte uitstekend.

In maart werd ook op Nikhef in één klap alles anders. Onze medewerkers, staf en studenten werkten als het maar even kon thuis. De gebouwen in Amsterdam en elders lagen er vrijwel verlaten bij. Gereisd werd er niet en conferenties werden online gehouden. Tegelijk kwam op Nikhef het wetenschappelijke leven zelf niet tot stilstand. Het onderzoek ging online verder, onderwijs en begeleiding gebeurden op afstand. In de virtuele huiskamer van het instituut organiseerden we lezingen, discussies en lunchconcerten. Het datacenter rekende aan het coronavirus en er waren zelfs collega's die medische beadingsapparatuur ontwikkelden.

De coronacrisis komt op een moment dat de deeltjesfysica zichzelf opnieuw aan het uitvinden is. In Europees verband wordt nagedacht over de toekomst van het vak en de experimenten. Ook Nikhef is daarbij actief betrokken. In dit nummer legt Eric Laenen uit hoe de Europese deeltjesfysica de weg voorwaarts zoekt en vindt. Nieuwe technieken zullen daarbij essentieel zijn. Nikhef heeft een aantal technische groepen die daarin toonaangevend zijn, en de afdeling Elektronica Technologie is er daar een van. Deze DIMENSIES portretteert de groep aan de hand van vijf markante printplaten en de mensen achter dat werk.

Ook elders in dit magazine zien we weer veel gezichten. Dat is niet toevallig want deeltjesfysica is in alle opzichten mensenwerk. Gedreven mensenwerk, van technici, experimentatoren en theoretici. Ook in moeilijke tijden.

**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 2020

### REDACTIE

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

### AAN DIT NUMMER WERKTEN MEE

Thijs Balder (illustraties), Ronald Blinderman (foto's), Gino Hoft (foto's), Marco Kraan (foto's), Dorine Schenk (tekst), Bas Uterwijk (foto's), Maureen Voestermans (tekst), Gieljan de Vries (tekst)

### ONTWERP EN VORMGEVING

Enchilada (ontwerp), Naïm Niebuur studio (vormgeving)

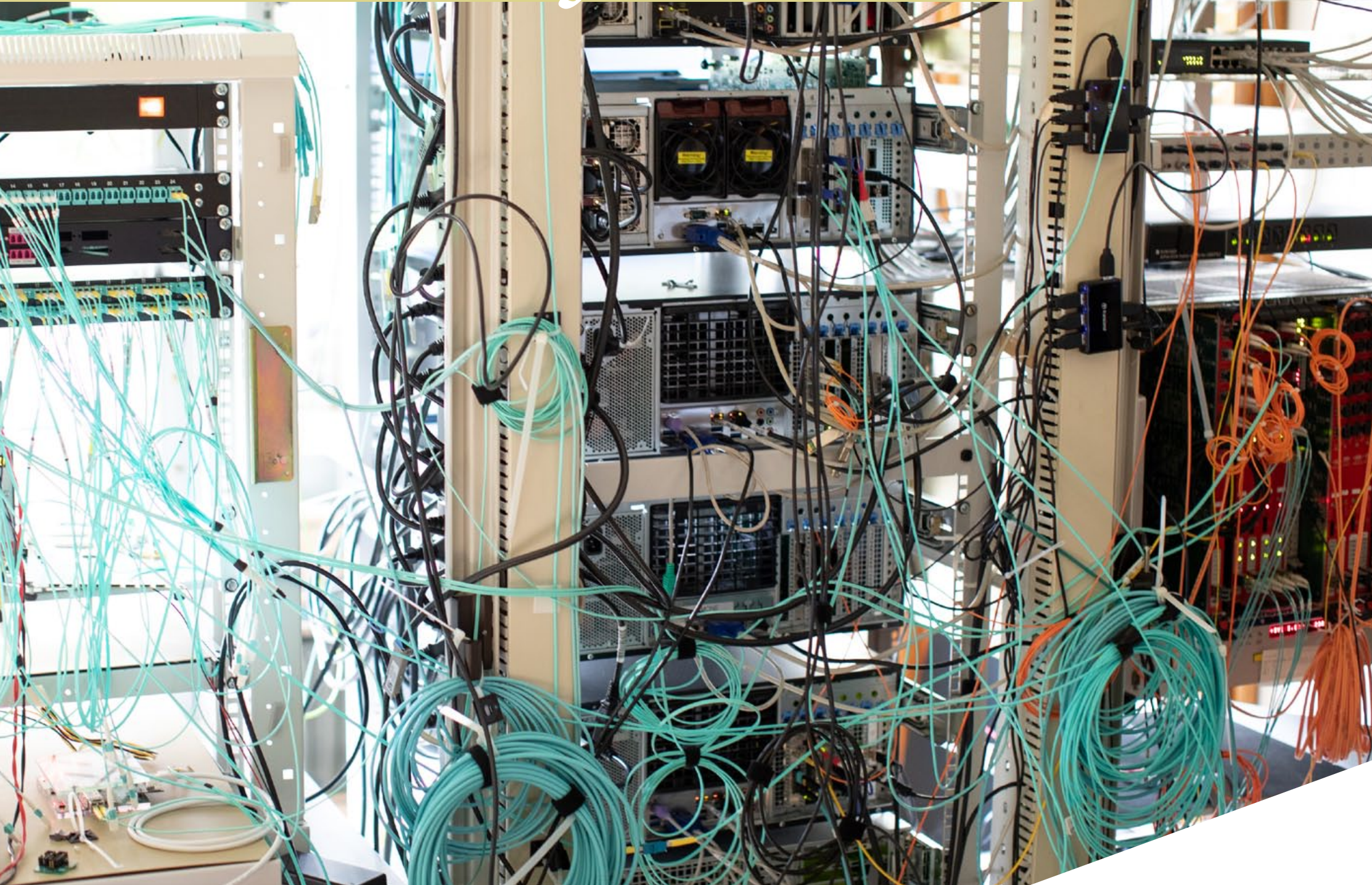
### OP DE COVER

Nikhef-promovendus Anders Rehult in gesprek met groepsleider Robert Fleischer en collega Eleftheria Malami  
Foto: Bas Uterwijk



Van de deeltjesdetectoren op CERN tot de neutrinotelescoop in de Middellandse Zee: elektronica van Nikhef is overal. Een groepsportret met vijf spraakmakende printplaten.

# De signaalverwerkers van Nikhef



Tekst: Martijn van Calmthout  
Foto's: Bas Uterwijk, Gino Hoft, Ronald Blinderman

Her en der staan ze op Nikhef in trotse glazen uitstalkasten op de gangen: printplaten van de afdeling Elektronica Technologie. Een buitenstaander loopt gemakkelijk voorbij aan de groene en rode borden vol weerstanden met kleurcodes, verticale condensatoren, ledjes, zwarte chips met talloze pootjes, fijne metaallijntjes en stekkertjes. Maar aan ieder ontwerp is vaak vele jaren intensief en geconcentreerd teamwerk voorafgegaan, vertelt groepsleider Ruud Kluit in zijn kleine kantoor op het instituut.

Voor de leek hebben de kunstige prototypes eigenlijk wel wat weg van miniatuursteden vol piepkleine gebouwen, kerken en fabrieken, wijken met rijtjeshuizen, rondwegen en kruispunten.

Geen gekke vergelijking, benadrukt Kluit, die zijn mensen inderdaad wel eens met bouwkundigen vergelijkt. Alleen zijn de kantoren en woonwijken hier elektronische componenten, die elektrische en optische signalen opzuigen, bewerken en weer uitspuwen. De stad is geen stad maar een systeem om signalen uit de deeltjeswereld, opgepikt door detectoren, te verwerken tot grondstof voor wetenschap. Pas dan kan immers de interpretatie en analyse en dus de natuurkunde beginnen.

'Zonder elektronica geen metingen en geen wetenschap', zegt Kluit, zelf een ervaren elektrotechnisch ingenieur, trots. Kluit leidt een groep van ongeveer 25 elektronici die op allerlei manieren betrokken zijn bij deeltjesexperimenten wereldwijd. Nikhef is er een graag geziene partij, zegt de groepsleider.

'We zijn een relatief groot instituut met meerdere specialisaties die je bijvoorbeeld op een universiteit niet snel zult aantreffen.' Door sterke interne samenwerking kunnen de ontwerpers onderling steunen op elkaars specialismen en ervaring.

## Programmeerbaar

Ruwweg is de groep verdeeld over drie gebieden.

Er is de analoge elektronica voor bijvoorbeeld voeding, de meest klassieke vorm van elektrotechniek. Dit is de sectie waar nog het vaakst wel eens ouderwets gesoldeerd wordt.

Daarnaast is er een groep specialisten voor programmeerbare digitale elektronica, meer en meer de standaard in de elektronische signaalverwerking.

En er zijn ontwerpers die zelf *integrated circuits* (chips) componeren, op maat voor de specifieke verlangens en eisen van gebruikers. Sensoren bijvoorbeeld, die als een fotochip passerende deeltjes registreren op duizenden pixels. Waarvan de pixels zelf ook weer gecompliceerde microelektronica zijn.

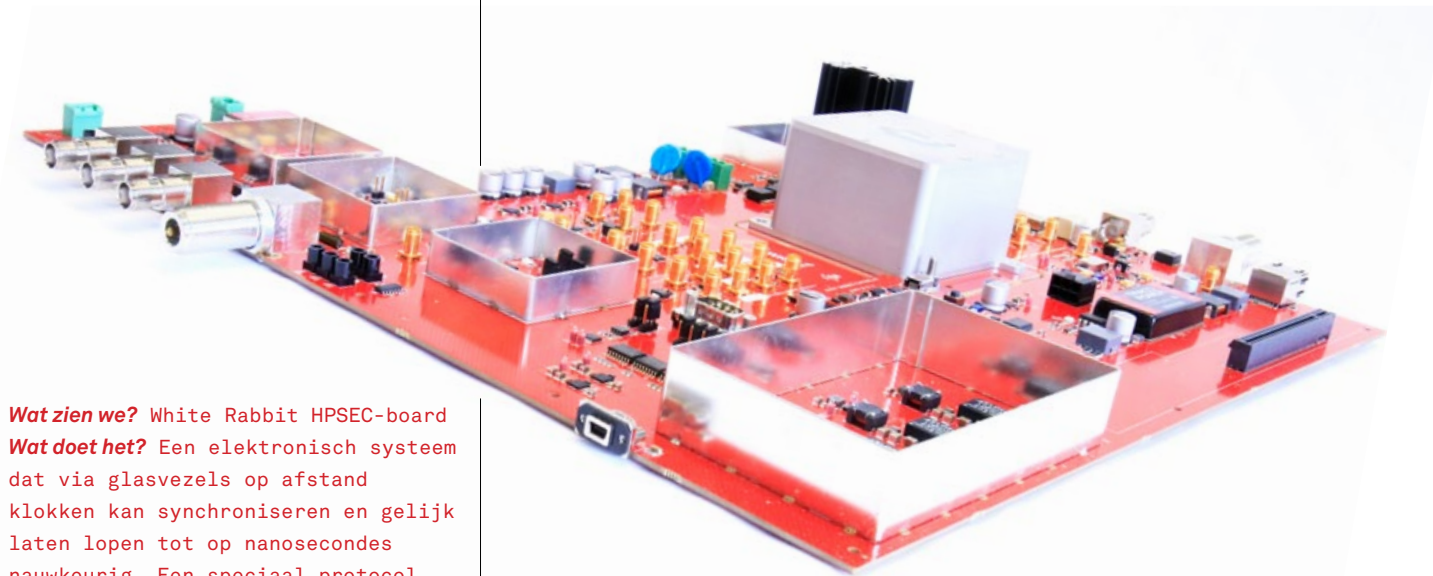
Het werk van de afdeling speelt zich meer en meer achter beeldschermen af, aan de hand van onwaarschijnlijk gecompliceerde schema's en menu's. Op de gangen van de groep heerst om die reden meestal een serene, geconcentreerde kalmte.



