

Najaar  
2019

# DIM ENS IES

Nik|hef

Nationaal  
instituut voor  
subatomaire fysica

## MACHINE LEARNING

Een must voor  
de deeltjesfysica

## WERKPLAATS

Grootste  
draagconstructie,  
kleinste palletje:  
elk detail is belangrijk

## ZWAARTEKRACHTSGOLVEN

De maand dat de hemel  
zweeg



In de serverruimtes van Nikhef in Amsterdam is de toekomst van de deeltjesfysica alvast begonnen. Deze zomer plaatsten technici de eerste nieuwe, supersnelle geheugenschijven waarmee het datanetwerk opgewassen zal zijn tegen een nieuwe stortvloed aan meetgegevens vanuit CERN.

Vanaf 2021 worden van de deeltjesexperimenten bij de LHC-versneller in Genève al tweemaal zoveel gegevens verwacht als nu. In 2024 worden de bundels van de versneller nog eens vijfmaal zo intens. 'Tien keer zoveel data tegen gelijke kosten, dat is de inzet', zegt systeem-engineer Tristan Suerink van de afdeling Computer Technology van Nikhef. In het datacentrum in Amsterdam, beheerd door Nikhef en SURFsara, wordt een kopie bijgehouden van de meetgegevens die uit de experimenten in Genève komen.

Onderzoekers wereldwijd kunnen die data daar via het GRID-netwerk ophalen voor hun eigen analyses van de deeltjesbotsingen in de LHC-versneller.

De Nikhef-computerexpert onderzoekt bij Nikhef al enige tijd de mogelijkheid om veel grotere datastromen snel op te slaan en weer uit te lezen. Suerink deed het afgelopen jaar studies naar de snelheid van nieuwe geheugeneenheden die op de markt zijn. Daarbij werd een aantal processoren op snelheid getest die de communicatie tussen een geheugenschijf en het netwerk verzorgen. Na die tests werd een IBM Power-systeem gekozen in combinatie met een Netapp E-series geheugenschijf die 80-90 Gbit per seconde aankunnen.

#### Wereldrecord

Dat is driemaal sneller dan standaard Intel-chips, maar kost maar tweemaal meer. Dat is het inverdieneffect waar Suerink voor Nikhef naar op zoek is. 'De budgetten groeien niet echt, de datastromen wel', zegt hij. De eenheden zijn door een Gronings servicebedrijf geïnstalleerd. Ook Google werkt met de gekozen IBM-processoren.

Voor de tests van de geheugenprocessoren ontwikkelde Suerink in eigen beheer ook het vermoedelijk snelste datakanon ter wereld. Dat apparaat kan in 4,5 seconde de inhoud van het hele internet aan een geheugenschijf aanbieden. Dat is 65 duizend keer sneller dan bestaande systemen kunnen leveren. De aanvraag voor een wereldrecord is ingediend bij *Guinness Book of World Records*. Toekenning kan nog dit jaar een feit zijn, hoopt Suerink.

## Geheugen van de toekomst draait al bij Nikhef

Tekst: Martijn van Calmthout / Foto: David Redeker



# Denken, bouwen, durven

Bij Nikhef kunnen we experimenten alleen doen dankzij de uitzonderlijke kwaliteit in techniek en instrumentatie. Daarom is er in dit nummer van ons magazine DIMENSIES aandacht voor de afdeling Mechanische Technologie. Bij deze afdeling werken meer dan twintig engineers en technici. Ze bedenken samen met wetenschappers de instrumenten voor de toekomst. En ze bedenken ze niet alleen, maar ze bouwen ze ook.

Voorbeelden zijn de vele detectoronderdelen van de CERN-experimenten, de detectorbollen van de neutrino telescoop KM3NeT en de grote hoeveelheid mechanica voor de metingen van zwaartekrachtsgolven.

In dit magazine staat verder een fraai artikel over een opstelling bij de Rijksuniversiteit Groningen om zeer precies de eigenschappen van het elektron te meten. Dit experiment versnelt de deeltjes niet, zoals we vaak doen bij Nikhef, maar remt ze juist af. Het is een zogeheten *high-risk-high-gain*-experiment met wereldwijde concurrentie. Daar is durf voor nodig.

Voorts in dit magazine aandacht voor codetovenaar Jos Vermaseren, een artikel en stripverhaal over de eerste maanden van de verbeterde zwaartekrachtsgolfdetectoren van LIGO en Virgo, een stuk over de zoektocht naar nieuwe natuurkunde met hulp van kunstmatige intelligentie en natuurlijk de vaste rubrieken 'Nieuws', 'In beeld' en 'De droom van...'.

Ik wens u veel plezier met deze editie van DIMENSIES. En mocht u in de gelegenheid zijn, kom dan op de eerste zaterdag van oktober naar de open dag van Nikhef op het Science Park Amsterdam. Tijdens deze open dag is er alle tijd om verder kennis te maken met ons onderzoek en kunt u de werkplaats van de afdeling Mechanische Technologie met eigen ogen bekijken.

**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 grondbeginnselen van de natuurwetten? Het onderzoek vindt plaats bij deeltjesversnellers als de Large Hadron Collider op CERN en met detectoren voor kosmische deeltjes, donkere materie en zwaartekrachtsgolven in de hele wereld.

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

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

#### DIMENSIES najaar 2019

##### REDACTIE

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

##### AAN DIT NUMMER WERKTEN MEE:

Thijs Balder (illustraties), Ronald Blinderman (foto's), Reyer Boxem (foto's), Marco Kraan (foto's), Erik Kriek (strip), Mats van Soolingen (foto's), Bennie Mols (tekst).

##### ONTWERP EN VORMGEVING

Enchilada (ontwerp), Naïm Niebuur Studio (vormgeving)

##### OP DE COVER

Instrumentenmaker Lara Dolleman werkt op de werkplaats van de afdeling Mechanische Technologie van Nikhef. Foto: Marco Kraan





# De smidse van de deeltjeswereld

Van de grootste draagconstructie tot het kleinste palletje: in principe is elk detail belangrijk op de afdeling Mechanische Technologie van Nikhef. 'Dit is de reden dat we als Nederlands instituut internationaal kunnen meedoen.'

Tekst: Martijn van Calmthout / Foto's: Marco Kraan

Er staan draaibanken, freesmachines, lintzagen, kolomboren, lijmtafels, lasapparatuur en het ruikt onmiskenbaar naar metaalbewerking in de werkplaats van Nikhef. De afdeling Mechanische Technologie beslaat op de begane grond de hele westflank van het instituut op het Amsterdam Science Park, van de goederenontvangst tot de sectie engineering.

Het lijkt een eigen wereld, een smidse vol zwaar gereedschap, beeldschermen met kleurige 3D-modellen en blauwe stofjassen. En als in iedere werkplaats staat er her en der een radio aan.

Maar schijn bedriegt, zegt groepsleider Mechanische Technologie Patrick Werneke. Ook dit is hard-core wetenschap. 'Wat we hier bedenken en bouwen komt letterlijk tot in het hart van de experimenten in de hoge-energiefysica in de wereld. Dit is een belangrijke reden dat we als Nederlands wetenschappelijk instituut internationaal echt kunnen meedoen in het deeltjesonderzoek.'

## Lange dagen

Bij MT, zoals de afdeling binnen het instituut kortweg heet, werken ongeveer dertig Nikhef-mensen, van technische stagiairs tot oudgedienden. Er zijn instrumentmakers die met het machinepark onderdelen en gereedschappen kunnen

maken voor de unieke en gecompliceerde experimenten van de onderzoekers. Er zijn engineers, die dat allemaal kunnen ontwerpen en doorrekenen. Vrijwel altijd in internationale samenwerking. Daarnaast is er nog ondersteuning: van timmerlui die transportkisten bouwen tot inkopers die materialen en onderdelen bestellen en opdrachten uitzetten.

Het licht brandt er lange dagen. De eerste technicus is er al voor zeven uur en neemt de plannen voor de dag door. De laatste technicus doet vaak pas tegen de avond de deur achter zich dicht. En dan nog draait in de donkere machinehal geregeld de reusachtige computergestuurde freesrobot de hele nacht door. Schavend aan precisieonderdelen voor een van de detectoren op CERN of elders waarin Nikhef een aandeel levert.

