

Voorjaar
2023

DIMENSIES

Nikhef

Nationaal
instituut voor
subatomaire fysica



NIJMEGEN

Nikhef-partner zoekt
inzichten van
Genève tot Argentinië

PROMOVEREN

PhD-kandidaten
als motor van
het onderzoek

De snelste poort van de datasnelweg is blauw

Sinds begin dit jaar draait in het datacentrum op de tweede verdieping van Nikhef in Amsterdam een opvallende nieuwkomer mee. Deze Nokia 7750-SRix-48D router lijkt een server als alle andere, maar is de snelste datapomp ter wereld. Een monster dat 800 gigabit per seconde door elk van de 48 glasvezelaansluitingen kan jagen.

Nikhef en de ICT-koepel voor onderwijs en onderzoek SURF experimenteren ermee, in voorbereiding op de snelste dataverbindingen in Europa. Eerste bestemming: CERN in Genève. Daar zullen binnen een paar jaar vijfmaal zoveel meetgegevens uit de experimenten bij de LHC-versneller vloeien als nu, bijvoorbeeld richting rekencentra in Amsterdam. In januari opende minister Adriaansens van Economische Zaken en

Klimaat tijdens een werkbezoek de snelste poort van de datasnelweg van Nederland.

Tristan Suerink is één van de betrokken ICT-architecten van Nikhef. Samen met collega's test hij in een speciale sectie van het datacentrum met de veelzeggende naam Speeltuon of de nieuwe router levert wat de leverancier belooft. Voorlopig nog zonder dat er echte onderzoeks- of commerciële data doorheen gaan.

In het serverrack vol knipperende ledjes en bossen gekleurde kabels is de snelste poort van de datasnelweg gemakkelijk te herkennen aan de donkerblauwe aansluitingen waar 800G op staat. Duizenden keren meer dan een internetaansluiting thuis.

Tot nog toe, zegt Suerink tevreden, lijkt het apparaat te doen wat ervan verwacht wordt. 'De datapomp doet het. Nu het datakanaal

nog. Momenteel bespreken we hoe we de hele route naar CERN geschikt maken voor zulk massief dataverkeer.'

De glasvezels daarvoor liggen er allang, meer dan 1600 kilometer dwars door Nederland, België en Frankrijk. Maar de optische versterkers onderweg, ongeveer om de honderd kilometer, moeten nog verder verbeterd worden. Het voorkomen van meer ruis is cruciaal voor goede dataverbindingen.

De Nikhef-databeheerders zien op de huidige 400 gigabit-verbinding op de drukste momenten pieken van 200 gigabit per seconde voorbijkomen. Als dat over vijf jaar vijfmaal zoveel wordt, is zelfs 800 gigabit alweer krap. 'Precies de reden dat Nikhef voorop wil staan bij alle nieuwe ontwikkelingen. Pionieren is niet alleen leuk, maar ook gewoon hard nodig', zegt Suerink.



Grenzen verleggen

Natuurkunde zoals Nikhef die bedrijft betekent permanent grenzen verleggen. Zoeken naar nieuwe deeltjes, verrassende interacties, onverwacht gedrag en gekke verbanden. We weten veel over de fundamenteën van het universum. Maar ook nog veel niet. En juist dat zoeken naar wat er voorbij de grenzen ligt, maakt wetenschap zo mooi en opwindend.

In dit nummer van het Nikhef-magazine DIMENSIES leest u een portret van de groep hoge-energiefysica bij de Radboud Universiteit in Nijmegen, vanaf het begin één van de partners binnen Nikhef. Het onderzoeksprogramma van de Nijmeegse natuurkundigen is heel breed, van onderzoek met versnellers tot de theorie van ruimtetijd en het waarnemen van kosmische straling. Het werk kent ook een duidelijke gemeenschappelijke vraag: wat ligt er voorbij wat we nu kunnen en nu weten? Grenzen verleggen is de constante in Nijmegen.

Grenzen verleggen is tegelijk ook hard werken. Aanwijzingen voor nieuwe natuurkunde vergen vaak het uiterste van techniek en wetenschap, en zijn daarmee vanzelf ook veel mensenwerk. Van oudsher verzetten promovendi veel van dat werk, ook bij Nikhef. In dit nummer van DIMENSIES portretteren we acht van de vele tientallen PhD-kandidaten, die dagelijks metingen en analyses doen, theorie ontwikkelen, meebouwen aan nieuwe instrumenten en experimenten. Hun inzet en nieuwsgierigheid vervult mij als Nikhef-directeur dagelijks met groot respect en plezier. Deze jonge mensen geven de deeltjesfysica veel van zijn geweldige energie. Alleen al daarom is het zaak om steeds weer nieuwe generaties studenten naar Nikhef te halen.

Een belangrijk grensverleggend moment is tot slot nog de benoeming van de eerste vrouwelijke programmaleider op Nikhef. Dorothea Samtleben leidt sinds dit voorjaar het neutrino-programma, dat meebouwt aan een baanbrekende neutrinotelescoop in de diepten van de Middellandse Zee. Grensverleggend in alle opzichten.

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 voorjaar 2023

REDACTIE

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

AAN DIT NUMMER WERKTEN MEE

Dick van Aalst (foto's), Joan Berger (foto's), Harry Heuts (foto's), Marco Kraan (foto's), Ivar Pel (foto's), Gieljan de Vries (tekst),

ONTWERP EN VORMGEVING

Enchilada (ontwerp), Naïm Niebuur studio (vormgeving)

OP DE COVER

Harry Nillesen en Nikhef-onderzoeker Charles Timmermans installeren testapparatuur op het dak van de Radboud Universiteit in Nijmegen.

Foto: Dick van Aalst / Radboud Universiteit

Hoge energie in Nijmegen

De Nijmeegse hoge-energiefysici stonden ooit aan de wieg van het Nationaal instituut voor subatomaire fysica Nikhef. Inmiddels reikt de fundamentele nieuwsgierigheid er van de kleinste deeltjes tot diep in de kosmos.

In de hal van het Huygensgebouw van de Radboud Universiteit in Nijmegen, domein van de exacte vakken, beweegt een slinger van Foucault onverstoord heen en weer. Met een groot bronzen gewicht van honderd kilo aan een kabel van 13 meter een onvermijdelijke *eyecatcher* voor bezoekers.

Mooi ding, vindt ook afdelingshoofd hoge-energiefysica (HEF) prof. Charles Timmermans elke dag als hij erlangs loopt. 'Een klassiek experiment om de draaiing van de aarde te demonstreren. Maar natuurlijk niet bepaald het soort fundamentele natuurkunde waar wij voor staan.'

Timmermans leidt de derde loot van de drie afdelingen binnen het IMAPP, het instituut voor wiskunde, sterrenkunde en deeltjesfysica in Nijmegen. De HEF-groep telt veertien stafleden en tientallen promovendi, postdocs en technici. 'Als we een uitstapje hebben, is het een flinke bus vol mensen', zegt Timmermans.

Zelf is hij sinds vorig jaar hoogleraar astrodeeltjesfysica, een van de handvol leerstoelgroepen binnen de IMAPP-afdeling. Daarnaast is hij programmaleider van de kosmische straling-groep bij Nikhef. Naast kosmische deeltjes zijn er bij HEF leerstoelen voor versnellerfysica (vooral het ATLAS-experiment), fenomenologie, sterke zwaartekracht en quantum-zwaartekracht en secties voor kunstmatige intelligentie en neutrino-onderzoek. Het gaat



Charles Timmermans

er over alles van quarks en higgsdeeltjes tot zwarte gaten, zowel via experimenten als in de theorie.

Een breed palet aan onderwerpen, geeft Timmermans toe. Maar er is ook een duidelijke verbindende factor: het bestuderen van de fundamentele bouwstenen van de natuur. Zowel op het gebied van de ruimtetijd zelf, als van de materie. Wat zijn die bouwstenen? En hoe beïnvloeden ze elkaar?

Vragen die vanuit allerlei perspectieven onderzocht worden. Met nadrukkelijk ook de focus op onderlinge kruisbestuiving, vertelt Timmermans. 'We hebben eens in de twee weken een colloquium voor de hele afdeling, waar we elkaar op de hoogte houden van ons specifieke werk. Niet tot in de details, maar diep genoeg om mensen uit andere specialismen op vragen te brengen die je zelf misschien niet meteen stelt.'

Aan de wieg

De afdeling hoge-energiefysica is van oudsher nauw verbonden met Nikhef, met veel oog voor nationale en inter-

nationale samenwerking. In 1975 stond de Nijmeegse universiteit samen met de Universiteit van Amsterdam, IKO en de stichting FOM aan de wieg van het Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-energiefysica.

De afkorting van die eerste naam werd later ook de eigenaam 'Nikhef' van het huidige Nationaal instituut voor subatomaire fysica, dat inmiddels een samenwerkingsverband tussen NWO en zes universitaire partners is en een hoofdggebouw met uitgebreide werkplaatsen op Amsterdam Science Park heeft.