Ruud Kluit



## WHITE RABBIT



**Wat zien we?** White Rabbit HPSEC-board  
**Wat doet het?** Een elektronisch systeem dat via glasvezels op afstand klokken kan synchroniseren en gelijk laten lopen tot op nanosecondes nauwkeurig. Een speciaal protocol met signalen en tijdstempels zorgt dat looptijden van signalen in kabels en onderdelen geen rol meer spelen, en stuurt desnoods bij.

**Waar zit wat?** Het witte blok is de centrale oscillator voor de schakeling. Rechtsachter de aansluiting voor het SPEC7-controlesysteem. Linksvoor de output voor het kloksignaal.

**Wiens werk?** Nikhef neemt deel in een internationaal White Rabbit onderzoek consortium, met onder meer CERN en GSI in Darmstadt. Op de foto elektronica engineer Peter Jansweijer.

**Toepassingen?** White Rabbit is sinds dit jaar door het internationale ingenieursverbond IEEE bestempeld tot de internationale synchronisatiestandaard IEEE-1588 voor klokken. Versneller-experimenten en grote radiotelescopie hebben belangstelling om detectoren ermee gelijk te zetten. Bij Nikhef kun je denken aan de KM3NeT-detector in de Middellandse Zee en misschien de toekomstige Einstein Telescope. Metrologische instituten bieden via White Rabbit kopieën van hun atoomklok aan voor onderzoek, en de financiële wereld is geïnteresseerd in tijdgevoelige transacties.

**Fun fact?** Niets is geheim aan White Rabbit. Iedereen kan deze “open hardware” gebruiken en er verder aan sleutelen en verbeteren, mits ook dat werk weer openbaar is.



Peter Jansweijer

- ▶ Maar er zijn ook specialisten in datacommunicatie, optica-experts, en coördinatoren voor contacten met leveranciers en industrie, die de ontwerpen van Nikhef uiteindelijk in voldoende aantallen moeten gaan produceren voor de experimenten. Allemaal mannen, bekent Kluit, die dat graag wel wat diverser zou zien. ‘Wat je wel ziet zijn heel verschillende karakters. Een specialist krachtstroom denkt echt anders dan een digitale ontwerper. Maar je hebt verscheidenheid nodig: knutselaars en denkers.’

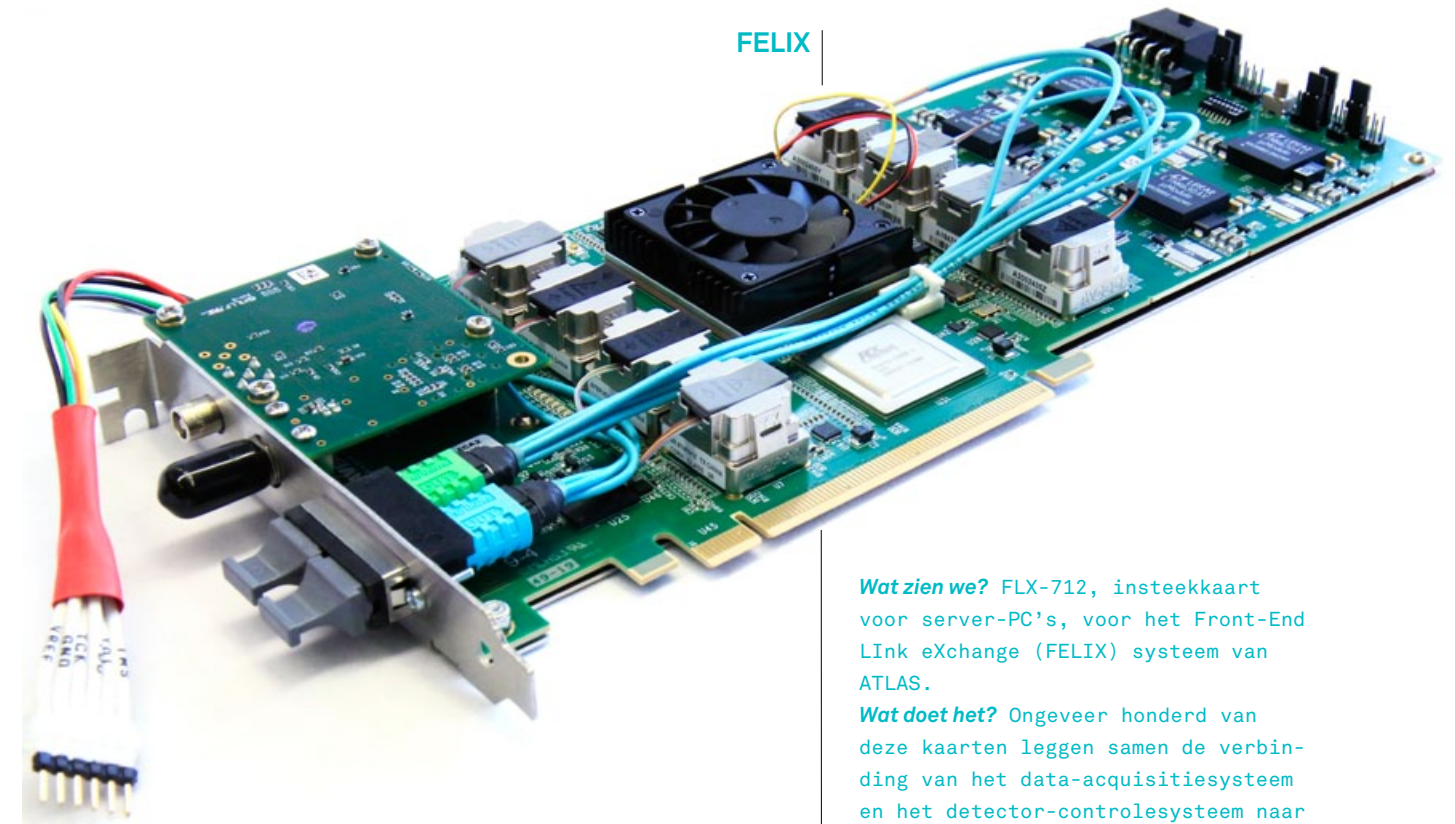
## Elektronica op maat

Het werk van de afdeling, schetst hij, draait allemaal om die specifieke eisen die de wereld van de deeltjesfysica met zijn hectische deeltjesbotsers en haast onvangbare signalen nu eenmaal aan elektronica stelt.

‘De experimenten in dit vak hebben heel andere omstandigheden en randvoorwaarden dan elektronica in je TV, PC, auto of mobieltje. Stralingsniveau’s in versnellerexperimenten die veel te hoog zijn voor gewone commerciële elektronica. Warmte-ontwikkeling, waardoor speciale koeling nodig is.’

Kluit: ‘Elektronica voor dat soort heftige en onbereikbare plaatsen zul je zelf moeten ontwerpen en bouwen of laten bouwen. Die kun je niet zomaar kopen.’

## FELIX



**Wat zien we?** FLX-712, insteekkaart voor server-PC’s, voor het Front-End LInk eXchange (FELIX) systeem van ATLAS.

**Wat doet het?** Ongeveer honderd van deze kaarten leggen samen de verbinding van het data-acquisitiesysteem en het detector-controlesysteem naar de detectoren en triggersystemen in de ATLAS-detector.

**Waar zit wat?** De zwarte ventilator koelt de programmeerbare Xilinx FPGA-chip, waar de signalen worden verwerkt. Op de groenblauwe bus rechtsvoor een aansluiting voor 48 glasvezels naar de detectoren.

**Wiens werk?** Bij Nikhef dragen ongeveer 14 personen bij aan het project, zowel in Amsterdam als Nijmegen. Op de foto elektronica engineer Frans Schreuder.

**Toekomst?** Na de volgende lange shutdown van de LHC-versneller op CERN (2025-2027) wordt FELIX in gebruik genomen in ATLAS.

**Fun fact?** Een programma van meer dan 25 duizend regels in de computertaal VHDL is nodig om de vereiste functionaliteit in de programmeerbare FPGA-chip te realiseren.

Experimenteel natuurkundigen hebben nogal eens de neiging om het liefst alles zelf te bedenken, weten de elektronici als geen ander. Maar voor het soort elektronica dat in deeltjesexperimenten wordt gebruikt, is dat inmiddels ondenkbaar. Daarvoor is de techniek te gespecialiseerd geworden en is hoge betrouwbaarheid een eis.

Het grappige, zegt Kluit, is dat toen hij twintig jaar geleden begon, er ook sprake was van (hij maakt aanhalingstekens in de lucht) “gecompliceerde systemen”. Kluit: ‘Alleen had je het toen over kasten of kamers vol elektrische schakelingen. Nu zit dat allemaal piepklein op een enkele printplaat of zelfs in een enkele chip. Complexiteit die alleen nog te handlen is met ontwerpsoftware. Een wereld die zijn eigen gereedschappen en manieren van denken en ontwerpen vraagt.’

Gesoldeerd wordt er nog maar zelden. Veel hedendaagse elektronica komt neer op het slim en effectief combineren van bestaande basiscomponenten. Ontwerpers kiezen uit een zee van mogelijkheden de juiste componenten, bouwen die samen, en testen of het geheel de juiste functies vertoont en aan de eisen van het experiment voldoet.