*“Wat we hier bedenken en bouwen komt tot in het hart van de experimenten op CERN”*

Groepsleider  
Patrick Werneke





### Knikje uit ontwerp

In een hoek van de hoge goederenhal met 20-tons hijskranen aan het plafond staat engineer Jesse van Dongen gebogen over een groot trommelvormig wiel van zwart koolstof. Dit is een model op ware grootte van een nieuw onderdeel van de ATLAS-detector op CERN, de zogenoemde Inner Tracker (zie hiernaast). Nu is het rustig bij de mock-up, maar eerder deze maand bekeken Nikhef-onderzoekers en technici met een team van zusterlab DESY in Hamburg hoe in de draagconstructie vol verbindingen en leidingen een silicium sensorplaat te positioneren was. Niet, zo bleek, met de speciale Duitse draagarm die daarvoor ontwikkeld was. ‘Een hele schrik, maar ook een belangrijk leermoment’, noemt Van Dongen het. Inmiddels wordt er binnen de samenwerking op een oplossing gestudeerd.

Verderop in de vleugel zit op de afdeling engineering 3D-ontwerper Auke Korporaal achter zijn riante beeldscherm. Hij wijst op een kleurige afbeelding het draagarmprobleem in de wirwar van componenten aan. In het oorspronkelijk ontwerp zit in een dunne koelleiding een knikje, waardoor de sensoren bij het inschuiven ook nog een kleine neerwaartse beweging zouden

moeten kunnen maken. Maar dat kan zo’n draagarm dus niet, en aanpassen is te gecompliceerd. ‘Dat is wel een dingetje.’

Het knikje is om die reden inmiddels uit het ontwerp van de Inner Tracker gehaald, wijst Korporaal. ‘Maar alles hangt hier met alles samen en het 3D-ontwerp helpt je om alle aspecten in de gaten te houden. Iets moet niet alleen in elkaar passen, maar ook in elkaar te zetten zijn.’ Het lijken details, maar in dit soort ontwerpen telt iedere kleinigheid. En soms, zegt Korporaal ook, is dat best benauwend. ‘Er mag echt helemaal niks misgaan, want dan heb je meteen een groot probleem.’

### Lassen of knellen

In een van de ateliers naast de centrale machinehal neemt instrumentmaker Rob Leguijt in zijn blauwe stofjas twee uiteinden van dezelfde kunstig gebogen koelleidinkjes voorzichtig in zijn knoestige handen en duwt ze tegen elkaar. Zo zonder omgeving is het een fluitje van een cent om die twee goed aan elkaar te lassen, zegt hij. Een kwestie van een vaste hand. En die heeft hij.

Maar in de volgepropte omgeving van de nieuwe Inner Tacker wordt dat straks een heel ander verhaal, voorziet hij enigszins

“Uiteindelijk moet het allemaal wel in de echte wereld te koop zijn of te maken”

Inkoper  
Rob Buis

## Inner Tracker: siliciumhart voor de ATLAS-detector

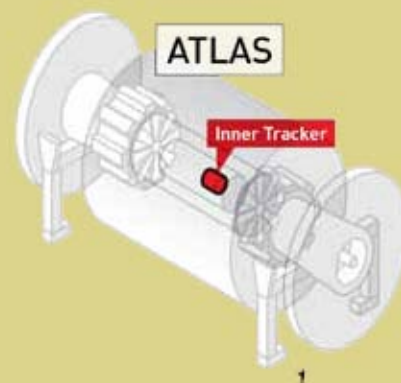
Middenin de reusachtige ATLAS-detector op CERN botsen protonen uit de LHC-versneller. Om het botsingspunt liggen laag na laag sensoren die de sporen van passerende deeltjes vastleggen. De eerste laag is die van de Inner Tracker (ITk). De huidige versie daarvan, zes meter lang en twee meter in diameter, wordt na 2024 vervangen door de ITk, een systeem dat met nieuwe sensoren, elektronica en software tot honderd protonbotsingen tegelijk aan zal kunnen.

Nikhef bouwt mee aan deze nieuwe ITk. Op het instituut in Amsterdam wordt de draagstructuur ontworpen en gebouwd van een van de uiteinden van de nieuwe ITk. Het DESY-laboratorium in Hamburg bouwt de andere. Een Nikhef-team onder leiding van ATLAS-wetenschapper Marcel Vreeswijk zoekt naar de lichtste en stijfste constructie.

Nikhef-wetenschapper Hella Snoek richt zich op de assemblage. De constructie moet uiteindelijk honderden printplaten met strips silicium-sensoren torsen en ook voldoende ruimte bieden voor alle bekabeling en koelleidingen.

In de werkplaats ligt een eerste versie ervan als een reusachtig zwart spaakwiel op een werkbank en testen en verbeteren Nikhef-technici en engineers de constructie tot in het kleinste detail. Niet alleen de vormgeving is daarbij belangrijk, maar ook hoe makkelijk of moeilijk alle componenten uiteindelijk te plaatsen zijn. De draagstructuur van de endcap zal uiteindelijk zes lagen hoog worden, met in elke laag plaats voor 32 bloembladvormige printplaten met silicium deeltjessensoren, de zogeheten petals. Die fragiele platen worden momenteel in instituten elders in de wereld vervaardigd en in 2021 en masse in Amsterdam en Hamburg verwacht voor de assemblage. De integratie van alle onderdelen moet in 2024 af zijn. Na uitgebreide tests gaan daarna de ITk-endcaps naar CERN en krijgt ATLAS zijn nieuwe siliciumhart.

Illustratie: Thijs Balder



Instrumentmaker  
Rob Leguijt

“Soms moet je gewoon kunnen zeggen: leuk bedacht, maar dit moet je echt heel anders doen”

bezorgd. ‘Vooral het idee dat je met een laspunt vlakbij een siliciumsensor van gemakkelijk een ton euro moet werken, en niet één keer maar honderd keer, dat is niet zo heel prettig’, zegt Leguijt. Hitte en hoogspanning kunnen zomaar schade geven, nog afgezien van eventuele lasfouten die lastig te herstellen zullen zijn. ‘Er is eigenlijk geen ruimte.’

In het technisch overleg met de ATLAS-wetenschappers op Nikhef heeft hij daarom zelfs al gesuggereerd om deze verbindingen helemaal niet te lassen maar met een knelkoppeling op te lossen. Maar inmiddels weet hij ook dat dat vermoedelijk ingewikkeld wordt. ‘CERN houdt niet van knelkoppelingen in koelsystemen, en dat verandert je niet eventjes’, heeft Leguijt begrepen.

### Samen met bedrijven

Het is maar een van de talloze details die allemaal van belang zijn in de samenwerkingen van de Mechanische Werkplaats zijn. ‘Je kunt wel zeggen dat alle kleinigheden belangrijk zijn’, zegt werkplaatshoofd Patrick Werneke in zijn glazen kantoortje. ‘Vooral omdat je als Nikhef nooit alleen werkt, maar met groepen die zomaar in de VS of Duitsland of Italië kunnen zitten.’ Daarnaast, gaat hij

verder, is het steeds gebruikelijker om voor serieproductie van componenten of onderdelen voor detectoren de industrie in te schakelen. ‘Duizenden bevestigingschoentjes moet je niet zelf meer willen maken, dat kunnen anderen beter.’

Klopt, zegt inkoper Rob Buis van de werkplaats, aan een bureau dat vol ligt met technische tekeningen en rapporten en dat omringd is door dozen met werkplaatsmateriaal. Ooit was hij zelf instrumentmaker, zelfs nog even bij Fokker. Maar tegenwoordig is hij de contactpersoon tussen de wetenschapswereld van Nikhef en de industrie. ‘Ik ken alle bedrijven en bedrijven kennen ons. Ik noem dat wel eens de echte wereld, waar dingen gewoon te maken en te betalen moeten zijn.’