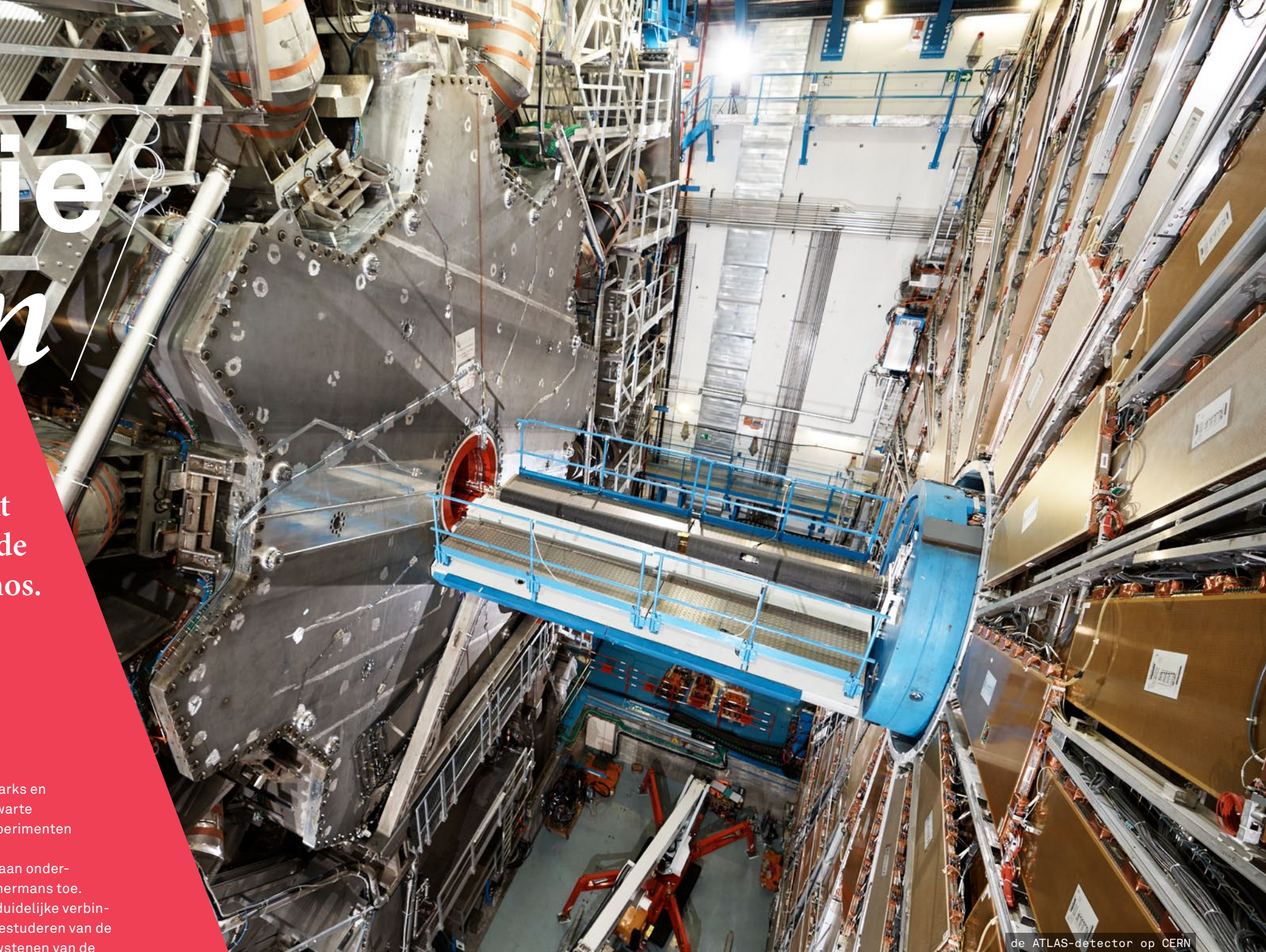
In eerste instantie was het zwaartepunt in Nijmegen de experimentele hoge-energiefysica, de natuurkunde van het versnellen en botsen van deeltjes om te zien hoe de natuur op kleine schaal werkt.

De groep speelde een wezenlijke rol in de ontdekking van het higgsdeeltje in 2012, met de bouw en vooral data-analyses van het ATLAS-experiment op CERN in Genève. De grote ATLAS-groep bij Nikhef heeft een tweekoppige leiding, met Frank Filthaut in Nijmegen en Wouter Verkerke in Amsterdam. Praktisch bij het dagelijkse werk, en tegelijk ook een manier om elkaar onderling scherp te houden.

Kunstmatige intelligentie

Bij de data-analyses heeft Nijmegen inmiddels ook nog een heel belangrijk ijs in het vuur via het werk van Nikhef-onderzoeker Sascha Caron. Al jaren voordat het in de mode kwam, werkte hij aan de vraag hoe kunstmatige intelligentie kan worden ingezet bij het vinden van

nieuwe fysica in de metingen van detectoren als ATLAS. Bij normale analyses proberen onderzoekers te testen of ze in de metingen aanwijzingen zien voor een specifiek proces dat ze zoeken. Caron draait dat met allerlei technieken graag om, en zoekt naar patronen die afwijken van wat er meestal gebeurt. Zo'n naald in de hooiberg kan een aanwijzing zijn voor onbekende nieuwe processen en misschien zelfs nieuwe natuurkunde. Maar ook in een wereld vol chatbots en scriptieschrijvende computers is serieuze deeltjesanalyse met kunstmatige intelligentie nog steeds veel pionierswerk en bijna meer computerwetenschap dan echte hoge-energiefysica. 'Tegelijk erg nuttig, als je naar details in steeds meer data zoekt', zegt Timmermans.



de ATLAS-detector op CERN

Kosmos

Binnen het IMAPP zit de afdeling hoge-energiefysica letterlijk een paar deuren van de sterrenkundigen van het instituut. Het is daarom niet heel verwonderlijk dat de deeltjesfysici in Nijmegen wat meer doordrongen lijken van de kosmos, dan die in veel andere plaatsen. Er bestaat al langer een Nijmeegse traditie in gezamenlijke onderzoeksvoorstellen van fysici en astronomen.

Rond de eeuwwisseling smeedde de fysicagroep van Nijmegen een plan om kosmische straling te gaan bestuderen. Met aanzienlijke belangstelling vanuit de sterrenkunde. Het universum slingert voortdurend allerhande deeltjes met veel energie naar de aarde en haar atmosfeer. Vraag is wat er precies binnenkomt, wat de bronnen zijn, hoe kosmische deeltjes soms aan energieën komen waar versnellerbouwers op aarde niet eens van durven dromen. En hoe de natuurkunde bij zulke hoge energie er eigenlijk uitziet.

De intensieve belangstelling voor kosmische straling mondde in 2005 uit in deelname van Nikhef aan het internationale Pierre Auger-project in Argentinië. In een reusachtig meetveld van duizenden

vierkante kilometers aan de voet van de Andes staan her en der witte watertanks met lichtsensoren, ultraviolet-telescopen en radioantennes. Het instrument in de Pampa Amarilla is zo groot om zeldzame hoogenergetische inslagen van kosmische deeltjes hoog in de aardatmosfeer op te vangen. Nijmegen helpt mee met de analyses van die signalen en bouwde mee aan nieuwe hardware, zoals extra antennes.

De kale winderige pampa, afwisselend snoeiheet en ijskoud, vereist wel extra robuuste ontwerpen voor hardware. De grote afstanden en primitieve verbindingen vormen een uitdaging bij bouw en onderhoud. De Nijmeegse groep heeft een handvol technici die wat dat betreft het klappen van de zweep inmiddels goed kennen, vertelt Timmermans. Het dak van het Huygensgebouw staat vol met probeersels en testopstellingen. Naast de telescopen van de sterrenkundigen van IMAPP.

Bergketens

Als astrodeeltjesfysicus kijkt Timmermans zelf inmiddels alweer verder dan het Auger-project. Hij studeert op de mogelijk-

heid van een heel nieuw type meet-instrument voor kosmische straling: GRAND. Dat behelst een reusachtig veld van relatief simpele en goedkope antennes in de buurt van een grote bergketen, die als afstopper dienst doet. Het idee is dat hoogenergetische neutrino's in de massieve gesteenten van de bergketen inslaan en daarbij een tau-lepton de atmosfeer inschieten. Die veroorzaakt dan weer een deeltjeslawine die de antennes verderop oppikken. Op papier kan GRAND een stap hoger op de energieschalen naar de kosmos kijken dan andere instrumenten nu doen. Ingewikkeld aan het plan is wel dat het erg veel ruimte vergt, die niet overal zomaar beschikbaar is.

Het westen van China is een tijdlang als locatie in beeld geweest, en daar is zelfs geëxperimenteerd met de eerste simpele grondantennes. Foto's in de krant suggererden zelfs even dat het instrument er al bijna stond.