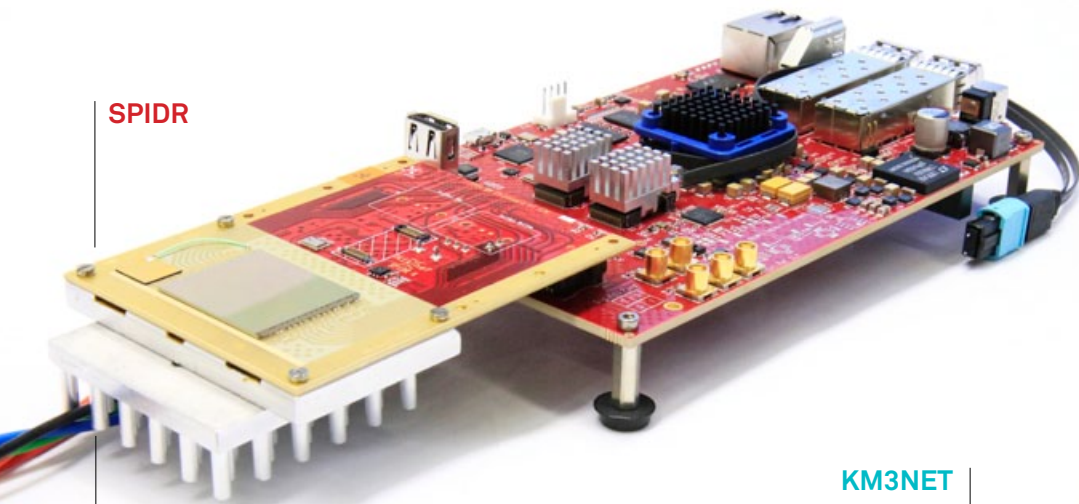
Centraal in heel veel van die ontwerpen staat tegenwoordig programmeerbare hardware: digitale microchips waarvan de functie naar believen kan worden gedefinieerd



Frans Schreuder



## SPIDR



**Wat zien we?** SPIDR circuit board  
**Wat doet het?** Elektronisch uitleessysteem voor de signalen die komen van zogeheten pixeldetectors: grote chips met een raster van sensoren die als een camera passerende deeltjes registreren, bijvoorbeeld omdat ze een elektrische ontlading geven. Haalt inmiddels datasnelheden van 160 Gbit per seconde.  
**Waar zit wat?** Linksvoor de TimePix4 ASIC sensor. Centraal onder het blauw-zwarte koelblok de programmeerbare Xilinx ZYNQ FPGA-chip. Rechts een 10 Gbit/s optische datalink.  
**Wiens werk?** Nikhef speelt een rol in de wereldwijde Medipix-collaboratie. Op de foto engineer digitale elektronica Bas van der Heijden.  
**Toepassingen?** De pixelchip-technologie kent veel toepassingen, onder meer in de medische wereld of elektronenmicroscopie en in detectoren in de deeltjesfysica. Bijvoorbeeld in het antimaterie-experiment ASACUSA op CERN.  
**Fun fact?** SPIDR is zo multifunctioneel als een Zwitsers zakmes. Voor specifieke toepassingen volstaan meestal eenvoudiger versies.

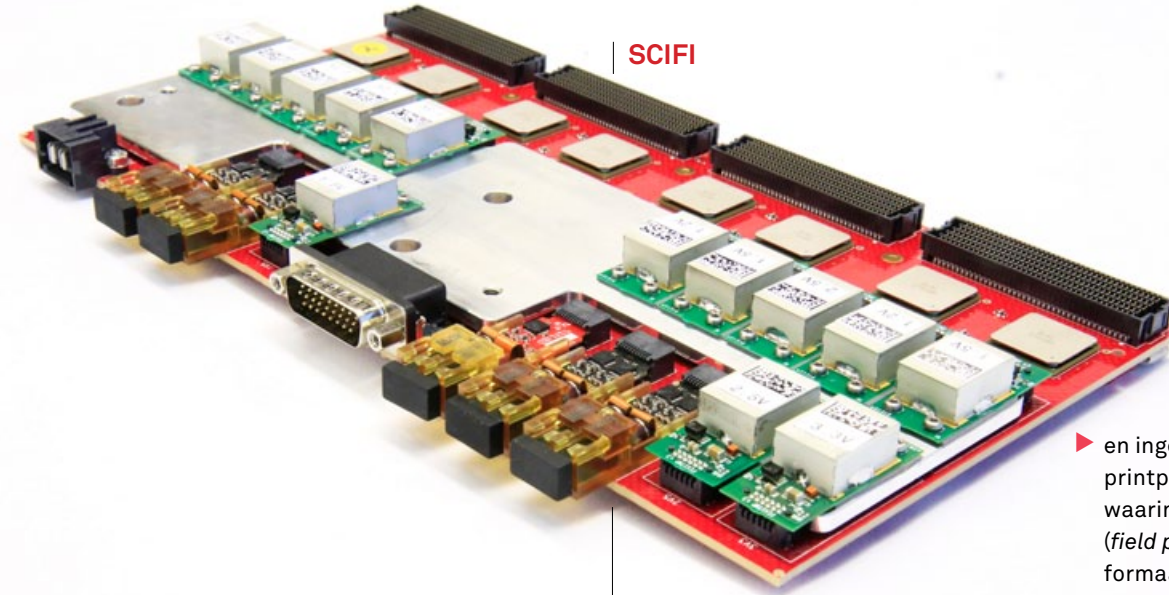
## KM3NET



**Wat zien we?** KM3NeT photomultiplier tube (PMT) met base printplaat  
**Wat doet het?** Verzamelt en transporteert via glasvezels en slimme multiplex-protocollen signalen van duizenden lichtdetectoren in honderden glazen bollen die samen in de diepzee de neutrino telescoop KM3NeT vormen. Moet low power, onderhoudsvrij, robuust en plug-and-play zijn.  
**Waar zit wat?** De glazen buis is de PMT die licht in elektronen omzet. Het zilveren blokje op de PMT base levert de hoogspanning voor de buis. Schakelingen er omheen versterken en digitaliseren het meetsignaal.  
**Wiens werk?** Antonio D'Amico (op de foto), Paul Timmer en Jan-Willem Schmelling zijn design engineers bij Nikhef, die gespecialiseerd zijn in datanetwerken voor neutrino projecten als KM3NeT waarin Nikhef een hoofdrol heeft.

**Toepassingen?** KM3NeT gebruikt standaard optische kabels, transceivers en optische componenten uit de telecomwereld om een speciaal ontworpen glasvezelnetwerk te bouwen.  
**Fun fact?** Om zeker te weten dat optische technieken over grote afstanden doen wat ze moeten doen gebruiken ontwerpers bij tests in het lab tot wel 80 transceivers tegelijk om alle golflengten over klossen van soms wel honderd kilometer glasvezel te sturen.

## SCIFI



**Wat zien we?** SciFi masterboard  
**Wat doet het?** Verbindingscentrum van de op Nikhef geconstrueerde SciFi-modules in de LHCb-detector op CERN. Haalt lichtsignalen uit de lichtgevende sensoren op en zet ze om in elektronische signalen. Stuurt tegelijk de detectormodules elektronisch aan.  
**Waar zit wat?** Het rode 16-laags circuit board verbindt alle 3304 componenten van het masterboard. Dertien blokjes bevatten alle voedingen, samen goed voor 55 watt. Acht chips achteraan zetten de signalen om in optische signalen. Rechtsvoor aansluitingen om de detector elektronisch te besturen.  
**Wiens werk?** Wilco Vink (op de foto) is sinds 1999 specialist digitale elektronica bij Nikhef en is betrokken bij de ingrijpende verbouwing van de LHCb-detector, die nieuwe structuren, elektronica en software vereist.  
**Toepassingen?** In totaal worden 256 readout-modules met in totaal 570 elektronica-borden voor LHCb geproduceerd door een industriële partij, die stuk voor stuk worden getest op CERN en Nikhef.  
**Fun fact?** Nikhef houdt SciFi ook koel. De elektronica op de kopse kant van de platen is geïntegreerd met een fijnmazig 3D-geprint koelelement, een speciaal Nikhef-ontwerp.

en ingesteld door de ontwerper. Op veel printplaten is de platte vierkante chip waarin dat gebeurt, een zogeheten FPGA (*field programmable gate array*) met het formaat van een fikse postzegel, goed herkenbaar.  
 Speciale software stelt de ontwerpers in staat de miljarden basisschakelingen in het silicium van zulke FPGA's functioneel met elkaar te verbinden en de werking te simuleren. De ontwerper kan die onmogelijk nog allemaal zelf in korte tijd bedenken en gebruikt een soort programmeertaal die de computer vertaalt naar een fysiek netwerk van logische basiscircuits. Voor eigen chips, bij de *integrated circuits*-ontwerpers, geldt dat nog sterker. En zelfs voor het efficiënt ontwerpen van de printplaten zijn nu computers en software nodig.

## Bossen kabels

En uiteindelijk zullen gespecialiseerde fabrikanten de ontwerpen in tastbare chips en printplaten omzetten. De printplaten, zegt Kluit, vormen een wereld op zich waar verbindingen invloed hebben op de functionaliteit. 'Ook daar heeft de ontwerpsoftware een enorme ontwikkeling doorgemaakt', zegt Kluit.  
 Elders in het gebouw heeft de Elektronica-groep een aantal labs waar de systemen kunnen worden opgebouwd en doorgemeten en getest, samen met software en eventuele detectoronderdelen. Overal knippen daar leds, loeien koelventilatoren en liggen bossen netwerkkabels. Een goed ontwerp van tekentafel tot getest prototype vergt jaren werk van een heel team, verzekert Kluit.  
 Bijzonder daaraan is dat veel hedendaagse elektronische ontwerpen eigenlijk nooit echt af zijn. Er kan altijd nog iets verbeterd worden, of een nieuwe functionaliteit toegevoegd in programmeerbare logica, verouderde componenten raken op, of er zijn domweg betere. Maar vanzelf gaat een verbetering nooit, zegt Kluit. 'Soms zegt een onderzoeker tegen ons: als je het nou even zus en zo doet. Maar zo werkt het echt niet. Het woord "even" bestaat niet in betrouwbare elektronica op maat.'

Bas van der Heijden

Antonio D'Amico

Wilco Vink



# De Strateeg

In juni publiceerden de Europese deeltjesfysici hun nieuwe strategie voor de toekomst. Nikhef-theoreticus *Eric Laenen* schreef als Nederlandse CERN-delegate en lid van de European Strategy Group mee aan de plannen. ‘Best emotioneel soms.’

Tekst: Martijn van Calmthout  
Foto: Bas Uterwijk

Bij de openbare eindstemming in de CERN-raad, vrijdag 19 juni rond het middaguur, voelde je een rilling door de bijeenkomst gaan. ‘Hier en daar werd zelfs wel een traantje weggepinkt’, zegt Nikhef-onderzoeker Eric Laenen, lid van de CERN-raad die die dag unaniem voor stemde. ‘Er viel een last van mensen af. Er was opluchting. Twee jaar praten, schrijven, overleggen, herschrijven, masseren, best emotioneel soms en inspannend, en we waren er toch maar uitgekomen. Een mooi moment, ook voor de deeltjesfysica.’

Het is maar een kort document, de European Particle Physics Strategy Update. Hierin worden plannen voor de middellange en lange termijn voor de Europese deeltjesfysica uiteengezet. Het gaat over toekomstige versnellers en detectoren en de R&D die hiervoor nodig is. Maar ook over de centrale rol van CERN in het deeltjesonderzoek, over perspectief voor jonge onderzoekers, over milieu en klimaatimpact. Ambitieuze, noemen de auteurs hun werk zelf.

***In de media is de hele strategie-update veelal samengevat als een plan voor een nieuwe superversneller op CERN. Is dat terecht?***

‘De update is een gebalanceerd document, met meerdere onderwerpen en invalshoeken. Het ligt in de rede dat de buitenwereld de gedachten over nieuwe versnellers eruit pakt. Soms iets te stellig, want er is geen groen licht voor een 100 kilometer versneller in Genève, zoals sommige kranten schreven. Er is wel een visie op de beste weg voorwaarts voor de Europese deeltjesfysica. En een plan van aanpak om te kijken hoe dit te doen.’