Niet altijd een gemakkelijke opgave, zegt de gebruide zestiger Buis ook, met een blik op ontwerpen voor de Inner Tracker voor ATLAS op zijn bureau. De grote ringen van koolstofvezel moeten aan hun rand een speciale bewerking krijgen die de Nikhef-werkplaats niet zelf aankan. Maar ook heel wat bedrijven staan niet te springen, heeft hij gemerkt. ‘Enerzijds omdat bewerking van koolstof zwarte rommel geeft. Maar anderzijds ook omdat het om maar veertien ringen gaat. Dat is voor een bedrijf een hoop gedoe voor



## “Zo tof om met een Amerikaanse tekening een onderdeel te draaien voor een Nikhef-project in Italië”



Instrumentmaker  
Lara Dolleman

weinig.’ Overigens heeft hij inmiddels wel degelijk een partner gevonden. Buis lacht opgewekt over zijn bril.

### Proefstuk voor detector

In de centrale machinehal staat instrumentmaker Gerrit Brouwer aan een draaibank en snijdt met een strakke blik op de cijferdisplay een gat in een koperen flens. Hij neemt een kunststof schijfje met een as en probeert of het past. Brouwer maakt een stukje gereedschap dat bij de productie van onderdelen van de grote ALICE-detector op CERN kan worden gebruikt. ‘Om het werkstuk met steeds dezelfde beweging te kantelen’, zegt hij. ‘Dat voorkomt fouten en maakt het proces ook nog wat sneller.’ Het teflon-schijfje, stelt hij tevreden vast, past. ‘Het oog van de meester. Of gewoon bluf. Zeg het maar.’

Wat verderop staat aan een andere draaibank de veel jongere instrumentmaker Lara Dolleman, die na een stage voor haar opleiding op Nikhef een contract kreeg. Op de machine draait een staafje wit kunststof langs een speciale beitel terwijl ze aanwijzingen van een werktekening aan de achterwand afleest. De tekening is gemaakt door een Amerikaanse engineer. Dit, zegt ze, wordt een proefstuk voor een onderdeel van het ondergrondse XENON-experiment in Italië dat op donkere materie aast. Een testopstelling voor de vloeistoftechnieken staat elders in het Nikhef-gebouw.

Dat nieuwe onderdeel zal uiteindelijk in heel bijzonder en dus peperduur stralingsvrij kunststof moeten worden uitgevoerd. Nu gaat het vooral om de maatvoeringen, die allemaal nieuw zijn. ‘Kijken of het past en of het vloeibare xenon er doorheen wil. Best wel tof om met een Amerikaans

ontwerp iets te maken voor een Nikhef-experiment in Italië’, zegt ze enthousiast. ‘Ook al is het soms wel lastig om precies te zien wat ze willen.’

### Opbergbox voor bloembladen

Communicatie tussen internationale partners is soms wel een dingetje, weet ook de jonge engineer Bart Gijsbers op de ontwerpafdeling. Hij studeerde in Delft en werkt nu aan een ogenschijnlijk eenvoudig element in het grote internationale Innertracker-project: een opbergbox voor de siliciumsensoren die in de VS zullen worden gemaakt.

Zulke zogeheten petals (bloembladen naar hun vorm) zijn peperduur en kwetsbaar en moeten vanuit Amerika worden verscheept naar in eerste instantie Duitsland en dan nog eens naar

Amsterdam waar ze in de draagconstructie gemonteerd zullen moeten worden. Het Innertracker-project wil zeker weten dat er niks mis kan gaan tijdens het vervoer. ‘Dat je iets tekent dat vervolgens ook door anderen moet worden gebruikt, maakt het wel bijzonder’, zegt Gijsbers, die in het najaar overigens aan een universiteit in Kopenhagen begint.

Dat vertrek is jammer, zegt werkplaats-hoofd Patrick Werneke eerlijk. Het valt deze dagen niet echt mee om jong technisch talent naar de wetenschappelijke werkplaats te trekken. ‘Er is veel vraag in de industrie en deze academische omgeving moet je ook wel een beetje liggen. Onze technici zijn relatief zelfstandig maar je moet wel overeind blijven in een omgeving met wetenschappers met veel wensen.’



Engineer  
Auke Korporaal

“Het moet niet alleen in elkaar passen, maar ook nog in elkaar te zetten zijn”

### Freesrobot met geduld

In de machinehal tuurt technicus Willem Kuilman na een paar weken vakantie intussen voor het eerst weer door het raam van de DMF260. Dat is een bakbeest van een computergestuurde freesrobot, die al maanden werkt aan de vervaardiging van dunne metalen boxen voor het LHCb-experiment op CERN. Daarmee zullen ze de deeltjesdetectoren in het hart van het experiment onder vacuüm houden, zonder de deeltjessporen te verstoren.

Die boxen worden, om de wanddiktes en vorm precies in de hand te hebben, met eindeloos geduld gefreesd uit massieve blokken aluminium. Op time-lapse filmpjes die Nikhef-engineer en fotograaf Marco Kraan van het werk maakt, is Kuilman geregeld te zien. Niet alleen voor het precisiewerk, maar ook om enorme bergen metaalkrullen uit de machine te vegen. Die gaan vanzelfsprekend naar de recycling.

### Samen mooie dingen doen

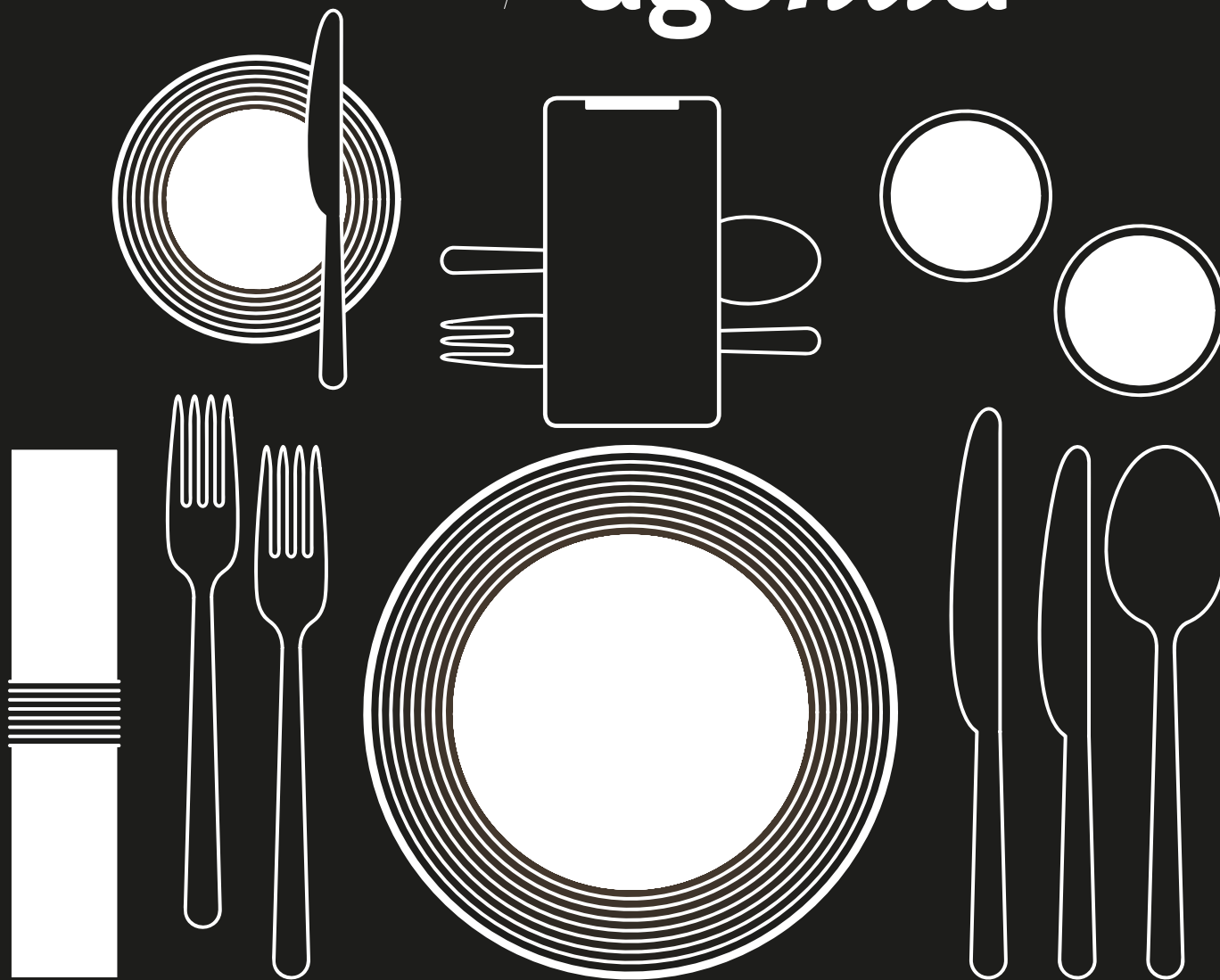
Het huidige werkstuk is de zevende en laatste RF-box die Nikhef maakt. Instrumentmaker Kuilman volgt de wetenschappelijke achtergronden van zijn LHCb-experiment naar eigen zeggen een beetje. ‘Net genoeg om er op een vrijdagdag iets over te kunnen vertellen, maar lang niet alles natuurlijk. Het is ieder zijn vak. Zij weten alles van de deeltjes. Ik weet alles van metaalbewerking. Samen kun je mooie dingen doen.’