Maar vol inzetten op alleen China lijkt om geopolitieke redenen toch niet zo'n heel goed plan. Inmiddels werken Timmermans en zijn team aan een tweede pilotproject op dezelfde pampa waar Auger staat. De omgeving lijkt redelijk

geschikt, en een van de hoogste bergketens ter wereld en een ideale afstopper, de Andes, is nog geen 70 kilometer verderop. En zeker zo belangrijk: politiek gezien geeft Argentinië niet zo'n ongemakkelijk gevoel.

Oerneutrino's

In Nijmegen gebeurt meer dan versneller-onderzoek en onderzoek naar kosmische straling. Grafeen, het vliesdunne grafiet met speciale eigenschappen, had al een Nijmeegs tintje sinds de Nobelprijs voor oud-Radboudonderzoekers Geim en Novoselov in 2010. Inmiddels speelt grafeen in Nijmegen een wezenlijke rol in een gewaagd onderzoeksproject dat vanuit Amsterdam en Nijmegen wordt gedragen: PTOLEMY. Dat project, nog in de kinderschoenen, draait om het meten van neutrino's die ontstaan kunnen zijn vlak na de oerknal, het begin van het heelal zelf, zo'n veertien miljard jaar geleden.

In theorie levert dat een heel flauw signaal op in de kosmische straling, dat alleen met heel gevoelige apparatuur in extreme koude en rust kan worden opgepikt. Daarbij lijkt het wondermateriaal grafeen een hoofdrol te gaan spelen,



Een Auger-meetstation in Argentinië



Béatrice Bonga,
universitair docent
zwaartekrachtstheorie

'Ik doe als theoreticus onderzoek naar zwaartekracht, van zwarte gaten tot zwaartekrachtsgolven. Het doel is Einsteins relativiteitstheorie nog beter te begrijpen en tegelijk uit te vinden hoe je die met meetinstrumenten als de Einstein Telescope kunt testen. Wat zie je als drie zwarte gaten om elkaar draaien? Wat als de materieschijf een afwijkende vorm heeft? Ik studeerde theoretische natuurkunde in Utrecht,

was promovendus op Penn State in de Verenigde Staten en postdoc in de quantumgravitatie bij Perimeter in Canada. Maar ik wilde om allerlei redenen landen in Nederland, dat in veel opzichten een heel fijn land is. Nijmegen wilde meer gaan inzetten op klassieke zwaartekracht en bood me de kans. Na de ontdekking in 2015 van zwaartekrachtsgolven is mijn vakgebied ontploft, er is veel interesse voor. Het mooie aan Nijmegen is dat je dichtbij de wiskundigen en sterrenkundigen zit. Ik ben daardoor meteen heel goed ingebed. Mijn relatie met Nikhef is nog aan het groeien, ook omdat ik precies in Nijmegen aankwam toen in 2020 corona begon. Mijn eerste artikel met affiliatie Radboud University / Nikhef komt eraan.'



Harm Schoorlemmer,
universitair docent
astrodeeltjesfysica

'Ik bestudeer kosmische straling met extreem hoge energie. Dat onderwerp intrigeert me al sinds ik tweedejaars student in Nijmegen was. In het heelal vliegen subatomaire deeltjes rond met werkelijk onvoorstelbaar veel energie. Hoe ze aan die energie

komen en waar dat precies gebeurt, is nog steeds een raadsel. Ik werk aan Auger en het toekomstige GRAND-project, in de hoop dat we de bronnen kunnen aanwijzen van dat soort deeltjes. Voor mijn werk is het buitengewoon prettig om zo dicht bij de sterrenkundigen te zitten, letterlijk aan de overkant van de gang. Nijmegen bevalt me sowieso, een levendige stad maar niet te groot. Er zijn hier mooie eigen tradities en er hangt een prettige progressieve *vibe*. Net als in de groep trouwens, we hebben hier een enorme koffietafel waar iedereen, van studenten tot hoogleraren, samen luncht, koffiedrinkt, taart eet en kletst. Nikhef is voor mij het huis van de Nederlandse astrodeeltjesfysica. Ik voel me er helemaal thuis.'



Mengqing Wu,
universitair docent ATLAS

'Mijn onderzoek draait om de natuurkunde voorbij het Standaardmodel. Ik ben betrokken bij het ATLAS-experiment. Ik werk vooral aan 4D-tracking en innovatieve read-outs voor de detector. Maar ik doe ook analyses, in het bijzonder aan neutrino's in de metingen bij ATLAS. We weten dat neutrino's

een beetje massa hebben, maar het Standaardmodel vertelt nergens waarom. Dus vormen ze een mooi onderwerp om ideeën voor nieuwe fysica te testen. Zijn neutrino's bijvoorbeeld majorana-deeltjes, zodat ze hun eigen antideeltje zijn? Sommige theorie zegt dat. Maar wat zegt de natuur? Nijmegen is een prima werkplek omdat het een goede werksfeer heeft, goede mensen en veel onderlinge steun. Nijmegen is open, ondersteunend en positief. Dat is erg prettig. Ik kom geregeld op Nikhef in Amsterdam overigens, silicon alley en de TDAQ-speeltuinen zijn mijn favoriete plekken daar. In Nijmegen geniet ik erg van het rustige, groene uitzicht van mijn kantoor. Perfect voor zenmomenten of als je even echt moet nadenken.'



Nicolo de Groot,
hoogleraar experimentele
deeltjesfysica

'Ik ben eigenlijk mijn hele loopbaan bezig met het higgsboson. Ik schreef er ooit mijn afstudeerscriptie over en in 2012 waren we ook in Nijmegen nauw betrokken bij de ontdekking ervan met ATLAS op CERN. Momenteel is mijn belangrijkste onderzoeksvraag wat higgsdeeltjes van zichzelf merken, de zogeheten

zelfinteractie. Een belangrijke vraag in de theorie. Nieuwer is mijn werk aan PTOLEMY, met Amsterdamse collega's als Auke Pieter Colijn. Ik vind het een geweldig opwindend idee dat we neutrino's zouden kunnen zien van vlak na de oerknal, een seconde erna ongeveer. Onbekend terrein. Zo'n gouden kans wil je niet missen. De locatie Nijmegen is voor mij min of meer toeval, ik had net zo goed in Amsterdam kunnen werken. Ik werk met collega's op basis van interesses, niet zozeer van onze werkplek. Ik kom graag op Nikhef. Ik moet wel zeggen dat het in Nijmegen misschien net wat rustiger is, met minder afleiding en minder stress. Je krijgt hier meer gedaan op een dag, is mijn ervaring.'



omdat het passerende deeltjes kan oppikken die in alle andere sensoren meteen in het sensormateriaal zelf verloren zouden gaan. In Amsterdam is Nikhef-onderzoeker Auke Pieter Colijn de drijvende kracht in het project, met in Nijmegen deeltjesfysicus Nicolo de Groot als directe partner. In Nijmegen is bijvoorbeeld ook het HFML-magneetlab bij het PTOLEMY-project betrokken, het lab waar ooit Geim gewerkt heeft.

En er is meer neutrino-interesse. Nijmegen heeft ook een klein aandeel in een project op dat gebied op CERN, dat ProtoDUNE heet. Dat is een voorloper van een project in Amerika dat gewoon DUNE heet en een enorme detector voor neutrino's wordt. Het onderzoek is vooral gericht op de identiteitswisselingen die de drie bekende soorten neutrino's van nature lijken te ondergaan. Wereldwijd staan zulke neutrino-oscillaties in de belangstelling omdat ze nieuwe theorie vergen, die misschien een uitbreiding is van de deeltjestheorie die overduidelijk nog tekortkomingen heeft. 'Neutrino's zijn momenteel een *hot topic*', zegt Timmermans zonder omhaal. 'Daar wil je bij zijn.'

Theorie

Nijmegen kent ook een aanzienlijke groep theoretici in de hoge-energieafdeling. Sommigen zijn druk met wat fenomenologie heet: het bedenken van meetbare effecten van deeltjestheorie of omgekeerd het verbinden van metingen met theorie. Deeltjesonderzoek is een voortdurend spel tussen theorie en experiment, en dus is fenomenologie een essentiële brug binnen het vak. Theoretici in zowel Nijmegen als de theoriegroepen in Amsterdam en bij de andere Nikhef-partners verzetten veel werk op dit gebied. Die werken als vanzelf samen met de experimentele groepen binnen Nikhef.

Maar er zijn ook gebieden waar experimenten minder dik gezaaid zijn. Quantumzwaartekracht is daarvan een belangrijk voorbeeld. In de speurtochten van Nijmegen naar bouwstenen gaat het nadrukkelijk niet alleen over de bouwstenen van de materie. De natuurkundigen doen ook onderzoek naar ruimte en tijd zelf. Een centraal vraagstuk daarbij is hoe zwaartekracht en de deeltjeskrachten met elkaar samenhangen. Ruimte en tijd worden beschreven met Einsteins relativiteits-theorie, deeltjes met quantummechanica.