***Wat is die beste weg voorwaarts?***

‘Om te beginnen zal alles uit de LHC-versneller geperst worden wat erin zit. Een hoge prioriteit daarna is om het higgs-deeltje in verder detail te leren kennen. Daarvoor wil je liefst een versneller die puntdeeltjes als elektronen en positronen laat botsen. Dat kan een nog grotere cirkelversneller zijn of een lineaire versneller, zoals in Japan wordt overwogen. En voor de verdere toekomst wil je naar een veel hogere botsingsenergie, om nieuwe gebieden te verkennen.’

***En het plan van aanpak?***

‘Het verre perspectief is een deeltjesbotser met protonen bij heel hoge energie,

een versneller met een omtrek van 100 kilometer. Maar dat soort technologie moet nog worden ontwikkeld. Wat je kunt doen is diezelfde 100 kilometertunnel eerst gebruiken voor een elektronenbotser. Een stappenplan dus.’

***Maar de opvolger van de LHC komt zeker op CERN in Genève?***

‘Europa is wereldleider in de deeltjesfysica met dank aan de bindende rol van CERN. Met een eigen *flagship machine* kan CERN die verbindende rol voortzetten. Dat is goed voor de Europese wetenschap, en ook voor de technische innovatie, of het hoger en technisch onderwijs in Europa. En zelfs cultureel is dat belangrijk, CERN brengt historisch saamhorigheid, zelfs tussen politieke vijanden.’

***Als er nog geen groen licht is voor zo’n reusachtige versneller, wat is er dan wel?***

‘Een visie. Het begint nu met een haalbaarheidsstudie van een FCC-versneller, een Future Circular Collider in een tunnel van 100 kilometer. Wat kost zo iets? Is het technisch te doen? Welke technologie ontbreekt nog? De R&D voor de noodzakelijke technologie, wellicht met weer veel toepassing, heeft een hoge prioriteit. Dat wordt de basis voor eventuele voorstellen om uiteindelijk echt iets te gaan bouwen.’

***En intussen denkt Japan na over een lineaire elektronversneller als higgsfabriek. En overweegt China naar verluidt een eigen supercirkelversneller.***

‘De update vertelt wat de Europese deeltjesfysici denken dat er nodig is. Dat is van wereldwijd belang. Maar we houden nadrukkelijk deuren open en steunen waar nodig initiatieven. Niet voor niets hadden we waarnemers uit Azië en Noord- en Zuid-Amerika bij onze beraadslagingen. Maar laat ik eerlijk zijn: wat anderen doen geeft onzekerheid en heeft het proces er de afgelopen twee jaar niet makkelijker op gemaakt.’

***Is het eigenlijk niet wat vreemd om nu plannen te maken voor de natuurkunde van over 40 tot zelfs 60 jaar?***

‘Dit soort projecten vraagt echt heel veel tijd, dus je ontkomt niet aan plannen maken voor de verre toekomst. Maar tegelijk is er nog heel veel flexibiliteit en ruimte

voor aanpassingen. Er is nog geen tunnel, de vereiste magneten voor zo’n hadronmachine bestaan nog niet eens. Er is een idee hoe we het beste verder kunnen gaan vanuit CERN, de LHC en de huidige natuurkunde.’

***Is de strategie eigenlijk veranderd ten opzichte van de vorige versie, die zes jaar geleden gemaakt is?***

‘Er zijn zeker verschuivingen. Het higgsdeeltje is een prioriteit geworden. Destijds was neutrinofysica een nieuw element, dat wordt nu al gedaan als ondersteuning voor neutrinofysica in de VS en Japan. Daarnaast is er veel meer aandacht voor open science, en voor energie en milieu. Dat zijn geen mooie woorden, dat zijn vanaf nu vaste aandachtspunten bij nieuwe projecten. Kan het energieverbruik niet lager? Reizen we niet veel te veel heen en weer? En de sociale component, zoals perspectieven voor jonge onderzoekers en de aansluiting bij technisch onderwijs.’

***Er wordt ook gewezen op de belangrijke rol van de astrodeeltjesfysica.***

‘Het heelal versnelt deeltjes harder dan wij ooit kunnen. Maar je kunt niet zelf aan de knoppen draaien. CERN, zeggen veel landen, moet zich op versnellers concentreren. Het idee is daarom dat astrodeeltjes toch meer een zaak van de landen zelf zal blijven, maar er is veel steun voor samenwerken met astrodeeltjesfysica-experimenten via CERN middels technische expertise en infrastructuur.

***Wat betekent de nieuwe strategie eigenlijk voor Nederland?***

‘Nikhef brengt in Nederland het deeltjesfysisch onderzoek bij elkaar, en veel daarvan heeft rechtstreeks te maken met het versnellerwerk in Genève en elders. Op hoofdlijnen sluit dit strategische plan aan bij de Nederlandse praktijk. Maar Nikhef bepaalt zijn eigen strategie, en is intern ook in gesprek over prioriteiten en de koers. Ikzelf zou graag zien dat we ook een veel sterkere relatie bouwen met hbo en mbo, technische opleidingen. CERN is een uitgelezen plek om de nieuwste technieken tegen te komen en ook mee te ontwikkelen. Het is niet alleen een prachtplek voor universiteiten. Het is een walhalla voor technici.’





# Installatie met hulplijn



**Honderd meter onder de grond ploeteren in een maanpak, met een mondmasker op en drie lagen handschoenen aan. Zo installeerde Nikhef-technicus Freek Sanders halverwege mei twee flinterdunne detectorhouders in CERN's antimateriejager LHCb. Made at Nikhef in een proces van jaren. Drie videoconferencende collega's hielpen Sanders tijdens de installatie over onverwachte hobbels heen.**

Waar is alle antimaterie gebleven? In theorie moet er voor elk deeltje in het heelal een spiegeldeeltje zijn met dezelfde massa en omgekeerde lading. Maar moeder natuur heeft een duidelijke favoriet; anti-materie is er maar nauwelijks. CERN's opgevoerde LHCb-experiment moet helpen verklaren waarom. 'De hoop', zegt technicus Freek Sanders, 'is om zo inzicht te krijgen in natuurwetten die nog niet in het Standaardmodel zitten.'

'Het verschil tussen materie en antimaterie is extra goed zichtbaar bij het verval van het subatomaire beauty-quark', legt LHCb-fysicus Kazu Akiba van Nikhef uit. Het LHCb-onderdeel VELO (de *Vertex Locator*) kan die beauties spotten in de zee van nieuwe deeltjes die ontstaan in de LHC-versneller. Twee aluminium dozen van minder dan een kwart millimeter dik beschermen de detector tegen straling van de versneller en geleiden de radiofrequente RF-pulsen die de deeltjesbundel in vorm houden. Nikhef freesde deze haardunne *RF boxes* - 'folies', zeggen de technici - en verzorgde de installatie in LHCb.

## Maandenlang schaven

Onder inspirerende begeleiding van fysicus Tjeerd Ketel maakte fijnmechanicus Willem Kuilman van Nikhef de VELO-omhulling door nauwgezet blokken aluminium van 335 kg uit te frezen. Een proces van maanden per folie, waarbij

Kuilman soms dagen kwijt was aan het weg-halen van een extra laagje aluminium. 'Zoiets hadden we nog nooit gedaan', bekent hij. 'We hebben heel wat geëxperimenteerd voor we deze precisie haalden. Nu kunnen we tot een kwart millimeter dun.'

'Hoe dunner het metaal, hoe minder last onze deeltjes ervan hebben en hoe beter de meetresultaten', zegt Akiba. Daarom werden de folies bij aankomst in CERN nog eens een tiende millimeter dunner geëetst, tot 150 micrometer: maar twee haren dik. 'Daar was ik in eerste instantie niet zo blij mee', herinnert Kuilman zich. 'Er is toch een risico dat je dan door de wand heen gaat.'

Het etsen ging voorspoedig, en in maart stonden de dozen klaar voor installatie... precies toen heel CERN in corona-lockdown ging. Tricky, want de dunne dozen met hun speciale coating zijn kwetsbaar. 'Alleen in het vacuüm van de detector staan ze écht veilig', peinst Akiba. Pas in mei kon de installatie doorgaan.

## Met mondkapje en irisscan

Voor hij de folies kan installeren, moet Freek Sanders eerst langs een irisscanner. Daarna de lift, 103,5 meter naar beneden met maximaal twee mensen tegelijkertijd om veilig afstand te kunnen houden. Beneden is een tweede beveiligingspoortje naar de machinekamer van LHCb.

Bovenop de standaard stralingsbescherming hanteert CERN nu ook strenge coronaregels. De installatie door Sanders en twee technici van CERN was een test voor die nieuwe werkwijze: 'We hadden mondkapjes, witte pakken, een helm en drie lagen handschoenen om schoon en virusproof te werken - we leken wel astronauten.'

De installatie van de RF-folies was stressvol, bekent de technicus. 'In elke folie zit een half jaar werk, plus vooronderzoek. Dat is een hoop energie en liefde in

een vrij gevoelig pakketje.' Door de coronamaatregelen konden Nikhef-experts die VELO goed kennen nu niet naar CERN komen. Via een videoverbinding konden engineers Martin Doets en Marco Kraan en fysicus Kazu Akiba toch meekijken en advies geven.

## Tegenslag

Die hulplijn bleek een slim idee. Halverwege de installatie moesten de twee RF-folies aan een hijsframe met millimeters speling in de omliggende tank zakken. 'En toen', verzucht Sanders, 'kwamen we erachter dat er ergens een lasnaad van een paar millimeter zat. Net teveel om onze folies langs te laten.'

Na overleg met het team in Amsterdam werd besloten om de twee folies los te maken van hun starre hijsframe en ze iets in te duwen. Zo konden ze net langs de lasnaad. Riskant, want de folies mochten geen krassen oplopen. Ook met twee back-up folies was dat spannend.

'Dokter Bibber met een miljoenenspel', huivert Sanders. 'Ik wist: als ik dit verpest, dan moet ik alles weer afmonteren en boven in de cleanroom opnieuw in elkaar zetten.' Het ging goed, dankzij engelen-geduld. Weken later klinkt Sanders nog steeds opgelucht: 'Het moeilijkste was achter de rug.'

## Inregelen

Wanneer de LHC-versneller weer opstart in 2021 of 2022, brengt LHCb de antimaterie nauwkeuriger dan ooit in kaart. Tegelijkertijd begint het VELO-team aan het ontwerp van RF-folies die drie keer dunner zijn dan de bestaande set, om de bestudeerde deeltjes nog minder te verstrooien. 'Eerst maar eens de detectormodules installeren en het hele systeem vacuüm pompen', denkt fysicus Kazu Akiba: 'Deze installatie was een hoogtepunt in een lang, pittig project.' ◀



# Denken aan deeltjes (en daar voorbij)

Pen, papier, een schoolbord, computers en elkaar: meer hebben theoretisch natuurkundigen van Nikhef niet nodig bij hun missie om de deeltjeswereld te doorgronden tot ver achter de komma.



V.l.n.r. Robert Fleischer, Eleftheria Malami en Anders Rehult

van verschijnselen. Soms door de oog-haren in zogeheten *effective field theories*. Soms juist doorgerekend tot in extreme precisie. Metingen testen de theoretische voorspellingen. Verschijnselen vragen om theoretische verklaringen. Die weer met metingen getest horen te worden.