Engineer Auke Korporaal zegt verderop achter zijn beeldscherm met 3D-modellen hetzelfde. ‘Toen ATLAS jaren geleden het higgsdeeltje vond, was ik hartstikke trots, ook al had ik maar een klein detail bijgedragen. In feite geldt dat voor iedereen bij zo’n project. Voor de technici, maar net zo goed voor de wetenschappers. Elk detail telt.’ ◀





# Heelal bepaalt de agenda



Sinds april vangen wetenschappers meer signalen van fuserende zwarte gaten en botsende neutronensterren op dan ooit. De zwaartekrachtsgolfdetecties van LIGO en Virgo beïnvloeden de agenda van veel sterrenkundigen en theoretisch natuurkundigen.

Tekst: David Redeker

Uit eten met sterrenkundige Peter Jonker (SRON en Radboud Universiteit) is sinds april 2019 niet meer wat het geweest is. Boven zijn bord, op zijn dessertlepel, ligt zijn mobiele telefoon. Regelmatig kijkt hij er even op. Niet voor appjes van vrouwen en kinderen of voor de sportuitslagen, maar om te checken of er een zwaartekrachtsgolf is gesignaleerd. Jonker beslist namelijk onder andere of de Gran Telescopio Canarias op La Palma moet stoppen met de geplande bezigheden en het vizier moet richten op de vermoedelijke bron van de zwaartekrachtsgolf. Jonker: 'Als ik een alarm binnenkrijg dan check ik snel drie dingen: is het op het noordelijk halfrond of niet te ver zuidelijk? Is het dichtbij genoeg? En, niet onbelangrijk, is het donker? Bij drie keer ja, bel ik de telescoop-operator en draaien we de telescoop in de goede richting.'

'Pop, pop, pop', Samaya Nissanke, sterrenkundige aan de Universiteit van Amsterdam, steekt haar vuisten omhoog, opent en sluit ze afwisselend en zegt: 'Het heelal is net een pan met popcorn.' Tot april 2019 werden er ongeveer elf zwaartekrachtsgolven in een jaar gedetecteerd. Nu, na de update van LIGO en Virgo in de Verenigde Staten en Italië zijn er gemiddeld één of twee kandidaten per week. Daarbij houdt het heelal duidelijk geen rekening met het weekend. Van de dertien kandidaten in april en mei waren er vijf op vrijdag en drie op zondag. Nissanke, glimlachend: 'Die van vrijdag 26 april heeft mijn Koningsdag op zijn kop gezet. Ik heb het hele weekend video-gesprekken gevoerd en naar follow-up-metingen gekeken.'

Dat roept meteen de vraag op of de wetenschap al die zwaartekrachtsgolven wel aan kan. Nissanke: 'De eerste jaren dat LIGO en Virgo actief waren, volgden we elke zwaartekrachtsgolf uitgebreid met tientallen telescopen. Nu zie je dat de sterrenkundegemeenschap kiest welke

kandidaten het waard zijn om met telescopen te volgen. En gelukkig begrijpen de meeste astronomen het wel als een zwaartekrachtsgolf hun vooraf gereserveerde telescooptijd verstoort.'

## 1 op 10 is vals alarm

Als LIGO of Virgo een potentieel signaal opvangt, geven de detectoren dat binnen een seconde aan elkaar door. Dan worden er computergestuurd een aantal standaardcontroles uitgevoerd. Na een minuut gaat er automatisch een openbaar alarm uit met daarbij een eerste indicatie van de plek aan de hemel en een maat voor de betrouwbaarheid. Dat is het moment dat bij Peter Jonker een sms binnenkomt en hij moet beslissen of hij 'zijn' telescoop gaat draaien.

Na die eerste automatische minuut gaat het *rapid response team* van LIGO-Virgo aan de slag. Zij voegen onder andere de massa en de draaiing van de botsende neutronensterren en zwarte gaten toe en stellen de betrouwbaarheid bij. Soms wordt een in beginsel veelbelovend signaal aangemerkt als vals alarm.

Jo van den Brand, onderzoeker bij Nikhef en wetenschappelijk woordvoerder van Virgo, vertelt dat die valse alarmen erbij horen. 'We hebben in de afgelopen jaren met honderden sterrenkundigen gesproken. Zij zeggen dat ze liever één op de tien keer een vals alarm krijgen dan dat ze een belangrijk signaal missen.' In april en mei waren er veertien signalen waarvan er later één werd aangemerkt als vals en één als waarschijnlijk vals. Van den Brand: 'Dat komt dus redelijk overeen met de wensen van de astronomen.'

Volgens Van den Brand heeft het rapid response team het best zwaar gehad de afgelopen maanden. 'We willen snel reageren en het is tot nu toe nog veel handwerk. Uiteindelijk gaan we steeds meer processen automatiseren. Dat moet de druk op het team verlichten.'

## Geen stress voor theoretici

Tanja Hinderer (theoretisch natuurkundige aan de Universiteit van Amsterdam) houdt zich vooral bezig met het modelleren van botsende zwarte gaten en sterren. Ze heeft geen last van gebroken nachten of stress. 'Natuurlijk, 's ochtends kijk ik in mijn mail of er nog alarmeringen zijn en dan check ik of er bijzondere verschijnselen tussen zitten.'

Hinderer en veel andere sterrenkundigen zijn vooral geïnteresseerd in de fusie van een zwart gat met een neutronenster. Omdat daar ook licht (natuurkundigen noemen het liever elektromagnetische straling) vrijkomt, kunnen er uit zo'n botsing veel details worden gehaald. Hinderer: 'Dan moet je bijvoorbeeld denken aan de draairichting, de temperatuur en de verhouding van de massa's.' Met die nieuwe gegevens verbeteren theoretici als Hinderer hun modellen. Zo kunnen ze gericht de ruis van LIGO en Virgo afzoeken naar signalen van nog onbekende verschijnselen.

## Botsing in aantocht

Al met al lijkt de derde waarnemingsperiode van LIGO-Virgo niet voor grote stress bij sterrenkundigen te zorgen. Ja, etentjes zijn minder sociaal, Koningsdagen vallen in het water en in juni was het erg stil. Maar alles bij elkaar hebben de sterrenkundigen het aardig voor elkaar. Nog wel.

Na april 2020 krijgen de detectoren namelijk een nieuwe upgrade. En in de toekomst staan er detectoren op de planning in onder andere India, Europa en in de ruimte. Dan verwachten de wetenschappers één detectie per dag in plaats van eens per week. Dat lijkt ondoenlijk, maar Van den Brand ziet het van de positieve kant: 'De toekomstige detectoren zijn dan zo goed dat ze de botsing een dag van tevoren al zien aankomen. Dan kunnen de sterrenkundigen hun telescopen rustig in stelling brengen.' ◀



EIND JUNI 2019. LONDEN. DE KANTOREN VAN NATURE...



# DE MAAND DAT HET HEELAL ZWEEG

SCENARIO: MARTIJN VAN CALMTHOUT - TEKENINGEN: ERIK KRIEK



VERSLAGGEVER DAVIDE CASTELVECCHI STAART IN ZIJN LAPTOP. KRABT ZICH OP HET HOOFD.

IN APRIL EN MEI SCHREEF HIJ WEKELIJKS IN NATURE OVER DE LIGO- EN VIRGO-DETECTOREN.



PAKWEK ELKE WEEK TRILDEN DE DETECTOREN IN AMERIKA EN ITALIË.