Deze twee sluiten ondanks alle inspanningen nog steeds niet goed op elkaar aan. Nijmeegse theoretici rond hoogleraar Renate Loll zoeken met wiskundige technieken naar een nette quantumtheorie van ruimte en tijd.

Dat levert fascinerende theoretische

bouwwerken op van tegeltjes ruimtetijd die bij elkaar klitten als kristallen. Zulke abstracties staan wel erg ver af van denkbare experimenten bij Nikhef. Daarom is dit theoretische onderzoek geen direct onderdeel van de Nikhef-inspanningen.

Zwaartekrachtsgolven

Toch heeft zwaartekracht in de theoriegroep in Nijmegen wel degelijk belangstelling, zegt Timmermans, en zijn er zeker ook relaties met Nikhef. Einsteins relativiteitstheorie voorspelde in 1915 al dat ruimte en tijd kunnen trillen als daarin

snelle veranderingen optreden. Zulke zwaartekrachtsgolven leken een eeuw lang onmeetbaar te blijven. Maar in 2015 veranderde dat, en zagen detectoren in de VS en Europa de eerste zwaartekrachtsgolven ooit, afkomstig van botsende zwarte gaten in het heelal. Ook Nikhef was bij die metingen nauw betrokken, via de Virgo-detector in Pisa en analyses samen met de Amerikanen.

Omgekeerd zijn de metingen een prachtige test voor Einsteins zwaartekrachtstheorie en de theorie van zwarte gaten. In Nijmegen is een groepje theoretici nauw betrokken bij het Nikhef-onderzoek in onder meer Utrecht en Maastricht op het terrein van extreme zwaartekracht.

Voor afdelingsleider Timmermans alweer een voorbeeld van de meerwaarde van het nationale samenwerkingsverband Nikhef. 'In veel experimenten en ook de theorie is het gewoon goed om elkaar geregeld tegen te komen en waar mogelijk samen op te trekken en het werk te verdelen. Daar hebben we nu en dan best een uur en drie kwartier in de trein voor over, al lijkt het kennelijk vanuit de Randstad meer. En op Zoom kan bijna alles.'



Sascha Caron, universitair hoofddocent hoge-energiefysica

'Het ingewikkelde aan het zoeken naar nieuwe natuurkunde is dat je vaak niet precies weet waar je naar zoekt. Kunstmatige intelligentie is *booming* en kan enorm helpen om interessante patronen te vinden. Wij onderzoeken hoe, in mijn geval vanuit ATLAS. Daarbij is de universiteit een per-

fecte omgeving. Hier werk ik als natuurkundige heel natuurlijk samen met mensen uit de *machine learning*, filosofen, wiskundigen. Op een gespecialiseerd instituut als Nikhef is dat minder vanzelfsprekend, denk ik. Tegelijk vind ik Nikhef al sinds ik er ooit postdoc was, de coolste plek die je maar kunt hebben. Niet in de laatste plaats om de, laat ik zeggen: bijzondere figuren die er rondlopen. Net als trouwens in Nijmegen. Ik houd daar wel van, briljante mensen die het niet voor het geld doen, maar voor de lol. Dat ik in Nijmegen zit, sinds 2011, heeft overigens ook een praktische reden. Mijn vrouw is Duits belastingadviseur. We wonen pal over de grens, in een heerlijk landschap. Net de Eiffel hier. Erg fijn.'



Susanne Westhoff, universitair docent theorie

'Ik solliciteerde als junior professor vanuit Heidelberg breed, zoveel banen zijn er niet op ons vakgebied. Maar ik ben heel blij met Nijmegen. Eigenlijk begreep ik achteraf pas waarom men voor mij heeft gekozen, en omgekeerd waarom Nijmegen zo goed bij me

past. De *Nijmegen spirit* is voor mij dat collega's heel nauw samenwerken. Geen gevoel van competitie, we proberen samen nieuwe dingen te vinden. De samenwerking, ook van oudere collega's met de jonge, wordt echt gezien als een sterkte van het instituut. Dat zijn belangrijke dingen die je niet zo makkelijk vooraf afleidt uit webpagina's. Ik werk aan uitbreidingen van het Standaardmodel van de deeltjes en wisselwerkingen, met name op gebied van donkere materie. Ik werk als fenomenoloog, ik probeer te voorspellen wat een experiment van een bepaalde hypothese zou kunnen zien. Dan moet je met verschillende disciplines samenwerken. Daarvoor heb je een groot netwerk nodig. En dat heb je hier via Nikhef.'



Sijbrand de Jong, decaan faculteit Natuurwetenschappen, Wiskunde en Informatica

'Ik kwam in 1998 naar Nijmegen vanuit CERN, waar ik voor een Amerikaanse universiteit aan het OPAL-experiment had gewerkt. Ik hoefde niet zo nodig meer naar de Randstad. Hier heb je cultuur in het stadje en een prachtig heuvelig buitengebied. Ruimte. Maar

ik zocht vooral ruimte om een stempel te drukken die ik misschien in Amsterdam niet zo snel had gekregen. De nadruk lag toen in Nijmegen erg op DØ en later ATLAS, een gevaarlijk smalle basis. Een experiment kan zomaar tegenzitten. Of saai worden. Vandaar dat we ook astrodeeltjes hebben opgepakt, met Auger in Argentinië als groot experiment waarvoor we nog steeds heel veel werk doen. Ik ben als decaan nu geen lid van de groep, al begeleid ik nog wel promovendi. Wat de *Nijmegen spirit* is? In het Huygensgebouw zit je elke dag midden tussen dui-zenden studenten. Ik heb dat altijd heel prettig gevonden. Net wat minder monomaan dan alleen maar onderzoekers om je heen.'



Wim Beenakker, hoogleraar theoretische hoge-energiefysica

'Het prettige aan Nijmegen is dat er heel weinig hiërarchie bestaat. De sfeer is amicaal en laagdrempelig, gemoedelijk. Een zuidelijke universiteit zou ik het noemen en dat past bij mij als persoon. Ik kwam na tien jaar omzwervingen van Leiden naar CERN naar Hamburg en Durham in 1998 naar Nijmegen. De groep was net een nieuwe weg ingeslagen richting

hoge-energiefysica. Ik heb als theoreticus altijd graag dicht bij de experimenten gewerkt. Zo precies mogelijk voorspellen wat ze zullen meten, om het Standaardmodel te testen. En om randvoorwaarden aan theorie voorbij het Standaardmodel te stellen. Tegenwoordig richt ik me meer op uitdagingen als donkere materie en donkere energie. Daar zou ik graag - ik ben nu 61 - nog iets in betekenen. Ik had een tijdlang ook een bureautje bij de theoriegroep in Amsterdam. Dat is om allerlei redenen niet meer zo. Bestuurlijke onderwistaken in Nijmegen, corona. In mijn gevoel is Nikhef een steeds belangrijker kracht in het landschap van de Nederlandse deeltjesfysica. Een geweldig platform voor samenwerking.'



Neutrino's: de baas

Astrodeeltjesfysicus *Dorothea Samtleben* is sinds april programmaleider voor de neutrinofysica bij Nikhef. En als eerste vrouw in zo'n functie vanzelfsprekend een rolmodel, vindt ze.

Of ze blij is met haar benoeming tot programmaleider van het neutrino-programma van Nikhef? Zeker, zegt Dorothea Samtleben. 'Het is een eer. Een geweldige kans voor mezelf om een talentvolle neutrinogroep leiding te mogen geven. Maar niet alleen voor mezelf. Ik vind deze stap vooral ook heel verheugend voor het instituut. Ik ben de eerste vrouwelijke programmaleider op Nikhef. Het is goed dat er met alle voornemens om te komen tot meer diversiteit nu eindelijk ook iets in de praktijk

gebeurt. Het laat zien dat Nikhef verandert. Zo ontstaat er ook een ander beeld. Niemand kan meer denken dat natuurkunde nu eenmaal een mannending is.'

Samtleben kan er over meepraten. Op de middelbare school in Hamburg had ze een vreselijk traditionele leraar natuurkunde, een man die meisjes niet zag staan. 'Dan ga je vanzelf denken dat het kennelijk niets voor jou is die natuurkunde. Ik kreeg alleen goede cijfers omdat hij mijn briljante oudere broer respecteerde.' Ze ging in Hamburg studeren aan de universiteit.

Natuurkunde omdat dat haar nog leuker leek dan de geofysica die ze in eerste instantie gekozen had.

Pas op de universiteit begreep ze dat natuurkunde haar ook gemakkelijk afging. Dat ze gewoon kon wat anderen konden. Ze belandde als promovendus op deeltjeslab DESY, met toen nog een eigen versneller onder de plaatselijke paardenrenbaan van de stad. Een plek waar ook Nikhef aan grote experimenten meedeelde.

Samtleben promoveerde op deeltjesonderzoek en bleek inmiddels echt

gegrepen door de wetenschap. Niet langer in de versnellerfysica, maar meer met de blik omhoog, naar de kosmos. Als postdoc in Chicago ging ze werken aan een telescoop voor het bestuderen van de kosmische achtergrondstraling, de nagalm van de oerknal.