Zoiets vergt een doorlopende dialoog tussen de theoretici en de experimentatoren. Wat kan er het beste gemeten worden? Hoe wordt er gemeten? Wat is de verwachte uitkomst? En wat zegt de meting over de theorie?

Tegelijk, zegt Fleischer ook, is de theoriegroep van Nikhef geen serviceafdeling voor de experimentele groepen van het instituut. 'Een theoriegroep heeft ook een heel eigen bestaansrecht. We stellen algemenere vragen die voor een experiment snel te ver voeren. Wij kijken van nature graag naar de grote verbanden. Is het effect dat we hier verwachten niet veel universeler? En als we hier iets zien, speelt dat dan elders ook door? In de neutrinosector? In de oerknal?'

Het verbindende element is het zogenoemde Standaardmodel van de deeltjesfysica, een elegante theorie die verbanden geeft tussen de drie basiskrachten in de deeltjeswereld: de sterke, zwakke en elektromagnetische wisselwerking. Het model kent zeventien bouwstenen: een groep van vier krachtdeeltjes en drie haast

identieke families van telkens twee quarks en twee leptonen. Plus het higgsdeeltje. Theoretici zijn gefascineerd door de samenhang en de symmetrieën binnen het model van het universum.

## Het verhaal is niet af

In grote lijnen werkt het Standaardmodel geweldig goed, er is geen experiment dat het faliekant tegenspreekt. Toch weet elke fysicus dat het nooit het hele verhaal kan zijn. De zwaartekracht ontbreekt in de theorie, donkere materie komt er niet in voor terwijl het heelal er vol mee zit. En waarom is er wel materie en nauwelijks antimaterie?

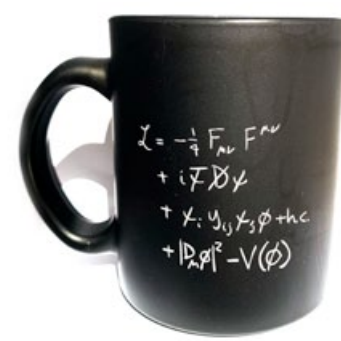
De vraag is dus hoe de wereld voorbij het Standaardmodel eruitziet. Om die vraag te beantwoorden speuren experimentatoren naar nog onbekende deeltjes. En theoretici zoeken aanwijzingen voor een betere theorie vooral in de fijne details van het model. Het zogeheten zepto-universum op schalen van een miljardste van een miljoenste meter.

'Precisie is ons belangrijkste instrument', zegt Fleischer. 'Je denkt misschien dat meer cijfers achter de komma niet veel toevoegen. Maar juist daar kan de invloed van nog onbekende deeltjes zichtbaar worden, nog voor je ze echt in beeld hebt. Heel kleine afwijkingen kunnen enorm veelzeggend zijn, en tot nieuwe ideeën leiden.' ◀

## Standaardkoffie

Menig deeltjesfan drinkt er dagelijks zijn of haar koffie uit: de koffiemok van CERN met de hele deeltjes-theorie in één simpele formule samengevat. Maar wat staat er eigenlijk? De vergelijking is een zogeheten Lagrangiaan, een elegante manier om de energiehouding van een deeltjes-systeem te noteren. De eerste regel formuleert de inbreng van de fundamentele krachten, de sterke en zwakke kernkracht en het elektromagnetisme. De tweede regel geeft aan hoe deze krachten aangrijpen op de bouwstenen van de materie, de quarks en leptonen. De derde regel vertelt hoe de quarks en leptonen massa krijgen. De vierde regel vertelt hoe de krachtdeeltjes in het model via het higgsdeeltje hun massa krijgen. Vier regels vatten een enorme wiskundige vergelijking samen, die voluit maar net op een vel schrijfpapier zou passen. De oplossingen van deze vergelijking geven aan hoe deeltjes zullen bewegen en kunnen veranderen.

De Standaardmok is te bestellen bij de shop van CERN.



## 'De uitdaging is een mooi spel'

**Naam:** Melissa van Beekveld

**Geboren:** 1992, Oss

**Functie:** Oud-promovendus Radboud Universiteit / Nikhef

Ik ben in mijn vrije tijd een bergwandelaar en zo ben ik ook wel een beetje als theoreticus. Onderweg doet alles pijn, maar je weet: als het volbracht is heb je een geweldig uitzicht. De uitdaging is een mooi spel.

Ik heb keihard aan mijn proefschrift gewerkt, *Myth busting precision physics*. Over manieren om fysica voorbij het Standaardmodel te herkennen.

Ik wilde per se in vier jaar klaar zijn. Het voelt goed om zo'n project te kunnen managen. Mijn proefschrift gaat eigenlijk over twee onderwerpen. Te dik misschien, het zijn bijna twee proefschriften.

Gelukkig heb ik het in september wel live kunnen verdedigen. In beperkt gezelschap, vanwege corona. Maar ik wilde echt niet online. Dat voelt niet serieus. Ik zou er niet eens zenuwachtig bij zijn. Nu wel, ja.

Ik ging ooit naar Nijmegen om de sterrenkunde, maar bij mijn bachelorstage koos ik toch voor de hoge-energiefysica. Wel in de donkere materie, dus nog in de buurt van de astrofysica. Dat project ging stiekem gewoon over supersymmetrie, uiteindelijk ook een onderwerp in mijn proefschrift. Ik ben wat ze noemen een fenomenoloog, een theoreticus die steeds de relatie zoekt met de metingen. Wat dat betreft is Nikhef echt een geweldige plek, je loopt de trap af en treft er de experimentatoren.

Sinds 1 oktober werk en woon ik voor drie jaar in Oxford als postdoc. Aan verbeterde Monte Carlo-technieken, zeg maar de simulaties die uitkomsten van experimenten voorspellen. Overigens is alles in Nederland opgeven wel een grote beslissing, daar lig ik soms wakker van. Het hoort erbij, hoor. Maar of ik dat nog tien, vijftien jaar keer op keer ga doen, weet ik echt niet. Dat is de keerzijde van de wetenschap.





## ‘Een elegant model is fijner’

**Naam:** Marieke Postma

**Geboren:** 1974, Enschede

**Functie:** Staf theoriegroep Nikhef

Ik ben de enige kosmoloog binnen de theoriegroep van Nikhef. Maar raakvlakken met de deeltjesfysica zijn er genoeg. Daar wordt gewerkt aan modellen voorbij het Standaardmodel. Ik probeer te bekijken wat zulke modellen doen met de geschiedenis van het heelal. Vooral vlak na de oerknal. Vragen te over.

De aandacht voor het vroege heelal is eigenlijk heel natuurlijk voor de deeltjesfysica. We hebben experimenten met versnellers, zoals de LHC op CERN. Maar die gaan maar tot een bepaalde energie. Dan houdt het op. Vlak na de oerknal heb je het over veel hogere energie. Als er ergens voorbij het Standaardmodel iets gebeurde, was het toen.

Ik was op school goed in natuurkunde, maar vond het wel behoorlijk saai met gedoe over blokjes die van een helling schuiven. Gelukkig had ik een broer die natuurkunde studeerde en die me vertelde over opwindender dingen als quantumtheorie en relativiteit. Ik begon destijds bij sterrenkunde, maar wilde al snel veel meer theorie dan ze daar bieden. Niet alleen vragen maar ook antwoorden. Dat heeft me van Amsterdam, naar Los Angeles, Triëst en uiteindelijk Nikhef gebracht. Je zwerft veel als jonge theoreticus, een leuke tijd maar er komt een moment dat je dat toch zat bent.

Ik beweeg nu een beetje tussen de deeltjesfysica en de kosmologie in. Deeltjesfysici heb je op Nikhef zelf. En voor bijvoorbeeld de journal club van de UvA-kosmologen hoeft ik hier op het Amsterdam Science Park toch alleen even de straat over.

Schoonheid is belangrijk in de theorie. Het werkt lekkerder aan een elegant model dan aan iets krakkemikkigs. Maar uiteindelijk beslist de werkelijkheid wat er waar is. Misschien is de wereld niet elegant, dat kan natuurlijk best.



## ‘Ik werk graag samen’

**Naam:** Dr. Juan Rojo

**Geboren:** 1980, Barcelona

**Functie:** Staf theoriegroep Nikhef, universitair hoofddocent VU

Het onderscheid tussen experiment en theorie is een administratieve kwestie. We zijn allemaal natuurkundigen. Maar er zijn natuurlijk wel verschillen. Experimentatoren hebben meestal een heel helder doel: bouw een detector en doe metingen. In de theoretische natuurkunde moet je steeds oppassen om niet onderweg te verdwalen.

Ik werk graag samen met mensen en dan is vaak mijn rol ook om de boel bij elkaar te houden en vooruit te komen. Dat is een kwestie van de juiste vraag en het juiste team. Kennelijk kan ik dat. Ik krijg dingen voor elkaar. Mijn energie daarbij komt uit mijn plezier in het werk. Het voelt als een groot voorrecht om steeds meer over het universum te leren. Dat maakt me elke dag blij.

Theorie is vaak hard werken maar dat valt me niet zo zwaar. Wat zwaarder is, zijn de sociale aspecten. Als jonge onderzoeker steeds verhuizen, ingewikkelde toestanden met relaties, geen huis, geen kinderen. Dat is nu anders, we zijn thuis in Nederland. Maar het is een tijdlang intens geweest.

Ik werk het liefst bottom-up: welke hints geven de data? Welke ideeën kun je daaruit opvissen? In mijn geval met een focus op het proton: hoe is dat gebouwd uit quarks en gluonen?

Of ik optimistisch ben over nieuwe deeltjeswerelden? Ik weet dat oprecht niet. Het kan best dat de natuur niet nog meer deeltjes heeft. Wie daarover teleurgesteld is, stelde de verkeerde vraag. Het enige wat wij kunnen is kijken en leren hoe het echt zit.

## ‘Nadenken over je eigen twist’

**Naam:** Solange Schrijnders van Velzen

**Geboren:** 1994, Almere

**Functie:** PhD-student theoriegroep Nikhef

Dingen die ik niet meteen snap vind ik heerlijk. Uitdagingen. Wat dat betreft is de theoriegroep wel een goeie plek. In het eerste jaar had ik vaak het gevoel dat ik er echt helemaal niks van begreep. Inmiddels is het wel op zijn plek gevallen en heb ik mijn eerste twee papers gepubliceerd. Hooguit ben ik nog een beetje het ukkie omdat ik nog steeds de jongste PhD ben.

Ik heb een studie wiskunde overwogen, maar had het gevoel dat natuurkunde toch wat praktischer is.

Tijdens mijn masterstudie in Utrecht gaf Eric Laenen van Nikhef les over deeltjes en velden en ik vond het meteen geweldig. Juist vanwege alle wiskunde. En dat gaat me nu eenmaal gemakkelijk af.



Werken als een theoreticus is wel iets dat je echt moet leren. Dat gaat altijd ongeveer op dezelfde manier. Iemand houdt een verhaal of publiceert een artikel dat je helemaal boven de pet gaat. Je rekent het net zo lang na tot je het snapt. En dan probeer je na te denken over je eigen twist in het verhaal.