BOTSENDE ZWARTE GATEN, VER WEG, DIE HET HEELAL ALS EEN VIJVER LATEN GOLVEN. MAAR NU EVEN NIET.

DE JOURNALIST OPENT EEN NIEUW SCHERM. BEGINT TE TIKKEN. DE MAAND DAT HET HEELAL ZWEEG, STAAT ER ALVAST.



JOURNALIST CASTELVECCHI VOLGT LIGO EN VIRGO AL SINDE IN 2015 DE EERSTE ZWAARTEKRACHTSGOLF WERD GEMETEN.



EN IN 2018 EEN NOBELPRIJS WAARD.

EEN EEUW EERDER SCHREEF ALBERT EINSTEIN ZIJN RELATIVITEITSTHEORIE OP.



RUIMTE EN TIJD VORMEN DAARIN EEN SLAP MATRAS WAAR PLANETEN EN ZONNEN OVERHEEN ROLLEN. BIJ GROTE AANVARINGEN SCHUDT HET HELE BED. DAT ZIJN ZWAARTEKRACHTGOLVEN.



DE KILOMETERLANGE ARMEN VAN LIGO EN VIRGO KUNNEN DAT SCHUDDEN MET LASERS VOELEN.

MAAR NU LIJKT HET HEELAL AL EEN MAAND STIL. WAAROM?



CASTELVECCHI NEEMT ZIJN IPHONE EN BELT JO VAN DEN BRAND VAN VIRGO BIJ PISA; STAAN ZIJN DETECTOREN WEL AAN?



DE NEDERLANDER VAN DEN BRAND LEGT GEDULDIG UIT.



"DE GECompliceerde DETECTOREN IN DE VS EN ITALIË STAAN GEMIDDELD VOOR VIERVIJFDE VAN DE TIJD AAN. DAT IS VOOR ZULKE INSTALLATIES EEN TECHNISCHE HOOGSTANDJE."

"MAAR HET BEVENDE HEELAL IS EEN CASINO MET STATISTIEK DIE AL ROND 1800 DOOR DE FRANSMAN SIMEON POISSON WERD DOORGEREKEND."



"HET IS ALSOF JE NAAR ROULETTE KIJKT, MAAR SOMS EVEN NAAR DE BAR GAAT. GEMIDDELD IS DE KANS OP ROOD EEN HALF. MAAR HET KAN BEST DAT JE EEN AVONDLANG VOORAL ZWART ZIET."

DE KANS OP EEN MEETBARE ZWAARTEKRACHTGOLF IS GEMIDDELD EENS IN DE WEEK. VIER WEKEN NIKS IS DAN NIET VREEMD, ZEGT DE POISSONSTATISTIEK."

"WEES DUS GEDULDIG", ZEGT JO VAN DEN BRAND.  
"ER IS IMMER NIETS ZO BETROUWBAAR ALS HET TOEVAL."



EEN BOTSING VAN ZWARTE GATEN, CONCLUDEERT DE ANALYSESOFTWARE SNEL. WERELDWIJD LICHTEN TELEFOONS VAN ASTRONOMEN OP. BINNEN ENKELE MINUTEN RICHTEN ZE HUN TELESCOPEN OP DE HEEMEL.



HIJ KRIJGT GELIJK. OP ZONDAG 30 JUNI. OM 20.56 UUR SCHRIJFT DE LANDERIGE CONTROLEKAMER VAN VIRGO IN PISA OP. NET ALS IN HANFORD EN LIVINGSTON. OP ALLE SCHERMEN STAAT NA VIER WEKEN WACHTEN EINDELIJK WEER EEN TRILLING.



OOK CASTELVECCHI KRIJGT DE MELDING. EINDE AAN EEN ONGEMAKKELIJKE STILTE BIJ LIGO EN VIRGO, MELDT NATURE DIE AVOND OP TWITTER. EN DE MAANDEN DAARNA GOLFT HET HEELAL VROLIJK VERDER



Foto: Martin Mug

### Groningse scholieren WINNEN CERN-WEDSTRIJD

Een groep scholieren van het Praedinius Gymnasium in Groningen heeft de Beamline for Schools Competition 2019 gewonnen. Het team genaamd 'Particle Peers' bestaat uit zes vijfdejaars (inmiddels zesdejaars) scholieren uit de bèta-topklas. Ze mogen hun experiment in oktober uitvoeren bij de DESY-deeltjesversneller in Hamburg. De Groningers willen de deeltjesregens van botsende elektronen vergelijken met hun anti-elektronen: de positronen. De Beamline for Schools Competition is een internationale wedstrijd voor middelbare scholieren georganiseerd door CERN. Dit jaar deden 178 teams mee uit 49 landen. Groningen is een van de twee winnaars. De andere gelukkigen komen uit Salt Lake City. Omdat de LHC-deeltjesversneller bij CERN in onderhoud is, wijken de winnaars dit jaar uit naar Hamburg.



Foto: RPBW

### Renzo Piano ontwerpt NIEUW BEZOEKERSCENTRUM CERN

De bekende architect Renzo Piano heeft zijn ontwerpen gepresenteerd voor het nieuwe publiekscentrum van CERN. De Science Gateway, zoals het bezoekerscentrum heet, moet in 2022 klaar zijn en kan dan zo'n 300.000 bezoekers per jaar ontvangen. Het gebouw bestaat uit drie paviljoens: een voor tentoonstellingen, een voor publieksslabs en voor een groot amfitheater. Ze zijn verbonden via een brug over de weg langs CERN-locatie Meyrin. Renzo Piano is in Nederland onder meer bekend van NEMO Science Museum in Amsterdam. Het nieuwe gebouw kost ruim 70 miljoen euro en wordt gefinancierd uit giften van onder andere de Italiaanse Fiat Chrysler Foundation.

### Ideeën voor NIEUWE VERSNELLERS VERGELEKEN

De Europese deeltjesfysici denken na over de toekomst. In mei kregen de deelnemers aan de grote CERN-conferentie in het Spaanse Granada voor het eerst een document in handen waarmee ze zeven voorstellen voor een nieuwe versneller echt konden vergelijken. Wouter Verkerke (Nikhef) was lid van de technische commissie die het document opstelde en de voorstellen de maat nam: 'In plaats van appels en peren kunnen nu appels met appels worden vergeleken.' De studies maken deel uit van de discussies over een nieuwe Europese strategie voor de deeltjesfysica. Die strategie moet in de eerste helft van 2020 worden geformuleerd. Grofweg zijn er twee grootheden die daarbij van belang zijn: de intensiteit van de bundels, die grote hoeveelheden meetgegevens geven, en de energie van de bundels, waarmee onbekende gebieden kunnen worden afgetast. Voor detailvragen over de higgs zijn vooral veel deeltjes nodig. Sommige voorstellen worden daarom wel higgsfabrieken genoemd. Voor de ontdekking van nieuwe deeltjes is vooral veel energie nodig.

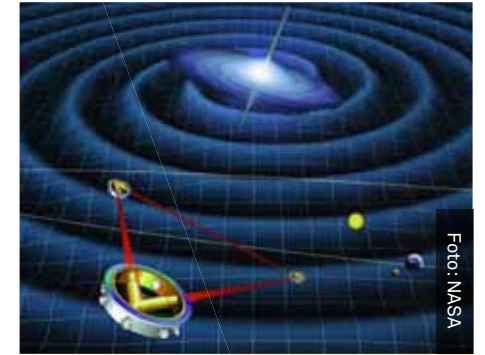


Foto: NASA

### Nederland ontwikkelt BRIL EN OGEN VOOR LISA

Nederlandse instellingen hebben een aantal contracten getekend ter voorbereiding op LISA, de eerste ruimtetelescoop voor zwaarte-krachtsgolven. De telescoop bestaat uit drie satellieten op 2,5 miljoen kilometer van elkaar waartussen laserstralen kaatsen. TNO gaat prototypes ontwikkelen voor het richten van delen van de optica: LISA's bril. Hiermee kunnen bijvoorbeeld de laserstralen precies uitgelijnd worden. Nikhef, Bright Photonics en Smart Photonics starten onder leiding van SRON de ontwikkeling van een prototype van de zogenoemde quadrant-fotodiodes: het laserdetectiesysteem oftewel LISA's ogen. Over ongeveer een jaar moeten beide prototypes klaar zijn, als een eerste proeve van bekwaamheid. De lancering van LISA zelf staat gepland voor 2034.