Later bracht ze de nieuwe technieken om de polarisatie van die straling te meten terug naar Europa. Eerst werkte ze in Bonn, maar als het haar daar wat te astronomisch blijkt, sluit ze zich aan bij het astrodeeltjesonderzoek op Nikhef en krijgt een aanstelling in Leiden. Als de antennes die ze ontwikkelde voor een grote nieuwe polarisatietelescoop toch niet levensvatbaar blijken, wordt het neutrino-onderzoek haar hoofdonderwerp. Nikhef zit diep in KM3NeT en werkt ook aan het DUNE-project.

Wat is er zo mooi aan neutrino's?

'Neutrino's zijn de minst begrepen deeltjes van het Standaardmodel. Ze zijn bijna massaloos en hebben nauwelijks interacties met al het andere en ze kunnen voortdurend wisselen van identiteit. Ik vind het een geweldig idee om iets te bestuderen dat je nauwelijks kunt zien.'

Leuker nog dan versnellers?

'Ik wil het niet vergelijken. Maar ik houd ervan om een zo goed mogelijk meetinstrument te bouwen dat je vervolgens op het universum richt. Het idee van verkennen, dat vind ik heel prettig. Dat je in de *control room* zit en *events* ziet langskomen, waarvan de vraag is wat je precies ziet. Of dat je na een *alert* van een ander experiment of een andere telescoop, in je data graaft om na te gaan of je ook wat ziet.'

Dan is een neutrino-telescoop als KM3NeT ideaal.

'Het is om allerlei redenen echt een project dat mij ligt. Nikhef speelt een heel centrale rol in het project. De technologie is hier ontworpen, we zitten heel diep in de analyses van de data, en we hebben in Amsterdam een echte werkplaats om de hoek waar veel hardware wordt gebouwd. En tenslotte vind ik het ook een geweldig idee dat je als onderzoeker directe interactie hebt met de detector ver weg in de diepzee. Het is bijna alsof je een experiment in de ruimte hebt.'

Mooi om daaraan nu bij Nikhef leiding te geven.

'KM3NeT is een grote internationale samenwerking, een wetenschappelijk project waar heel veel bij komt kijken. Ik ken het project en de mensen goed, ik heb allerlei rollen in de samenwerking gehad. Maar het wordt wel anders. Als programmaleider ben je met onderwerpen bezig, die je als onderzoeker nog een beetje ontgaan. Je hebt een coördinerende rol. Je moet overzicht houden, de voortgang controleren. Tot nog toe deed Paul de Jong dat. Nu zal ik dat doen. Overigens blijft Paul als adjunct-programmalaider wel in de buurt, wat goed is voor de continuïteit.'

Gaat het eigenlijk goed met KM3NeT?

'Het is een heel groot project, dat is zeker. We bouwen en we plaatsen, maar het is allemaal nog lang niet klaar. Tegelijk nemen we al data met alles wat er wel staat, tientallen lijnen inmiddels met honderden bollen, en dat geeft heel mooie resultaten met een stevige Nikhef-stempel. We hebben met de data die in een jaar verzameld zijn van maar zes lijnen

al duidelijke aanwijzingen voor neutrino-oscillaties.'

Dat belooft wat voor de hele detector.

'Wat je uiteindelijk wilt is een soort telescoop, waarmee je bronnen van neutrino's kunt aanwijzen en bekijken. En tegelijk inzicht krijgen in de eigenschappen van de neutrino-sector. Wat we daar leren kan ons helpen om het Standaardmodel uit te breiden. We weten dat het model eigenlijk te beperkt is. Maar niet precies hoe het beter moet.'

Kom je nog wel toe aan echt onderzoek, als programmaleider?

'Minder, dat is duidelijk. Ik heb al wat dingen van mijn eigen lijstje geschrapt. Overigens wel in de hoop dat anderen die kunnen overnemen.'

In je nieuwe functie ben je haast vanzelf ook een rolmodel.

'Zeker. Daar ben ik me wel van bewust. Maar het is niet zo dat ik me heel anders zal gaan gedragen. Ik merk al jaren dat het voor vrouwen aantrekkelijk kan zijn om met vrouwelijke staf te werken. Die rol vervul ik al een tijd, en met veel plezier.'

De eerste vrouwelijke programmaleider bij Nikhef. Een belangrijke stap?

'Het moet vooral niet de laatste stap zijn. Het is een begin. Daarbij zou het trouwens goed zijn als er ook eens een Nederlandse vrouw programmaleider wordt. Ik ben Duits, en dus geen product van het Nederlandse academische systeem. Dat zie je nog veel: de vrouwen die er her en der wel zitten, zijn nog heel vaak buitenlands. Maar iemand uit eigen kring is voor de herkenbaarheid en voorbeeldfunctie ook heel waardevol. Dan kun je met recht tegen meiden met ambities zeggen: kijk, in dit land kun je als vrouw alles worden, ook in de wetenschap.'

Nee, het is geen schaalmodel van ETpathfinder, maar het echte ding. Om dat te benadrukken heeft fotograaf Harry Heuts projectleider Stefan Hild in zijn blauwe stofoverall ook op de foto gezet. In de enorme helverlichte cleanroom van de Universiteit Maastricht beginnen de ware afmetingen van het megaproject inmiddels duidelijk te worden.

De zes metershoge stalen torens van de installatie staan op hun definitieve plaats in het L-vormige vloerplan. Vier torens voor spiegels, op beide benen van de L. En bij het hoekpunt twee torens voor optische systemen, de *beamsplitter* en de lasertoren. De torens hebben de vacuümtests intussen goed doorstaan.

ETpathfinder is een testfaciliteit voor technieken die zullen worden gebruikt in toekomstige detectoren voor zwaarte-krachtsgolven, zoals de Einstein Telescope. Hier in Maastricht gaan nieuwe lasers getest worden. Nieuwe spiegels

en optische systemen. Koelingen. Vacuüm. Nieuwe trillingsvrije ophangingen, een volledig Nikhef-ontwerp.

Hier en daar zijn delen van de opstelling zelfs al verbonden door meterslange vacuümbuizen waarin in de toekomst laserstralen heen en weer gaan flitsen. Niet alle verbindingen zijn al gemaakt, want er moet voorlopig nog ruimte blijven om met heftrucks en kranen te kunnen manoeuvreren met verdere onderdelen en componenten.

Inmiddels werken er meer dan honderd technici en wetenschappers aan het ETpathfinder-project, afkomstig van de nu 25 partners in binnen- en buitenland waar nog aan componenten wordt gebouwd. De laatste

maanden is er met name hard gewerkt aan de koelsystemen van de installaties met vloeibare stikstof. Het testen daarvan zal nog eens enkele maanden in beslag nemen.

Verwar de opbouw van ETpathfinder overigens niet met het installeren van een laboratorium, dat pas na de oplevering aan het werk kan. De bouw van ETpathfinder zelf is tegelijk ook technisch en wetenschappelijk onderzoek. Naar de instrumenten met de minste ruis, de

innovatiefste technische installaties en materialen. In dat opzicht is ETpathfinder allang in bedrijf, en brengt het project de komende decennia elke dag weer nieuwe inzichten.



*ETpathfinder op
ware grootte*

De onbezongen helden van de wetenschap

Bijna de helft van de wetenschappers bij Nikhef heeft nog geen doctorstitel. Toch leveren deze promovendi het leeuwendeel van het onderzoekswerk. Hoe is dat, promoveren bij Nikhef?

Het is een bont gezelschap uit 31 landen en bijna de helft is vrouw: de 127 promovendi die momenteel onderzoek doen bij Nikhef. Dat is bijna de helft van alle onderzoekers van het instituut. Maar wat heeft het instituut er eigenlijk aan?

Als iemand dat weet, is het Auke Pieter Colijn (UvA en Nikhef), hoogleraar in Nikhef's onderzoeksgroep naar donkere materie. Zelf promoveerde hij in 1999 bij Nikhef en de UvA.

'De promovendi zijn de drijvende kracht achter ons onderzoek. Aan de diepgang van de proefschriften zie je dat ze echt overzicht hebben van wat er speelt in hun vakgebied. Ze zijn niet voor niets volwaardige medewerkers, ook al leren ze nog veel.'

Promovendi leren bijvoorbeeld om zelfstandig onderzoek te doen, maar ook presenteren en onderwijs geven. Colijn: 'Daarnaast moeten promovendi mondig worden, niet zomaar afgaan op iemands autoriteit. Onderbouw maar waarom jouw idee beter is dan het mijne, dan komen we verder.'

Sinds Colijns tijd als promovendus is Nikhef veranderd, maar

niet compleet. 'Nikhef is bijvoorbeeld nooit strikt hiërarchisch geweest', verteld Colijn. Ook de verplichte zomerschool OSAF is er al tientallen jaren. 'Daar krijg je natuurkunde van buiten je eigen specialisatie te zien en bouw je aan je netwerk. Ik spreek mijn medestudenten van toen nog steeds.'