Theoretische natuurkunde is een vak waarvoor je veel alleen moet zitten, werken en nadenken. Maar tegelijk trekken we hier wel echt veel met elkaar op. Dat kan in een relatief kleine groep. Ik weet dat ze in Utrecht verbaasd waren dat ik op Nikhef als masterstudent gewoon met de staf lunchte.

Ik heb nu nog twee jaar. Of mijn promotie leidt tot een leven in de theorie weet ik nu nog niet, ik maak nooit dat soort verre plannen. Het hangt ervan af of ik echt iets blijf te kunnen bijdragen. Anders moet je misschien toch iets anders gaan doen.

Ik kan me best voorstellen dat ik voor een bedrijf zou gaan werken. Wat? Ik zoek altijd het randje. Routinewerk is aan mij niet besteed.



## ‘Ik ben een soort wiskundetolk’

**Naam:** Michael Borinsky

**Geboren:** 1989, Neurenberg

**Functie:** Postdoc theoriegroep Nikhef

Ik was zomerstudent op CERN toen daar in 2012 de ontdekking van het higgsdeeltje bekend werd gemaakt. We sliepen de nacht ervoor op de grond voor de deur van het auditorium, anders zouden we zeker niet binnen komen. Fantastisch om mee te maken. Bij mij plantte dat het zaadje voor de deeltjesfysica.

Nikhef is mijn eerste postdoc-positie en daar ben ik heel blij mee. Er is hier een fijne open cultuur voor nieuwkomers. Er is veel steun, zowel professioneel als persoonlijk. Je hebt hier meesters in hun vak. En Amsterdam is ook nog een geweldige stad.

Mijn onderzoek beweegt zich op het raakvlak van de natuurkunde en de wiskunde. Buitenstaanders denken dat theoretici eigenlijk wiskundigen zijn. Dat is niet echt zo. Er is wel overlap, maar ze spreken in de praktijk nauwelijks dezelfde taal. Wiskundigen zijn vaak formeel, fysici veel pragmatischer: als iets werkt is het wel goed genoeg.

Ik werp me eigenlijk op als een soort tolk. Ik probeer te zien hoe nieuwe ontwikkelingen in de wiskunde de fysica kunnen helpen. En ook omgekeerd hoe theoretische fysica de wiskunde kan helpen.

In principe kunnen we deeltjesprocessen tot ver achter de komma berekenen, maar in de praktijk vraagt het enorm veel rekentijd, en komen we dan gewoon nog niet ver genoeg. Bovendien is al dat computerrekenen slecht voor het milieu. Ik denk dat het met slimme wiskundige trucs allemaal veel efficiënter kan.

Het einde van mijn postdoc komt nu in zicht. Ik heb wel wat dingen op het oog, postdoc of misschien vast. Wat het ook wordt, dit najaar gaat solliciteren een hoop van mijn tijd kosten, dat weet ik nu al.



## ‘Meestal heb ik te veel ideeën’

**Naam:** Wouter Waalewijn

**Geboren:** 1982, Emmeloord

**Functie:** Universitair hoofddocent UvA / Nikhef

Geduld is een belangrijke vereiste in de wetenschap. Ikzelf heb meer geduld met formules dan met apparaten. Dan is theorie je domein.

Ik ben van jongs af aan geïnteresseerd geweest in exacte vakken en had in 3 vwo eigenlijk alle middelbare-school-wiskunde al gedaan. Daarna deed ik wiskunde en natuurkunde in Utrecht, een promotie op het superintense MIT, een postdoc in het zonnige San Diego en kreeg ik daarna zowel op Nikhef als de UvA aanbiedingen.

Ik werk nu voor de UvA maar ben veel op Nikhef, dat is een natuurlijke omgeving voor mijn onderzoek. Tegelijkertijd is de Nikhef-groep niet te groot, dat geeft veel samenhang en interactie. Ik geef overigens wel graag les, ik houd van het moment dat je bij studenten het licht ziet aangaan.

“Door een Europese ERC-beurs heb ik een eigen groep kunnen opzetten met promovendi en postdocs. Dat betekende de laatste jaren zoveel begeleiding en coördinatie dat ik niet heel veel aan eigen werk ben toegekomen.

Tien jaar geleden deed ik het liefst alles zelf, elke formule in een paper had ik ook zelf doorgerekend, elk plotje had ik zelf gemaakt. Dat is niet meer zo. Nu gaat het meer om de ideeën. Ik heb meestal te veel ideeën en praat veel met mensen om de zinnige eruit te halen.

Ik werk vooral aan zogeheten *jets*: stralen van deeltjes die bij botsingsexperimenten ontstaan. Dat zijn eigenlijk heel gekke objecten. Deeltjes als elektronen of fotonen kun je aanwijzen en volgen. Maar wat is een handige beschrijving van een sproeier? Wat hoort er wel bij en wat niet? Hoe doe je daar nauwkeurigere berekeningen aan?

Ons werk kan implicaties hebben voor experimenten, bijvoorbeeld op CERN. Communicatie met de experimenten is belangrijk om op de hoogte te blijven van de ontwikkelingen. Tegelijkertijd hebben we als theoretici ook onze eigen uitdagingen om mee te worstelen.





Op het uitgestrekte grasland van de pampa in Argentinië staan ruim 1.600 detectoren verspreid over een gebied ter grootte van de provincie Zuid-Holland. Dit is het Pierre Auger-observatorium voor kosmische straling. Hiermee speurt een internationale onderzoeksgroep, inclusief wetenschappers van Nikhef in Nijmegen, naar de oorsprong van ultrahoogenergetische kosmische deeltjes die uit het heelal op ons af komen suizen.

In 2019 bestond het Argentijnse observatorium twintig jaar. Maar de detectoren gaan nog lang niet met pensioen. In tegen-deel, ze krijgen een upgrade. 'We willen nog zeker tien jaar meten', zegt hoogleraar Jörg Hörandel, van de Nikhef-groep bij de Radboud Universiteit (RU) in Nijmegen. 'De natuur stelt ons voor een uitdaging en om die op te lossen hebben we meer en betere metingen nodig.'

De Nederlandse Auger-groep, die sinds 2005 bij het project betrokken is, speelt een belangrijke rol bij de upgrade. Zeventien landen zijn onderdeel van het Auger-observatorium. Nederland levert met 26 procent de grootste bijdrage. Daarbij moet opgemerkt worden dat de meeste landen al langer bij het project

betrokken zijn en dus bijdroegen aan de eerste investering.

#### Deeltjeslawines detecteren

Het observatorium bestaat uit 1.600 watertanks met elk drie lichtsensoren, verspreid over een oppervlak van 3.000 vierkante kilometer. Zodra er een hoogenergetisch kosmisch deeltje op een zuurstof- of stikstofatoom in de atmosfeer knalt, ontstaat er een lawine van miljarden secundaire energierijke deeltjes. Een deel daarvan bereikt het aardoppervlak. Als geladen deeltjes uit die lawine in een van de watertanks terechtkomen, zenden ze daar, door hun hoge snelheid, een klein beetje licht uit dat geregistreerd wordt door lichtsensoren in de tank. Met meerdere van deze metingen kan de vorm en energie van de deeltjeslawine gereconstrueerd worden om zo te bepalen met welke energie het kosmisch deeltje op de atmosfeer knalde en uit welke richting het kwam.

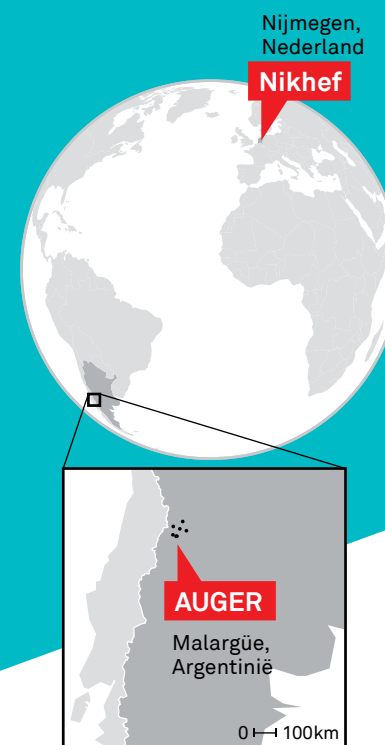
Het totale observatorium meet een paar van die deeltjeslawines per uur. Heel af en toe wordt de lawine van een extreem energetisch kosmisch deeltje gemeten. 'Het is nog een raadsel waar die deeltjes vandaan komen en welke objecten in het universum ze zoveel energie meegeven', vertelt onderzoeker Cristina Galea van de RU. 'Van die

extreem energetische deeltjes zien we er maar één per vierkante kilometer per eeuw. Daarom hebben we een observatorium van 3.000 vierkante kilometer.'

'Zeer waarschijnlijk zijn de hoogenergetische kosmische deeltjes atoomkernen, vooral van waterstof, koolstof, zuurstof, stikstof en ijzer', zegt Charles Timmermans, onderzoeker bij de RU. 'Maar het is lastig om uit de restanten van de deeltjeslawine in onze detectors af te leiden welke deeltjes het precies zijn. Het doel van de nieuwe detectoren, die tijdens de upgrade toegevoegd worden aan het Auger-observatorium, is uitzoeken welke atoomkernen er precies op de atmosfeer botsen.' RU-hoogleraar Sijsbrand de Jong, programmaleider kosmische stralingsonderzoek voegt toe: 'Kennis over de deeltjes leidt ons naar hun bronnen en naar begrip van de ultrahoogenergetische botsingen in de atmosfeer.'

#### Mede ontwikkeld door Nikhef

De upgrade bestaat uit twee onderdelen die aan de huidige watertanks bevestigd worden: radioantennes, die in Nederland ontwikkeld zijn, en dunne deeltjesdetectoren, die in een grote platte doos bovenop de tanks komen. Eind 2021 moeten alle watertanks voorzien zijn van deze twee nieuwe onderdelen.



De deeltjesdetectoren, waarmee de inkomende deeltjes uit de deeltjeslawine beter van elkaar onderscheiden kunnen worden, zijn mede-ontwikkeld door engineers van Nikhef en de RU. Van de ruim 1.500 detectoren zijn er 180 gebouwd in de kelder van de RU. De overige detectoren worden elders in Europa gebouwd. In december 2019 zijn de laatste Nederlandse deeltjesdetectoren afgeleverd in Argentinië.

Er zijn inmiddels al bijna achthonderd deeltjesdetectoren geïnstalleerd op de Auger-watertanks. Met tachtig daarvan zijn inmiddels de eerste tests gedaan. 'Ze lijken naar verwachting te werken', vertelt promovendus Mart Pothast van de RU. Met deze extra detectorlaag kunnen straks elektronen uit de deeltjeslawines onderscheiden worden van hun zwaardere broertjes, de muonen.

'Muonen laten in de deeltjesdetector en de watertank een vergelijkbaar signaal achter', vertelt Pothast. 'Elektronen hebben daarentegen vaak minder energie dan muonen en worden afgeremd in de watertank. Daardoor geven ze in de watertank een zwakker signaal dan in de detector. Zo maakt de upgrade het mogelijk om elektronen en muonen van elkaar te onderscheiden.'