### Einstein Telescope presenteert MAQUETTE AAN VLAAMSE MINISTER

Het consortium van Belgische, Duitse en Nederlandse universiteiten en onderzoeksinstellingen heeft hun plannen voor Einstein Telescope en ETpathfinder gepresenteerd aan de Vlaamse minister van innovatie Philippe Muyters. Bij de presentatie werd ook een maquette onthuld van ETpathfinder, de onderzoeksfaciliteit die de komende jaren in Maastricht wordt ingericht. Die onderzoeksfaciliteit, die min of meer los staat van Einstein Telescope, moet uitgroeien tot een internationaal centrum voor onderzoek naar zwaarte-kracht-astronomie, hogeprecisie-meettechnieken, seismische isolatie, meet-en-regelsoftware, cryogene techniek en (quantum)optica.



Foto: Marco Kraan



# De theoreticus die sommen saai vindt

Onder collega-theoretici is *Jos Vermaseren* van Nikhef een begrip. Zijn klassiek geworden computerprogramma FORM maakt wiskundige afleidingen mogelijk die het menselijke geduld ver te boven gaan.

Tekst: Martijn van Calmthout  
Foto: Mats van Soolingen

Meestal wel hoor. Maar soms, zegt theoretische natuurkundige Jos Vermaseren met een geamuseerde glimlach, soms is theoretische natuurkunde dus geen leuk vak.

Bijvoorbeeld als een vergelijking eindeloos veel termen heeft, die allemaal een voor een moeten worden doorgewerkt. 'Duizenden, tienduizenden aparte deelberekeningen. Dat is bijna lopendebandwerk, maar het moet allemaal gebeuren als je een precies antwoord zoekt. Dan ga je vanzelf denken: kan dit niet worden geautomatiseerd? En ja, dat kan dus heel vaak best.'

Vermaseren (70) studeerde begin jaren '70 natuurkunde in Nijmegen en stoeide daar en passant al gretig met computers en software. Als student assisteerde hij behendig een post-doc bij computerwerk, op verzoek van hun hoogleraar. Het bezorgde hem als overduidelijke uitblikker een promotieplaats aan de Stony Brook University in New York, en daarna een postdoc-plaats op Purdue. 'Indiana. Een beetje achteraf. Maar niet ver van het grote Fermilab, waar een goeie theoriegroep zat en waar een forse computer stond. Met een auto was dat goed te doen.'

Het was de tijd dat versnellers als op Fermilab nog een verwarrende rijkdom aan onbekende deeltjes uitspudden, en theoretici daar onderliggende patronen en orde in probeerden te vinden. Tegenwoordig is het Standaard Model de gangbare theorie die alles van elektronen tot het higgs-deeltje beschrijft. Maar toen was al die theorie nog met vallen en opstaan in aanbouw.

Theoretici proberen de verbanden in de natuur te beschrijven, en testen hun theorieën door uitkomsten van experimenten te voorspellen. Dat soort voorspellingen begint altijd grof, in de hoop dat details minder belangrijk zullen zijn en details van details nog minder.

Maar hoop is niet genoeg, zegt Vermaseren 'Als je concrete getallen wilt, moet je ook die details en de details van de details doorrekenen. Het aantal lussen, zoals we dat noemen, neemt razendsnel toe en kost dus veel tijd. Je bent zo een jaar of langer bezig met een berekening van wat je uit een echt experiment verwacht.'

Vermaseren werkte voor dat soort rekenwerk aanvankelijk met het befaamde programma Schoonschip van

de latere Nobelprijswinnaar Martinus Veltman in Utrecht, de promotor van Gerard 't Hooft. 'Een baanbrekend programma dat algebraïsche vergelijkingen automatisch uitschrijft, maar waaraan ook altijd veel te sleutelen bleef. In eerste instantie vroeg je Veltman dan of hij iets voor je kon aanpassen of uitbreiden. Maar daar had hij natuurlijk helemaal geen tijd voor. Of geen zin in. En als ik tegen een probleem aanloop, los ik het ook liever gewoon echt op. Desnoods met zelfge-maakt gereedschap.'

## En dus schreef u het programma FORM?

'Om diverse redenen. Een belangrijke was dat Schoonschip in machinetaal was geschreven voor een specifiek type computers. Ik wilde iets maken dat voor alle platforms geschikt zou zijn. In een gangbare taal. Eerst was dat Fortran, maar ik had intussen zelf een Atari-computer gekocht en leerde programmeren in C. Veel makkelijker en flexibeler. In 1989 bracht ik de eerste versie uit, met een keurige handleiding en al. Rijk ben ik er niet van geworden, maar het werd meteen overal gebruikt.'

## Raar idee, om wiskundig werk aan een computer over te laten.

'Nee hoor. Wiskundige afleidingen hebben een logische structuur. Dat kun je met de hand gaan zitten doen. Maar een computer kent dezelfde regels, en is een heel stuk sneller.'

*FORM werd zo ongeveer het standaardgereedschap voor theoretici. Dat leverde u in 2004 de eervolle*

## Humboldt-prijs uit Duitsland op.

'En een stimulans om nog een en ander aan FORM te verbeteren. Ik mag graag een beetje spelen met technieken. Om te zien wat je eigenlijk in handen hebt en te zien wat er nog meer kan.'

## U had uitvinder moeten worden.

'Ik ben vooral een puzzelaar. Ik los graag dingetjes op. Maar zonder dat ik er rijk van hoef te worden hoor. Als ik me geen zorgen hoef te maken om het avondmaal, is het goed. Ik vlieg economy class. Tenzij iemand me heel aardig een business-ticket stuurt natuurlijk.'

## U praat over uw werk alsof het allemaal vanzelf gaat.

'Als ik me iets kan voorstellen, gaan dingen vaak wel heel makkelijk. Maar als een programma echt tienduizend regels groot is, doe je dat niet even in een avond. Dat is dan gewoon hard werken. Ook voor mij.'

## Een bureau, met een laptop, pen en papier. Meer heeft een theoreticus niet nodig?

'Ik ben nu eenmaal theoreticus. Maar als je alleen met je hoofd werkt, word je gek. Dus gebruik ik graag ook mijn handen. Ik heb een boekenkast gebouwd op basis van een vlakverdeling van Piet Mondriaan, met honderd meter geweldig mooi eikenhout, en toch maar vier schroeven om het geheel vast te houden. Ik maak met de oude naaimachine van mijn moeder tafelkleden volgens een gecompliceerd tegelpatroon van de grote theoreticus Roger Penrose. Vijfvoudige symmetrie. Dus theoretisch interessant en nog mooi ook.' ◀



# Geen punt in Groningen

Op het Van Swinderen-laboratorium in Groningen onderzoekt een Nikhef-groep het elektron. Dat lijkt een oude bekende, maar zou een groot geheim kunnen bevatten.

Tekst: Martijn van Calmthout / Foto: Reyer Boxem

Aan de uiterste noordrand van het Zernike-wetenschapspark in Groningen, nog voorbij de commerciële datahotels en de plaatselijke warmtecentrale, staat het Van Swinderen-laboratorium. Een massief gebouw van baksteen en beton, met een rijke geschiedenis in de kernfysica. Nu is dit het domein van de eEDM-groep van Steven Hoekstra, een jonge hoogleraar aan de Rijksuniversiteit Groningen en Nikhef-groepsleider.

## Sloomste

Welkom bij de sloomste groep van Nikhef, grapt de energieke Hoekstra graag tegen zijn bezoekers. 'Wij versnellen deeltjes niet, we vertragen ze. Maar met hetzelfde idee dat je zo een venster creëert op de wereld van de allerkleinste, elementaire deeltjes.'

Dat allerkleinste is in zijn geval het elektron. Een elektrisch negatief geladen puntdeeltje waarvan heel veel bekend is. Maar niet alles, benadrukken natuurkundigen als Hoekstra. 'Een wiskundige punt

ziet er van alle kanten hetzelfde uit, maar misschien is dat voor het elektron toch niet helemaal waar. In theorie kan het iets voelen van deeltjes die soms even uit de lege ruimte eromheen opduiken. En die interactie maakt de boel asymmetrisch, alsof het elektron toch een beetje vorm heeft.'