Anders dan vroeger – beter, volgens Colijn – is de begeleiding van promovendi, bijvoorbeeld in de vorm van voortgangsgeprekken met een begeleider van buiten de eigen groep. 'Of pak het aannamebeleid! Ik kreeg mijn eigen promotieplaats na een kletspraatje met een professor. Tegenwoordig is de selectie opener, eerlijker.'

Promovendi bouwen bij Nikhef in vier jaar aan een proefschrift die iets toevoegt aan de natuurkunde. Dat gaat onder begeleiding van vaste stafleden. Een voorrecht, denkt Colijn: 'Uiteindelijk is die promovendus afhankelijk van mijn oordeel over de kwaliteit van het proefschrift. Ik ben altijd vereerd als iemand me het vertrouwen geeft om samen vier jaar op pad te gaan.'



'Ik krijg energie van met mensen werken'

Naam? Jaco ter Hoeve
Nationaliteit? Nederlands
Functie? Derdejaars PhD-kandidaat in de theorie-groep
Locatie? Nikhef, Amsterdam
Waarom promoveren? Omdat je de kans krijgt om ergens vier jaar in te duiken en jezelf te ontwikkelen, met meer vrijheid dan in het bedrijfsleven.
Wat onderzoek je? Een algemenere versie van het Standaardmodel van de deeltjesfysica. We weten dat dat zijn beperkingen heeft, dus werk ik aan de *Standard Model Effective Field Theory*. Dat is een algemenere versie van de theorie die hopelijk meer zeggingskracht heeft.
Lastig? Laat ik zeggen dat ik geduld heb moeten leren. Soms moet je ergens een tijd op kauwen, of duik je ergens in

waarvan later blijkt: doodlopend steegje. Daar moet je tegen kunnen.
Hoe kom je daar uit? Praten met collega's. Hoe pakken zij dingen aan, hebben ze weleens iets vergelijkbaars gezien? Dat is vrij algemeen advies, je wordt niet aan het handje genomen. Uiteindelijk moet je je eigen oplossingen leren controleren. Eigenlijk ben je je eigen antwoordenboekje.
Waar krijg je energie van? Van met mensen werken - koffiepauzes, conferenties, studenten begeleiden of werkcolleges geven. Dat vind ik ook zo mooi aan de Nikhef-jamboree, als het hele instituut een paar dagen samenkomt om te laten zien wat er allemaal gebeurt.



'De wereld werkt anders dan onze intuïtie'

Naam? Zhuoran Feng
Nationaliteit? Chinees
Functie? Tweedejaars PhD-kandidaat in de ATLAS-groep
Locatie? CERN, Genève
Waarom natuurkunde? Vroeger was ik een ontzettende fan van Sci-Fi boeken. Al die verwijzingen naar quantummechanica, dat de wereld anders werkt dan onze intuïtie zegt, daar wilde ik meer over weten.
Wat onderzoek je? Bij CERN kijk ik naar hoe het higgsdeeltje uiteen valt in een charm-quark en zijn antideeltje, elementaire deeltjes kleiner dan atoomkernen. Daarmee kunnen we de voorspellingen van het Standaardmodel testen op andere quarks dan die je vindt in normale materie om ons heen.
Belangrijk? Het is vooral interessant. We weten dat ons heelal begon met de oerknal, maar hoe ontstond alle materie daarna?

Daar gaat dit soort onderzoek over.
Wat leer je zoal? Al doende heel veel. Programmeren bijvoorbeeld, of de details van de deeltjesdetector, maar ook hoe je samenwerkt. Het is een continu groeiproces, waarbij je soms verbaasd staat over hoe ver je gekomen bent.
Hoe is CERN? Het is fantastisch om samen te werken met zoveel experts van over de hele wereld. Al vond ik de sfeer op Nikhef tijdens mijn masteronderzoek ook geweldig. Iedereen maakt graag tijd voor je, ook de hoogleraren.
Advies aan nieuwe promovendi? Zoekmachines zijn je vrienden. Praktische vragen over bijvoorbeeld programmeren los ik op met Google of de website Stack Overflow, zodat ik het met mijn begeleider over belangrijke onderwerpen kan hebben.



‘Ik wilde altijd al wetenschapper worden’



‘Je moet het leuk vinden om soms te zitten klooiën’

Naam? Ginny Marshall
Nationaliteit? Brits

Functie? Vierdejaars PhD-kandidaat in de eEDM-groep
Locatie? Universiteit Groningen
Wat onderzoek je? Of we de eigenschappen van het elektron wel begrijpen. Dat kan experimenteel heel nauwkeurig door metingen te doen aan elektronen in moleculen, doordat sommige lastig te meten eigenschappen daar flink worden versterkt.

Snapt je familie dat? Ik denk dat die geen idee hebben wat ik precies doe! Iets met lasers in een lab. Mijn oma dacht tijdenlang dat ik bij CERN werkte. Dat heb ik er wel uit gekregen.

Waarom natuurkunde? Ginny-van-vier wilde al wetenschapper worden. Liefst iets met bio en genetica. Toen ik vijftien was, kon ik op stage bij de universiteit,

maar bij biologie en scheikunde was geen ruimte. Bij natuurkunde nam mijn rolmodel dr. Pearl John me onder haar vleugels. Na twee weken werken met lasers, glasvezels en outreach naar scholieren was ik verkocht!

Onverwachte ontdekking? Dat ik Nederland en Groningen ontzettend leuk vind. Na een paar cursussen begrijp ik het Nederlands redelijk, spreken is lastiger. Op het lab had ik een tijdje de “Nederlandse dinsdag”, dan dwong ik mezelf (en mijn collega’s) om in de wandelgangen Nederlands te spreken.

Advies aan de volgende generatie? Respecteer jezelf en durf te genieten. Het is verleidelijk om hele avonden en weekenden door te werken, maar dan breek je jezelf af.

Naam? Thijs van Eeden
Nationaliteit? Nederlands
Functie? Vierdejaars PhD-kandidaat in de neutrino-groep
Locatie? Nikhef, Amsterdam
Altijd al gewild? Ik had nooit gedacht dat ik zou gaan promoveren, laat staan in de natuurkunde. Als puber was ik vooral aan het chillen. Ook tijdens mijn studie technische natuurkunde zag ik mezelf geen onderzoeker worden. Alleen in een kamertje achter de boeken? Niks voor mij.

Hoe dan toch? Ik was met frisse tegenzin een onderwerp voor mijn masterscriptie aan het zoeken toen ik over KM3NeT hoorde bij Nikhef. Internationaal teamwerk aan een telescoop op de bodem van de zee, en daarmee neutrinodeeltjes uit de verste uithoeken van het heelal vangen? Ik dacht: ‘Dit klinkt knettergek - als

ik dan érgens een jaar aan moet werken voor mijn papiertje, dan hieraan!’ Het bleek zo tof dat ik door wilde.

Bevalt het? Enorm - het teamwerk in internationaal verband is geweldig. En KM3NeT wordt nog gebouwd, dus je kunt er echt je stempel op drukken.

Onderwerp? Ik programmeer algoritmes die neutrino-eigenschappen afleiden uit de meetgegevens, zoals hun energie en oorsprong. Dat gaat niet altijd meteen goed, maar het is net als gitaar leren spelen: je moet het leuk vinden dat je soms aan het klooiën bent voor het werkt.

Daarnaast? Ik coördineer tests van de KM3NeT-detectorbollen die Nikhef produceert. Niet direct bruikbaar voor mijn proefschrift, maar wel heel tof om met m’n handen aan die apparatuur te werken.



‘Tijdens mijn bachelorstage klikte het’

Naam? Maricke Flierman
Nationaliteit? Nederlands

Functie? Tweedejaars PhD-kandidaat in de donkere materie-groep
Locatie? Nikhef, Amsterdam
Wat onderzoek je? Hoe de donkere materie, die zorgt voor extra zwaartekracht in sterrenstelsels zoals de Melkweg, in elkaar zit. Bij het XENON-experiment in Gran Sasso in Italië, maar ook met onze eigen opstelling hier in Amsterdam.

Altijd al onderzoeker willen worden? Ik was er lang onzeker over - ben ik wel goed genoeg? Tijdens mijn bachelorstage in deze groep klikte het: hier zou ik het wel durven, promoveren. Ik weet zeker dat ik van deze mensen veel kan leren.

Waarom hier? Bij Nikhef mag je als PhD-kandidaat volwaardig meedoen. Mijn begeleider leerde me ook mijn collega’s niet op een voetstuk te zetten: ‘Je mag echt wat minder respect hebben voor de oude mannetjes’. Dat staat nu op een tegeltje op mijn bureau.
Wat leer je zoal? Natuurkunde is een gereedschapskist die ik steeds beter leer gebruiken. Feynman-diagrammen tekenen kon ik al, maar waar leer je nou welke kabels je nodig hebt bij 95 graden onder nul?

Naast je onderzoek? Zit ik in de commissie voor diversiteit en inclusie. Met kleine acties kunnen we het werk hier misschien nog fijner maken. Niks “woke”, dit gaat erover dat alle collega’s zich hier thuis voelen.