Visualisatie van een deeltjeslawine boven de Auger-detector

'Met die informatie kunnen we de samenstelling van de deeltjeslawine achterhalen', voegt postdoc-onderzoeker Ugo Giaccari toe. 'En die informatie vertelt ons welk kosmisch deeltje die lawine veroorzaakt heeft. We weten bijvoorbeeld dat ijzeratoomkernen meer muonen produceren dan sommige andere atoomkernen.'

#### Ronde radioantennes

De radioantennes vormen het tweede deel van de upgrade, en zij zijn de reden dat Nederland in 2005 betrokken raakte bij het Auger-observatorium.

'De radioantennes meten de radiostraling die de deeltjes in de lawines uitzenden', vertelt promovendus Bjarni Pont van de RU. 'Ze meten op die manier ongeveer hetzelfde signaal als de deeltjesdetectoren, maar die liggen plat, bovenop de watertank, waardoor ze lawines die van de zijkant komen niet registreren. Met de radioantennes erbij kunnen we meer en meer verschillende deeltjeslawines gaan meten.'

De ontwikkeling van de antennes heeft verschillende stadia doorgemaakt. Drie prototypes die daaruit voortgekomen zijn, staan op het dak van het hoofdgebouw van de Faculteit der Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica van de RU. Het eerste ontwerp is een stalen constructie waarvan de vorm het meest doet denken aan een kerstboom. 'Die bleek te complex voor het vervoer naar en de installatie op de pampa in Argentinië', vertelt promovendus Fabrizia Canfora. De tweede versie is wat eenvoudiger; die bestaat uit metalen buizen in twee gekruiste vlindervormen. Het meest recente prototype, dat bestaat uit twee cirkelvormen, is het gemakkelijkst te monteren en zal binnenkort op grote schaal geproduceerd worden voor het observatorium.

#### Monteren op de pampa

Dat de antennes simpel te monteren en robuust zijn, is belangrijk, vanwege de omstandigheden in Argentinië. 'Het is er droog en het kan extreem hard waaien. Omdat het gebied op 1.400 meter hoogte en dichtbij de evenaar ligt, is de uv-straling van de zon bovendien sterk', vertelt Hörandel. 'De materialen moeten daar tegen bestand zijn.'

Als het regent zijn bepaalde gedeeltes van het observatorium onbereikbaar en ook als het droog is, is het lastig. 'De weinige wegen die er zijn, zijn onverhard', vertelt Timmermans. 'En er zijn struiken met grote doornen. Als die in je auto-banden komen – en dat gebeurt – dan zijn ze plat. Het enige wat je dan kan doen is met je radiotelefoon het hoofdgebouw vragen om een taxi te bellen om je, met je kapotte banden, naar een garage te brengen. Of je loopt naar een nabijgelegen weg en probeert een lift te krijgen.'

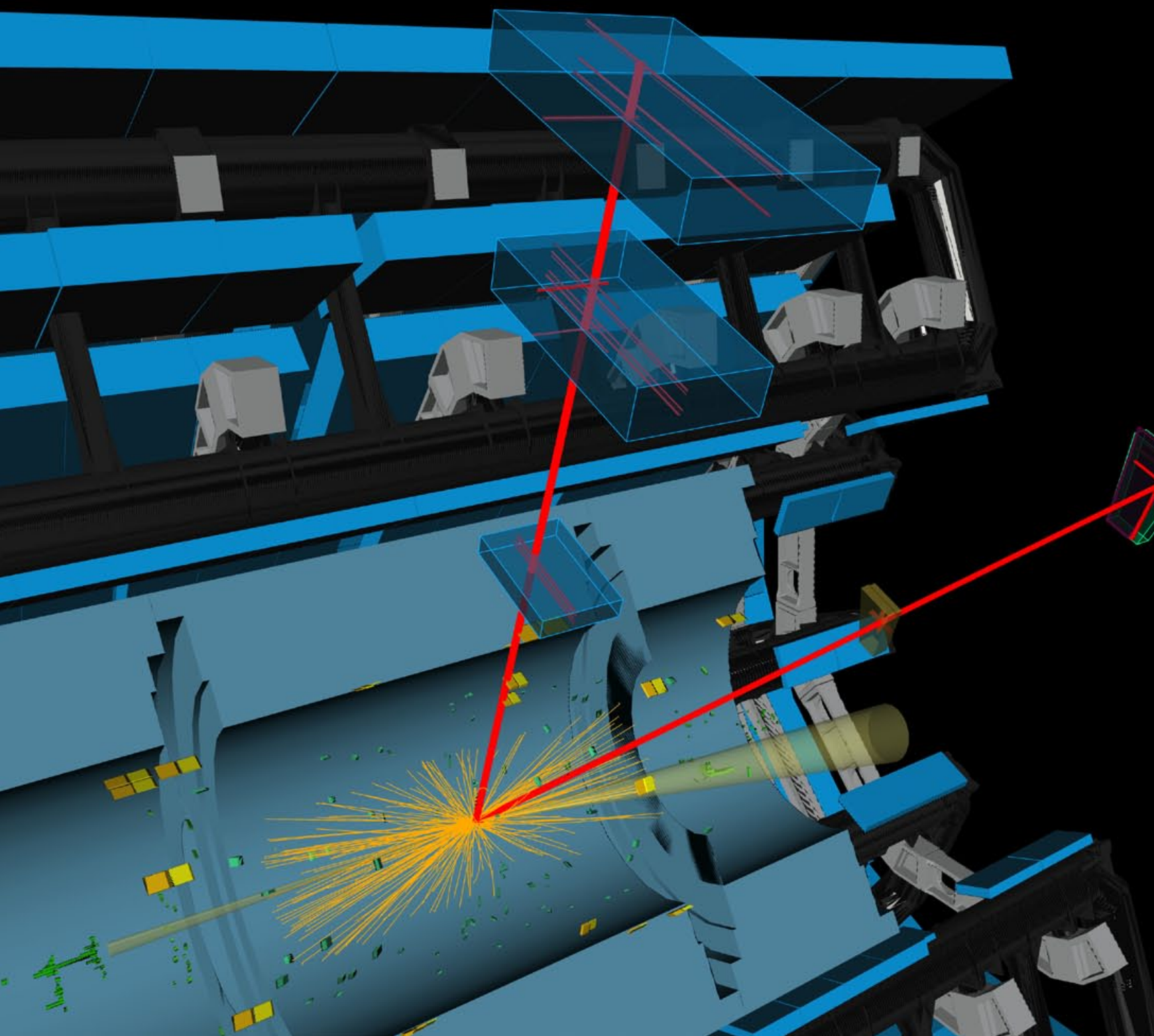
De upgrade van het observatorium is dus een flinke klus. 'Maar als we straks data hebben van de oude en de nieuwe meettechnieken, dan wordt het mogelijk om de deeltjeslawines veel beter te begrijpen', vertelt postdoc-onderzoeker Rafael Alves Batista, die werkt aan de theoretische kant van het Auger-onderzoek. 'Dankzij het Auger-observatorium weten we bijvoorbeeld sinds 2017 dat de hoog-energetische deeltjes van buiten de Melkweg komen. Met de upgrade hopen we te achterhalen waar in het universum ze precies vandaan komen, hoe ze geproduceerd worden en hoe ze zoveel energie krijgen.'

'Voor het onderzoek naar kosmische deeltjes heb je veel geduld nodig', zegt Galea. 'Je moet jarenlang metingen doen voordat je een dataset hebt die groot genoeg is om ontdekkingen mee te doen.'



# Twee veelzeggende muonen

Tekst: Martijn van Calmthout / Illustratie: ATLAS



Het oogt een beetje als een scène uit een videogame. *Higgs: the new generation* zou die kunnen heten. Maar dit is geen game. Het is een grafische weergave van een bijzondere meting in de ATLAS-detector in Genève. De hoofdelementen van deze reusachtige meetmachinerie op CERN kunnen we nog net schetsmatig onderscheiden. Een deel daarvan is door Nikhef gebouwd. Maar alles draait om de explosie van botsende protonen daarbinnen.

Twee protonen uit de LHC-versneller zijn net snoeihard op elkaar gebotst en hebben een regen van deeltjes losgelaten. Twee sectoren van de omliggende detector hebben elk een muon zien wegvliegen, een zwaardere dubbelganger van het elektron. Wanneer de meetpunten verbonden worden en de banen van die muonen als rode lijnen worden ingetekend, blijken ze uit precies hetzelfde punt te komen.

En dat is iets waar deeltjesfysici al tijden naar op zoek zijn. De eventdisplay met de twee rode lijnen is een prachtvoorbeeld van een higgsdeeltje dat in twee muonen uiteenvalt.

Dat verval, vaak afgekort als  $H \rightarrow \mu\mu$ , is een zeldzaam proces. Minder dan een op de vijfduizend higgsdeeltjes zal op die manier vervallen. Maar na jaren meten heeft het ATLAS-team nu toch genoeg van zulke gebeurtenissen uit alle botsingen gevestigd om voorzichtige conclusies te kunnen trekken. Voorzichtig, want niet elk tweetal muonen komt uit een higgsdeeltje.

Afgelopen zomer was het verval van higgs naar twee muonen een van de belangrijkste resultaten van de ICHEP-conferentie, een tweemaaljaarlijks deeltjesfeest met duizenden deelnemers. Die bijeenkomst zou normaal in Praag zijn gehouden, maar dat werd online vanwege de coronapandemie. De opwinding was er echter niet minder om. Hier werd echt een nieuw hoofdstuk in de natuurkunde geschreven.

In alle eerlijkheid geen onverwacht nieuw hoofdstuk, in theorie werd dit resultaat wel verwacht. Maar dat Moeder Natuur zich naar onze ideeën gedraagt, betekent nog steeds veel in de natuurkunde.

Dat nieuwe hoofdstuk draait om het bestaan van massa in de deeltjeswereld. In 2012 bewees de ontdekking van het

higgsdeeltje een vijftig jaar oude theorie van Peter Higgs en anderen dat het universum doortrokken is van een speciaal veld: het higgsveld. Een universele invloed die deeltjes dicteert wat hun massa is.

Maar is er één higgsveld dat alle deeltjes in het universum hun massa influistert? Of werkt de natuur misschien toch ingewikkelder?

Dat is minder vergezocht dan het lijkt. De deeltjeswereld heeft een opmerkelijke familiestructuur. Er is het minimale gezinnetje rond het elektron, met twee soorten quarks waaruit alle kerndeeltjes en het gehele bekende universum zijn gebouwd. Plus een neutrino.

Maar er zijn nog twee gezinnen. Dat rond het muon, een kopie van het elektron maar 200 maal zwaarder. En het gezin van het tau-deeltje, ook elektronachtig maar dan 3500 keer zwaarder.