In de gangbare deeltjestheorie van het Standaard Model is die afwijking van de ideale punt hooguit superklein, en haast zeker niet te meten. Maar fysici weten ook dat het Standaard Model niet het hele verhaal over de deeltjeswereld kan zijn. Misschien zijn er meer deeltjes dan tot nog toe zijn gezien. En sommige daarvan lijken in theorie het elektron veel meer uit zijn puntvorm te kunnen brengen.

## Jagen op dipoolmoment

Supersymmetrie is zo'n theorie, die draait om het idee dat bekende deeltjes nog onontdekte familieleden hebben. De LHC-versneller op CERN kon daarvoor tot nog toe geen aanwijzingen vinden. Mogelijk, denkt Hoekstra, lukt dat via het dipoolmoment van het elektron uiteindelijk wel. 'En met een veel bescheidener experiment.'

Hij is niet de enige die dat hoopt. Nog zeker twee andere groepen in de wereld

jagen op datzelfde elektron-dipoolmoment. Het Nikhef-team, circa 25 goeddeels jonge vrouwen en mannen, heeft NWO-financiering tot 2022 om de klus te klaren. Ze komen van over de hele wereld, van India tot Denemarken en Zweden.

## Eerste doorbraak

In een van de labruimtes van het instituut tuurt een masterstudente door een kijkertje op een driepootstatief naar het hart van de opstelling, meters verderop waar een collega aan stelschroefjes draait. Het team werkt aan de exacte uitlijning van de Stark-decelerator, het hart van hun meterslange meetopstelling.

In de vier meter lange vertrager vormen honderden ragfijne metalen ringetjes van een millimeter doorsnee een tunnel voor een binnenkomende molecuulbundel. Goed-getimede elektrische golven vertragen de elektronen van driehonderd naar minder dan dertig meter per seconde of nog slomer. Bij die lage snelheid ontstaat er genoeg tijd om met een laser eigenschappen van de gebruikte moleculen met extreme precisie te bestuderen.

In het voorjaar is een muur in het lab gesloopt om aan het uiteinde voldoende ruimte te maken voor de laseropstelling. 'Onze eerste doorbraak', grijnst Hoekstra. De componenten voor het experiment, van de molecuulbron en de vertrager tot de laseropstelling, zijn de afgelopen jaren gebouwd, gekarakteriseerd en getest. Nu worden ze samengebouwd, ondermeer

De eEDM-groep bij hun vertrager. Van Links naar rechts: Yongliang Hao, Steven Hoekstra, Pi Haase, Ginny Marshall en Parul Aggarwal

door de Indiase promovenda Parul Aggarwal en haar Britse collega Ginny Marshall.

## Twaalf plaatsen achter de komma

Wie het subtiele dipoolmoment van een elektron wil meten, moet wel slim zijn, zegt de Deense promovenda Pi Haase. Rechtstreeks meten kan eigenlijk niet, het is een effect dat zich ergens twaalf plaatsen achter de komma openbaart. Om zoiets kleins te meten zijn immense elektrische velden nodig. Maar er is een truc.

Haase schetst een sneeuwpopvormig molecuul van een groot bariumatoom en een kleiner fluoratoom, met daaromheen elektronen. Tussen de twee atomen in BaF ondergaan elektronen van nature over korte afstanden al enorme elektrische krachten die onmogelijk in een laboratorium te maken zouden zijn. Hun gedrag onder die extreme omstandigheden is met lasers af te tasten. Voorwaarde is alleen wel dat de moleculen stilstaan.

'De natuur reikt ons eigenlijk de juiste omstandigheden aan', vult de Chinese promovendi rekenden de afgelopen jaren aan de theoretische modellen die voorstellen aan welk elektrongedrag in dat tussengebied een eventueel elektron-dipoolmoment herkend zou kunnen worden.

Groepsleider Steven Hoekstra is optimistisch over wat er met de Groningse opstelling te bereiken zal zijn. 'Ik denk dat we de komende jaren verder achter de komma van het Standaard Model gaan kijken dan de experimenten in de grote LHC-versneller op CERN. Als er niks gek zit, weten we beter tot waar het model werkt. En als er wel wat zit, dan is dat meteen wereldnieuws.' ◀





# Machine learning is een must voor de deeltjesfysica

Hoe kun je nieuwe natuurkunde vinden zonder een model te hebben van die fysica? *Machine learning* is daarvoor essentieel, beweert deeltjesfysicus *Sascha Caron*. Hij past het toe in de zoektocht naar donkere materie.

Tekst: Bennie Mols / Foto: Mats van Soolingen

‘Voor mijn kinderen is het heel normaal dat een auto zelf kan rijden, dat een machine hun vragen beantwoordt en dat een robot hen helpt om wetenschap te bedrijven. Deze nieuwe generatie denkt heel anders dan mijn generatie of nog oudere generaties. Dat zie ik ook in mijn vakgebied.’

Aan het woord is Sascha Caron, universitair hoofddocent deeltjesfysica aan de Radboud Universiteit Nijmegen en tevens verbonden aan Nikhef. Hij is gespecialiseerd in data-analyse, in het bijzonder die bij de zoektocht naar donkere materie. Daarin is hij een van de pioniers in het gebruik van *machine learning*.

Caron: ‘Als je bij Nikhef nu de vraag zou stellen wat het nut is van machine learning in de deeltjesfysica, dan zul je vaak antwoorden horen in de trant van: het is een hype, of: dat we doen al twintig jaar. Mijn eigen antwoord luidt: machine learning is een must, we doen er veel te weinig mee en veel te weinig fysici begrijpen het potentieel.’

Voor de deeltjesfysica ligt dat potentieel volgens Caron op vier terreinen: het beter classificeren van deeltjes en botsingsgebeurtenissen, het direct afleiden van fysica uit ruwe data, het vinden van nieuwe fysica zonder een model van die fysica te hebben, en tenslotte het fantaseren of – netter gezegd – bedenken van nieuwe fysica. Dat is nogal wat.

## Neurale netwerken

Machine learning is het onderdeel van de kunstmatige intelligentie waarin computers nieuwe taken leren in plaats van alleen maar voorgeprogrammeerde taken uitvoeren. Een van de eenvoudigste praktische toepassingen is een computer die leert om in je e-mailbox spam van niet-spam te onderscheiden zonder dat hem van te voren precies is verteld hoe een spam-bericht is opgesteld.

De meest populaire manier van machine learning gebruikt neurale net-

werken. Dat idee is geïnspireerd op de manier waarop het menselijk brein leert. Het simuleert een netwerk van neuronen op een computer. Deze kunstmatige neuronen zijn met elkaar verbonden en tijdens het leerproces veranderen de ‘gewichten’ die aangeven hoe sterk twee neuronen met elkaar zijn verbonden.

Neurale netwerken bestaan al decennialang, maar boekten ook net zo lang nauwelijks succes. Dat veranderde in 2012 toen diepe neurale netwerken, met meer lagen van neuronen dan voorheen, het ineens veel beter bleken te doen bij het classificeren van voorwerpen in afbeeldingen dan alle andere methoden. Sindsdien duiken neurale netwerken overal op, nu onder de naam *deep learning*: van beeld- en spraakherkenning tot medische diagnoses en robotica, en sinds een paar jaar ook in de natuurwetenschappen. Zo ontdekten astronomen in 2017 dankzij machine learning een nieuwe exoplaneet. Scheikundigen kunnen dankzij machine learning sneller interessante nieuwe materialen vinden.

Dankzij deep learning kunnen computers nu razendsnel en zonder moeite worden patronen in data herkennen. Soms zijn dat patronen die de mens ook wel zou herkennen, maar soms ook zijn dat subtiele patronen die de mens niet ziet. In 2016 deed go-computer AlphaGo tegen de beste go-speler van het decennium dankzij zijn zelflerende vermogen een zet die menselijke top-spelers als oerdom beschouwden, maar die achteraf geniaal bleek te zijn.

## Geen voorkennis nodig

Geïnspireerd door de successen van deep learning op andere terreinen, ging ook een klein groepje deeltjesfysici ermee aan de slag. In 2014 boekten zij hun eerste succes. Ze lieten zien dat deep learning acht procent beter dan alle andere methoden in staat was om in de data van botsingsdetectoren deeltjes te onderscheiden van achtergrondruis.