‘Je hebt de vrijheid om je eigen oplossingen te bedenken’

Naam? Bas Hofman
Nationaliteit? Nederlands
Functie? Derdejaars PhD-kandidaat in de ALICE-groep
Locatie? Universiteit Utrecht

Wat onderzoek je? Het quark-gluonplasma, een hete soep van elementaire deeltjes die ontstaat als je in de deeltjesversneller LHC complete atoomkernen van lood op elkaar laat botsen. In de begintijd van het heelal ontstonden de bouwstenen van de atomen uit afkoelend quark-gluonplasma. De LHC-botsingen zijn de beste manier om die overgang te bestuderen.

Wat leer je tijdens een promotie? Van alles, van programmeren en heel veel statistiek tot *soft skills* zoals samenwerken in een grote onderzoeksgemeenschap. In

ALICE heb je echt je eigen project om aan te pakken, maar ook veel samenwerking. Het is in ieders belang dat iedereen zijn weg vindt.

Het mooiste? Je hebt de vrijheid om je eigen oplossingen te bedenken voor problemen, want niemand kan het antwoord voorzeggen. Als je een vraagstuk dan na dagenlang worstelen kraakt, is dat echt een kick.

En naast je onderzoek? Ik vind het sociale aspect belangrijk. Nu we weer activiteiten kunnen organiseren na de pandemie, help ik daar graag aan mee. Het is goed om elkaar te leren kennen en goed samen te werken.

Advies? Durf te genieten van je promotie, want voor je het weet, ben je zomaar een jaar verder. ►



‘Ik wil dingen op fundamenteel niveau begrijpen’

Naam? Enzo Tapia
Nationaliteit? Chileens
Functie? Vierdejaars PhD-kandidaat in de zwaartekrachtsgolven-groep
Locatie? Nikhef, Amsterdam
Weleens geïnterviewd? Eén keer, voor een radioprogramma in Chili, over zwarte gaten en mijn onderzoek naar zwaartekrachtsgolven. Dat zijn rimpels in het weefsel van het heelal die ontstaan als enorme massa's op elkaar knallen. Zwaartekrachtsgolven zijn in een paar jaar tijd een nieuwe manier geworden om het verre heelal te onderzoeken.
Waarom natuurkunde? Ik kom uit de elektronica en daar leer je hoe dingen werken, maar ik wilde weten *waarom*. Dingen op funda-

menteel niveau begrijpen, dat is voor mij de kern van de natuurkunde.
Bevalt het promoveren? Het is echt anders dan andere banen. Aan het begin leer je al om een visie te ontwikkelen over wat je wilt bereiken en daar een vierjarenplan bij te maken. Dat is pittiger dan de korte-termijnprojecten die je in andere sectoren vindt. Je hebt veel vrijheid en een flinke klus om te klaren, daar geniet ik van.
Mindere kanten? Dat je veel vrijheid hebt, betekent dat je ook op moet letten dat je jezelf niet over de kop jaagt.
Tip? Als je iets niet snapt, vraag het dan. Je collega's hebben een enorm netwerk dat het antwoord weet.



‘Je eigen weg mogen zoeken is een privilege’

Naam? Carolina Bolognani
Nationaliteit? Braziliaans
Functie? Tweedejaars PhD-kandidaat in de LHCB-groep
Locatie? Universiteit Maastricht
Waar werk je aan? Een mix van theoretisch werk en data-analyse voor de LHCB-detector van CERN. Door heel precies te meten of en hoe het gedrag van het B-meson afwijkt van de voorspellingen van het Standaardmodel, kunnen we misschien hints vinden van nog onbekende natuurkunde.
Bevalt het? Heel goed! Ik kan hier echt bijdragen aan internationaal onderzoek en dat geeft zoveel energie.
Hoe is het om te promoveren? De vrijheid om je eigen weg te zoeken is een privilege. En terwijl je onderzoek doet bouw je ook aan je netwerk. Op conferenties kom ik de mensen tegen wiens

artikelen ik gebruik, dat is echt fantastisch.
Naast je onderzoek? Organiseer ik als lid van Nikhef's PhD-Council activiteiten voor de promovendi van het instituut. Onze onderzoeksprojecten hebben namelijk allerlei raakvlakken die je niet zou verwachten. Elkaar sociaal leren kennen maakt het dan makkelijker om later contact te zoeken.
Waar lig je wakker van? De valkuil van het altijd maar meer en beter willen doen, omdat het voelt alsof je anders niet goed genoeg bent. Het helpt om daarover te praten met medepromovendi.
Beste advies? Niet stressen in je eerste jaar, zei mijn voorganger op dit project tegen me. Je bent jezelf op verschillende vlakken aan het inwerken, neem daar de tijd voor.

Luisteren naar spookdeeltjes (en walvissen)

Soms heeft kosmische straling zoveel energie dat de inslag van deeltjes in principe zelfs te horen is. Nikhef-onderzoeker Ernst-Jan Buis bouwt aan een luistertelescoop in zee.

Half maart was een speciaal akoestisch testzwembad van TNO in Den Haag het toneel van een opmerkelijke proef. Nikhef-onderzoeker Ernst-Jan Buis en zijn team deden tests met een glasvezel waarmee ze in zee het inslaan van kosmische deeltjes willen horen. Een nieuw ontwikkeld meetapparaat waarmee onderwater geluid kan worden opgevangen.

Buis: 'In de jaren zeventig werd al voorspeld dat dat moest kunnen, dat sommige deeltjes zoveel warmte-energie in water zullen afgeven dat het water plaatselijk snel uitzet en er een akoestisch drukgolfje ontstaat. Dat effect kun je in experimenten meten, maar wij willen ermee naar de kosmos luisteren.'

Neutrino's hebben daarin de hoofdrol. Spookachtige, haast massalozes elementaire deeltjes die bij deeltjesprocessen vrijkomen en daarna nauwelijks interactie met materie hebben. Om ze toch te zien langskomen op aarde, zijn reusachtige detectoren nodig. Zoals de KM3NeT-detector van onder meer Nikhef die in aanbouw is in de Middellandse Zee. Die kijkt naar lichtsporen van inslaande neutrino's.

Maar zelfs de kubieke kilometer duister zeewater die KM3NeT met duizenden lichtsensoren kan observeren, is nog steeds veel te klein om met enige regelmaat het geluid op te vangen van neutrino's met extreem hoge energie. Daarvoor is volgens de rekensommen eerder 100 kubieke kilometer zeewater nodig. En dan nog, zegt Buis, hoort zo'n apparaat naar schatting in tien jaar tijd tussen de honderd en duizend neutrino's.

'Bizar weinig. Maar fysisch wel heel belangrijk omdat we gevoelig zijn tot een absolute recordenergie. Daar is nog nooit iemand geweest.'

Luisteren naar zeldzame botsingen van neutrino's in het zeewater gaat het team van Buis doen met een glasvezel met op regelmatige afstanden akoestische sensoren die de kleur van rondgestuurd licht iets veranderen als een geluidsgolf ze even wat uitrekt. Voordeel is dat zo iets geen elektronica of voeding nodig heeft en veel goedkoper is dan gewone onderwatermicrofoons.

Gevoelige apparatuur, ontwikkeld bij TNO, die goed moet worden ingepakt voor de rauwe onderwaterwereld van hoge waterdruk en zout. De proef in het Haagse zwembad test de werking van de sensoren als ze zijn ingepakt.

In het project werkt Nikhef nauw samen met TNO, maar ook met het Koninklijk Nederlands Instituut voor Zeeonderzoek NIOZ en het Wereldnatuurfonds. Samen dienden ze een voorstel in bij de Nationale Wetenschapagenda NWA, waar juist

samenwerking van disciplines erg wordt gewaardeerd.

De samenwerking met biologen is logisch, zegt Buis. In zee is verreweg het meeste geluid afkomstig van zeeleven, vooral grote zeezoogdieren zoals potvissen. Het zal, weet hij, nog een hele opgave worden om tussen al dat natuurlijke geruis, geklik en gezang de plops van een paar inslaande neutrino's op te merken. Daarbij is de precieze golfvorm van het geluid bepalend. Neutrino's trekken een spoor. Walvissen zijn langzame puntbronnen.

Als NWA komende zomer groen licht geeft, zal Buis een eerste testopstelling met vier lijnen bouwen die vermoedelijk rond 2026 in de diepzee bij de Azoren zal worden geplaatst. Voor de echte neutrino-luistertelescoop lijkt de diepzee bij Griekenland een optie, maar er wordt ook gedacht aan het Tanganyika-meer in Centraal-Afrika, dat diep, zoet en warm is en geen lawaaiige walvissen bevat.

De relatief goedkope optische luistertechniek, zegt hij, kan bovendien ook voor heel andere toepassingen nuttig blijken, als waakzame oren onder water. 'Van de bescherming van havens tot belangrijke pijpleidingen en dataverbindingen, ik kan in de huidige wereld heel veel verzinnen', zegt Buis.