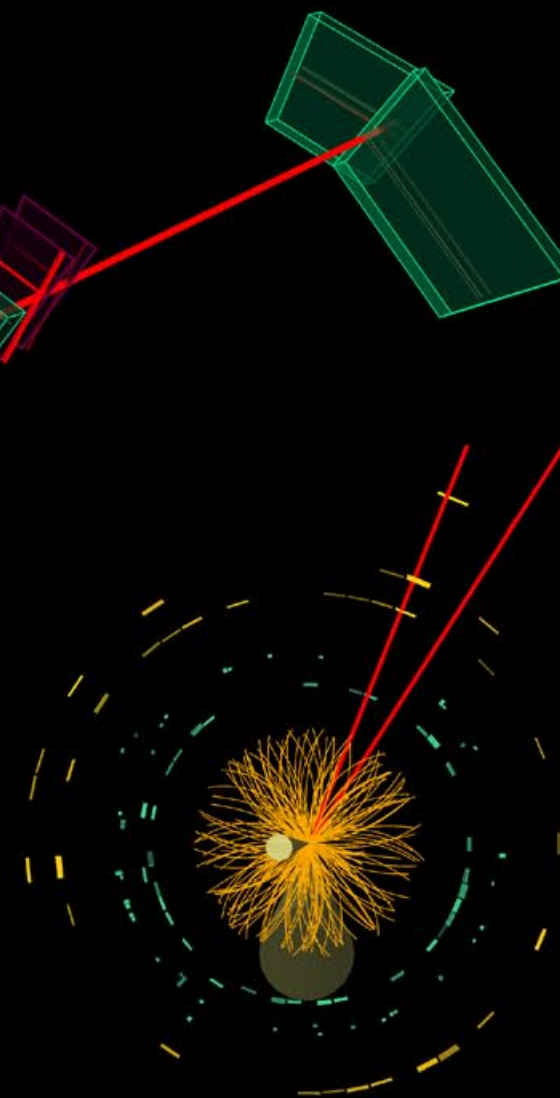
Spreekt het higgsveld deze drie gezinnen (fysici hebben het liever over deeltjesgeneraties) op precies dezelfde manier aan? Als dat niet zo is, zouden er meerdere soorten higgsdeeltjes kunnen bestaan. Die misschien wel elk naar hun eigen generatie deeltjes vervallen.

In theorie kan er veel. Uiteindelijk komt het op waarnemen aan.

In 2012 werd het bestaan aangetoond van het higgsdeeltje en dus van een higgsveld. Maar of zo'n veld overall precies hetzelfde werkt was nog niet te zien. Dat wordt sinds deze zomer, en na jaren stug doormeten, nu ook duidelijker. Onderzoekers van Nikhef zijn nauw betrokken bij de nieuwe analyses.

Eerder was al gezien dat higgsdeeltjes nu en dan uiteenvallen in tau-deeltjes en hun familieleden, de zwaarste generatie. Dat was het eerste harde bewijs dat materiedeeltjes hun massa via het higgsmechanisme ingefluisterd krijgen. Met het verval naar muonen begint duidelijk te worden dat ook de middelste generatie van de deeltjesfamilie naar hetzelfde higgsveld luistert.

Het zoeken is nu naar higgsdeeltjes die naar elektronen vervallen, de lichtste generatie, die in de wirwar van botsingsproducten uiterst lastig te vinden zijn. Intussen speuren onderzoekers van ATLAS ook naar signalen waarin de quarks uit de tweede generatie te zien zijn in het spel met het higgsdeeltje. Twee charm-quarks bijvoorbeeld. Nog zeldzamer. Nog spannender.



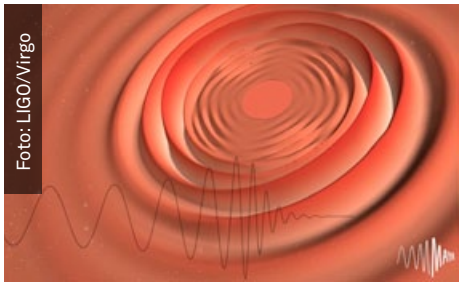




### ETPathfinder VORDERT GESTAAG

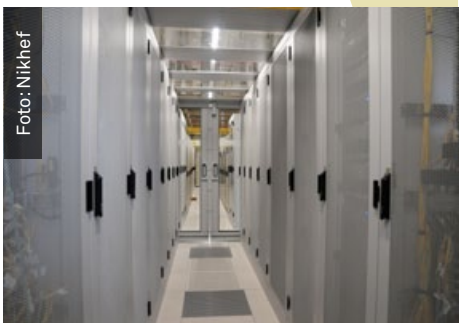
De bouwwerkzaamheden in de ETPathfinder-hal in Maastricht zijn in volle gang. Afgelopen zomer is de betonnen vloer gestort voor deze proeftuin voor het testen en uitvinden van nieuwe en betere technologieën voor zwaarte-krachtsgolfdetectoren. De vloer is zo ontworpen dat de toekomstige laser-interferometer-opstelling zo weinig mogelijk last heeft van

verstoringen uit de omgeving. Naar verwachting begint in oktober de bouw van de cleanroom – een stofvrije hal met geregleerde temperatuur waarin de apparatuur komt te staan. Hoewel de faciliteit in Maastricht verrijst, is het een samenwerking waar naast Nikhef inmiddels 15 andere kennisinstellingen in Nederland, België en Duitsland aan zijn verbonden.



### Nieuwe E-infrastructuur voor GROTE ONDERZOEKSFACILITEITEN

Nikhef, ASTRON en SURF hebben 29 miljoen euro bijeengebracht voor het verwerken van de steeds grotere datastromen in de deeltjesfysica en astronomie. Het FuSE-project (Fundamenteel Wetenschappelijke E-infrastructuur) voorziet in nieuwe reken capaciteit en uitbreiding van Big Data-expertise voor drie grote onderzoeks-faciliteiten: de Large Hadron Collider (LHC) deeltjesversneller, neutrino telescoop KM3NeT en de Square Kilometre Array (SKA) radiotelescoop. Wetenschapsfinancier NWO steekt 12 miljoen euro in FuSE. SURF, de coördinator van de digitale infrastructuur voor onderzoek in Nederland, draagt bij met 11 miljoen euro in de vorm van 'rekentijd'. De samenwerkende partners zullen systemen en diensten ontwikkelen om de snelgroeiende hoeveelheden meetgegevens aan te kunnen, zodat de volgende fase van wetenschappelijke ontdekkingen kan worden gedaan.



### Zwaarte-krachtsgolven goed voor TWE E ASTROFYSISCHE PRIMEURS

In 2020 meldde zwaarte-krachtsgolf-experimenten Virgo en LIGO maar liefst twee keer een astrofysische primeur. In juni maakten zij bekend dat zij een 'verboden' object hadden zien versmelten met een zwart gat. Dit object van ongeveer 2,6 zonnemassa's was geen gewoon zwart gat, maar volgens gangbare astrofysica ook geen gewone neutronster. In september publiceerden de onderzoekers voor het eerst direct bewijs voor het bestaan van middelzware zwarte gaten in het heelal. De detectoren hadden zwaarte-krachtsgolven opgevangen afkomstig van twee versmeltende zwarte gaten van naar schatting 66 en 85 keer de massa van de zon. Dit ligt precies in een massabereik waar astrofysische modellen van ster-evolutie geen zwarte gaten verwachten. De detecties geven daarmee nieuw zicht op zware sterren, de vorming van zwarte gaten, en ons begrip van de ruimtetijd zelf.

### Rekenkracht voor CORONA-ONDERZOEK

Als onderdeel van de World Wide LHC Computing Grid stelt Nikhef rekenkracht ter beschikking voor onderzoek aan het coronavirus. Nikhef ondersteunt daarmee onder andere initiatieven als het Rosetta@home-project van de universiteit van Washington, dat eiwitstructuren ontrafelt met massaal rekenwerk. Ook WeNMR, het virtuele onderzoeksplatform voor structurele biologie, gebruikt reken capaciteit van Nikhef voor onderzoek aan het coronavirus. Het rekenwerk van het Nikhef-datacenter ligt in lijn met de wereldwijde inspanningen van onder meer deeltjeslabs als CERN, die waar mogelijk expertise en apparatuur beschikbaar stellen voor de aanpak van de corona-pandemie. Zo hebben fysici en technici



### Donkere-materie-experiment MEET OVERSCHOT

Het donkere-materie-experiment XENON in Italië heeft meer activiteit in de detector gemeten dan met achtergrondstraling te verklaren is. Dat kan een indicatie zijn voor donkere materie, denken de onderzoekers van onder meer Nikhef. Maar er zijn ook andere verklaringen denkbaar, van onzuiverheid door een minime hoeveelheid radioactief tritium tot treffers van neutrino's of zogeheten axionen, nieuwe deeltjes die tot nog toe nooit in een experiment gezien zijn. Inmiddels wordt de detector uitgebreid. De XENON-collaboratie verwacht met de nieuwe drie keer grotere XENON-detector de komende jaren meer en betere metingen te gaan doen. Dan moet duidelijk worden of het nu gevonden signaal standhoudt.



van het LHCb-experiment, waaronder Nikhef-collega's, bijvoorbeeld ook een beademingsapparaat (de 'HEV ventilator') ontworpen om beademingsondersteuning te bieden aan patiënten, zowel binnen als buiten de intensive care.

Tekst: Maureen Voestermans / Foto: Bas Uterwijk

'Waar ik eigenlijk van droom is de hele dag kitesurfen op Texel. En misschien een beetje natuurkunde geven op een middelbare school daar... Dat lijkt me wel wat! Maar nee hoor, Nikhef is echt een fantastische plek om te zitten – je hebt hier veel vrijheid om goed onderzoek te doen en ook voldoende tijd voor onderwijs.' 'Met het XENON1T-experiment hebben we signalen opgevangen die mogelijk op donkere materie wijzen. Dat zou natuurlijk geweldig zijn. Dan krijgen we de Nobelprijs hoor! Ik verwacht in ieder geval wel dat we ergens voor mijn pensioen, over 18 jaar zou dat zijn, meer weten over die donkere materie. Alles hieromheen vind ik trouwens enorm leuk om te doen, van het knutselen aan de experimenten tot aan het begeleiden van de studenten en postdocs.'

'Ook DARWIN, de opvolger van XENONnT is een mooi project om de komende jaren mee bezig te zijn. Daarnaast probeer ik ook nog om PTOLEMY op te starten, waarmee we eigenlijk een soort foto van het universum willen maken een seconde na de oerknal aan de hand van kosmische neutrino-achtergrondstraling.'

## Auke Pieter Colijn wil een seconde na de oerknal kijken

'PTOLEMY is in zekere zin een omgekeerd XENONnT-project. XENON1T, en de grotere opvolger XENONnT, zijn goed te bouwen maar het is onzeker of we hier iets nieuws gaan vinden. PTOLEMY daarentegen is weer heel lastig te bouwen, maar als het er eenmaal staat is de kans groot dat we hier iets bijzonders mee vinden.'







## INHOUD

**2 KM3NeT**  
Massaproductie  
van detectorbollen  
in Amsterdam

**3 Stan Bentvelsen**  
In tijden van corona  
is alles anders

**4 Elektronica**  
van Nikhef  
is overal

**10 Eric Laenen**  
over de nieuwe strategie  
voor Europese deeltjesfysica

**12 LHCb-upgrade**  
Installeren op afstand

**14 Theorie-groep**  
Denken over  
de deeltjeswereld

**18 Auger-experiment**  
Kosmische deeltjes spotten  
in Argentinië

**20 Higgs**  
Een bijzondere meting

**23 De droom van**  
Auke Pieter Colijn  
over iets echt nieuws