‘Dat is mooi’, zegt Caron, ‘maar niet fundamenteel nieuw. Wat wel echt nieuw was, is dat deep learning daarvoor geen voorkennis over de fysica nodig heeft. De standaardmethode van classificeren eist dat wel. Traditioneel bedenkt een bepaalde groep theoretisch fysici variabelen die geschikt zijn om naar nieuwe natuurkunde te zoeken. Dat is de voorkennis. Ik durf wel te stellen dat het voor deze fysici na de publicatie in 2014 *game over* is. Zij gaan nooit meer variabelen bedenken die het beter doen in het classificeren dan een neuraal netwerk. Een diep neuraal netwerk heeft gewoon veel meer vrijheid om zich aan te passen aan de data.’

Het is de combinatie van diepe neurale netwerken, meer trainingsdata, betere simulatoren om trainingsdata zelf te maken, betere algoritmen om neurale netwerken te trainen en betere hardware die maken dat diepe neurale netwerken nu zo’n succesvol instrument kunnen zijn, ook in de deeltjesfysica. En dat terwijl in de jaren negentig neurale netwerken het niet beter deden in het classificeren van deeltjes en botsingsgebeurtenissen dan andere methoden.

‘Helaas zitten veel fysici nog in hun hoofd met die oude neurale netwerken en zijn ze niet op de hoogte van de ontwikkelingen van de afgelopen vijf jaar’, zegt Caron. ‘Ik denk dat er wereldwijd zo’n vijftig deeltjesfysici bezig zijn de potentie van diepe neurale netwerken te ontdekken. Dat is veel te weinig. Het maakt het ook moeilijk om een cultuurverandering teweeg te brengen. Onderzoeksvoorstellen en papers worden vaak beoordeeld door natuur- en sterrenkundigen zonder kennis in machine learning. Dan is de kans groot dat ze niet begrijpen wat het nieuwe aspect is.’

#### Helpen bij nieuwe fysica

Behalve het beter classificeren van deeltjes en botsingsgebeurtenissen, kan machine learning ook gebruikt worden om

ruit ruwe botsingsdata direct fysica af te leiden. Eigenlijk gaat de hele natuurkunde over het afleiden van nieuwe inzichten uit data. Machine learning kan daarbij enorm helpen. Caron: ‘Heel veel zaken die natuurkundigen nu op een conventionele manier doen, kunnen we waarschijnlijk beter doen met machine learning. Stel, een calorimeter in een deeltjesdetector meet de energieën van de deeltjes. De ruwe data bestaan dan uit een plaatje van op welke plek de calorimeter wat heeft gemeten. Dat plaatje kun je als ruwe data aan een diep neuraal netwerk geven en dat kan daar de relevante fysische parameters uit halen: welke deeltje is gemeten? welke energie heeft het? Wat is de hoek van z’n baan?’

Nog spannender is dat machine learning nieuwe fysica kan vinden zonder een model te hebben van die fysica. Caron: ‘Tot en met de ontdekking van het higgs-deeltje wisten deeltjesfysici meestal waarnaar ze zochten. Maar nu zijn we op een punt gekomen waarop we niet meer goed weten waarnaar we zoeken. We hebben misschien wel miljoenen mogelijke modellen voor donkere materie. Eigenlijk willen we alleen maar naar anomalieën zoeken, iets wat afwijkt van het Standaard Model.’

Juist daarvoor is machine learning geschikt. Caron trekt een vergelijking met het zoeken naar leven op andere planeten: ‘We kunnen een eerste neuraal netwerk trainen met alle levensvormen op aarde. Maar we kunnen ook een tweede netwerk trainen met alle *aliens* uit sciencefiction-boeken. Dat tweede netwerk levert misschien nieuwe biologie op. Zo is het ook met het zoeken naar donkere materie. In de deeltjesfysica gaat het om het

#### Zelflerende machines openen jacht op kosmische explosies

Net als natuurkundigen zijn astronomen ook druk bezig met kunstmatige intelligentie. De Nationale Wetenschapsagenda kende in juni 4,5 miljoen euro toe aan CORTEX, het Centrum voor Onderzoek in Real Time naar het Explosieve Universum. Het centrum is een samenwerkingsverband van dertien partners uit wetenschap, bedrijfsleven en maatschappij. Het samenwerkingsverband gaat zelflerende machines sneller maken voor onderzoek naar kosmische explosies en voor maatschappelijke toepassingen.

tweede netwerk. Dat is het netwerk dat door theoretici wordt getraind en mogelijk nieuwe fysica oplevert.’

Volgens Caron denken veel deeltjesfysici dat het echte werk zit in het bouwen van een detector en het doen van de experimenten en dat de data-analyse triviaal is. ‘Zo was het in de jaren ’80 en ’90 van de twintigste eeuw, maar dat geldt al lang niet meer. Omdat we niet meer goed weten waarnaar we moeten zoeken, zijn de modellen veel complexer geworden. Daarnaast is de hoeveelheid gemeten data veel groter. En wel zo groot dat geen enkele klassieke analysemethode het beter doet dan machine learning. We moeten een heel ander beeld ontwikkelen over hoe we natuurkunde bedrijven. Een beeld waarin machine learning een krachtig instrument is. ◀



#### Grote beurt

Is het een duikboot? Is het een blauwe sigaar? Is het een microfoon? Nee, het is een dipoolmagneet van vijftien meter lang die honderd meter naar beneden wordt getakeld bij CERN. De magneet is één van 1232 gekoelde en supergeleidende dipolen. Ze zorgen dat de protonen in de 27-kilometerlange, cirkelvormige LHC-deeltjesversneller niet uit de bocht vliegen. Een aantal magneten krijgt de komende maanden een grote beurt. Daardoor kan de versneller in 2021 met nog grotere energieën deeltjes op elkaar laten knallen.



De droom van...

# Rasa Muller wil meer vrouwen in de natuurkunde

Foto: Mats van Soolingen

Rasa Muller, PhD-student bij Nikhef, onderzoekt neutrino's. Dat zijn kosmische deeltjes die vrijwel ongehinderd door het heelal vliegen. Ze is een van de weinige vrouwen in het Nederlandse neutrino-onderzoek.

‘Kijk, ik ben geen hardcore feminist en ik houd van mannen om mij heen, maar het is ook fijn om met vrouwen samen te werken en te sparren.’

‘Een van de uitdagingen is om vrouwen in de natuurkunde te behouden. Als ik over vier jaar promoveer op mijn onderzoek naar neutrino's dan ben ik 29 en zou het, fysiek gezien een goed moment zijn voor kinderen. Maar voor mijn academische carrière zou ik minstens twee jaar naar het buitenland moeten voor postdoc-onderzoek en daarna ben je nog steeds niet zeker van een baan. Het is nu haast zo dat je óf kinderen krijgt óf een academische carrière nastreeft.’

‘Een reden voor de scheve verdeling is dat vrouwen over het algemeen wat onzekerder zijn dan mannen, en eerder denken dat ze ergens niet goed genoeg voor zijn. Een voorbeeld? Ik sprak een half jaar geleden bij De Wereld Draait Door over meer vrouwen in de exacte wetenschap. Mijn vader had natuurlijk gekeken. Hij suggereerde dat ik in de toekomst Robbert Dijkgraaf maar moest opvolgen in Princeton. Nou, antwoordde ik, daar ben ik niet goed genoeg voor. En toen benadrukte mijn vader dat die instelling precies is waar het fout gaat bij vrouwen.’

‘Een fijne bijkomstigheid van meer vrouwen in de natuurkunde zou zijn dat we de bijzaken wat beter kunnen verdelen. Nu zit ik in de redactie van het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde, in de ondernemingsraad van Nikhef, in een klankbordgroep voor de verbouwing en geef ik rondleidingen en lezingen. Ik vind dat een hele eer en ik ben ook enthousiast, maar die dingen gaan wel ten koste van mijn onderzoek.’

‘De mooiste reactie op mijn tv-optreden kwam overigens van een vrouw die meldde dat haar dochter al een week riep dat ze wetenschapper wil worden. Kijk, dan is het niet meer alleen mijn droom, maar ook die van anderen.’