Nederlandse ogen in de ruimte

Over ruim tien jaar vliegt LISA, een driedelige ruimtetelescoop voor zwaartekrachtsgolven, rond de zon. Nikhef en SRON bouwen de ogen van het apparaat.

Nikhef in space? Niels van Bakel heeft er wel even aan moeten wennen. Niet zozeer vanwege het avontuur om een onderdeel te bouwen voor een driedelige ruimtetelescoop voor zwaartekrachtsgolven. Al blijft dat natuurlijk een stoer verhaal. Maar toch vooral wennen omdat ruimtevaart een andere tak van sport is dan experimentele natuurkunde. Veel formeler en voorzichtiger dan deeltjesfysica. 'Wat natuurlijk ook terecht is, want als iets eenmaal in de ruimte is kun je er nooit meer bij', zegt de groepsleider van de afdeling Detector R&D bij Nikhef.

Van Bakel en Nikhef-collega's kregen in februari met onderzoekers van universiteiten en het instituut voor ruimteonderzoek SRON 12 miljoen euro van NWO om de Nederlandse inbreng vorm te geven in LISA. Dat is het nieuwe meetnetwerk van het Europees ruimteagentschap ESA om zwaartekrachtsgolven in de ruimte te meten. Deze trillingen van ruimte en tijd zelf ontstaan als verre zwarte gaten of neutronensterren botsen en hun omgeving opschudden.

In 2015 werden zulke trillingen voor het eerst waargenomen aan het aardoppervlak. De detectoren LIGO en Virgo

gebruikten daarvoor laserbundels van kilometers lengte. In LISA zijn de laserarmen tussen kunstmanen in de drie hoekpunten miljoenen kilometers lang en zal de blik op het trillende universum nog veel ruimer worden, denken de onderzoekers.

De Detector R&D-groep van Nikhef is gespecialiseerd in het ontwerpen en bouwen van nieuwe instrumenten en sensoren met alle mogelijke technieken, van micromechanica tot chipontwerp. Bestemd voor nieuwe deeltjes-experimenten, en voor de Einstein Telescope, een nieuwe detector op aarde (en mogelijk zelfs in Zuid-Limburg) voor zwaartekrachtsgolven.

Voor LISA ontwikkelt de groep samen met experts van SRON in Leiden sensoren voor laserlicht, die in een hoekpunt een signaal moeten kunnen zien van de laser die in een ander hoekpunt 2,5 miljoen kilometer verderop door de ruimte vliegt.

Een uitdaging, benadrukt Van Bakel, want LISA is niks anders dan drie kunstmanen die samen met de aarde rond de zon vliegen. 'De vorm van de driehoek verandert constant door de verschillende banen van de kunstmanen.'

Een hele optische tafel met spiegels en

sensoren in elk van de drie hoekstations houdt dat in de gaten. Op aarde worden zwaartekrachtsgolven gemeten doordat ze de vaste afstanden tussen spiegels even veranderen. In de ruimte zijn de afstanden niet vast, maar zoeken de LISA-sensoren naar minuscule lengteveranderingen door te kijken naar faseveranderingen in het laserlicht. De detectoren kunnen armlengteveranderingen tussen kunstmanen veroorzaakt door zwaartekrachtsgolven scheiden van de veel tragere baanbewegingen van de kunstmanen. Zwaartekrachtsgolven duren minuten, baanbewegingen maanden.

Het Nikhef-team heeft inmiddels een prototype ontwikkeld voor fotodiodes met vier segmenten die de richting en sterkte van het flauwe lasersignaal uit de verte kunnen oppikken. Samen met Nederlandse bedrijven is fotonicageologie toegepast om een zeer gevoelige fotodiode te ontwerpen.

Daarvoor zijn inmiddels ook de behuizing en uitlijnmechanismen ontworpen, die de komende jaren allerlei tests volgens ESA-protocol zullen moeten ondergaan, van elektromagnetische gevoeligheid tot temperatuurwisselingen en schokken. Dat zijn lastige metingen, omdat de apparaatjes bijna hermetisch zijn afgesloten terwijl ze van binnen getest moeten worden. Nikhef gebruikt daarvoor nu een optische rastertechniek die eerder in de deeltjesfysica is toegepast om LHC-detectoren op hun plek te krijgen.

Van Bakel noemt de onderneming in de ruimte ook interessant, omdat die ook weer input geeft voor experimenten in de natuurkunde. Sommige technologieën kunnen hun weg vinden naar deeltjesdetectoren en andere experimenten. Om die reden is er in het gehonoreerde LISA-voorstel ook een bijdrage opgenomen voor de Einstein Telescope en ETPATHfinder in Maastricht. ◀

Illustratie: NASA/JPL-Caltech/NASAE/ESA/CXC/STScI/GSFC/SVS/S.Barke

Tussen deeltjes en een heel heelal

Sinds begin dit jaar reist Marieke Postma eens per week naar Nijmegen, waar ze benoemd is tot hoogleraar Theoretische Kosmologie. 'Ik houd wel van onbekend terrein.'

Ze kijkt eigenlijk nooit naar de sterrenhemel. 'In elk geval niet meer dan andere mensen, als ze op een donkere plek op vakantie zijn', zegt Marieke Postma. 'Ik had nooit een eigen sterrenkijker en toen ik sterrenkunde studeerde, vond ik het allemaal lang niet theoretisch genoeg. Heel veel schattingen en in die tijd nog weinig harde natuurkunde. Vandaar dat ik in de theoretische fysica belandde. Lekker wiskundig, dat beviel me beter.'

Postma studeerde eerst sterrenkunde aan de Universiteit van Amsterdam, en deed dan een master in de theoretische natuurkunde aan de UvA. Het is begin jaren negentig, de tijd dat de COBE-satelliet de befaamde eerste babyfoto van het heelal maakt. De kosmische achtergrondstraling blijkt vol minieme variaties te zitten. Overblijfselen van wat er bij de oerknal gaande moet zijn geweest.

Het beeld is een belangrijke impuls voor de kosmologie, een onderzoeksveld dat sinds de jaren negentig enorm groeit, ook in Nederland. Zeker als andere satellieten zoals WMAP en Planck nog veel meer details over de oerknal ontrafelen, van de groeisput die inflatie heet tot de verdeling van donkere materie en de rol van donkere energie die het heelal versneld uiteendrijft.

Postma vindt deze onderwerpen meteen fascinerend. 'Wat je in die foto's aan details ziet, hangt allemaal recht-

streeks samen met de fysische begincondities van het heelal. Ik realiseerde me dat het huidige heelal ooit zo klein was dat subatomaire deeltjesfysica regeerde. En dat je daar nog steeds sporen van kunt zien.'

Sindsdien probeert ze met pen en papier en computerberekeningen bruggen te slaan tussen het allerkleinste en het allergrootste. Haar promotie in Los Angeles, haar postdoc-positie in Triëst, haar werk bij de theoriegroep van Nikhef sinds 2004, en tussendoor nog een postdoc-positie in Hamburg: allemaal stond en staat het in het teken van de kosmologie, maar dan wel steeds met de specifieke blik van de deeltjesfysicus.

Postma: 'Het grappige is dat je daarmee bijna vanzelf een buitenbeentje bent. Bijvoorbeeld op Nikhef zijn de meeste theoretici toch vooral bezig met deeltjes en hun interacties in een onveranderlijk universum. Maar vooral vlak na de oerknal veranderde het heelal zelf heel snel. Dat

'Je doet vaak dingen die nog niet in de leerboeken staan.'

Foto: Ivar Pel

geeft een samenspel tussen deeltjes en kosmos bij veel hogere energie dan onze versnellers ooit zullen leveren. Dat probeer je van twee kanten te begrijpen. Welke invloed hadden deeltjesprocessen? En kun je aan het huidige heelal aflezen wat er toen gebeurd is?'

Tijd is in haar aanpak nadrukkelijk een factor: waar leidt een bepaald begin toe en kun je omgekeerd aan het resultaat zien hoe het begonnen is? Postma: 'Je doet in feite voortdurend dingen die nog niet in de leerboeken staan. Dat is ingewikkeld maar ook heel erg leuk. Onbekend terrein. Daar houd ik wel van.'

Juist vanwege die ongebaande paden noemt Postma samenwerking met anderen heel belangrijk. 'Het is regelmatig niet zo duidelijk wat je volgende stap zou moeten zijn. Dan kun je uit het raam staren of onder de douche nadenken. Maar ik praat graag met collega's. Het helpt alleen al om dingen goed onder woorden te brengen. Je krijgt vragen die je aan het denken zetten. Ook om die reden verheug ik me op college geven in Nijmegen.'

De kosmos, merkt ze geregeld, fascineert heel veel mensen. 'In dat opzicht ben ik wel eens in het voordeel bij het aanvragen van financiering. In de kosmologie kun je makkelijk een mooi verhaal ophangen. Waar alles vandaan komt. Waar het heengaat. Dat zijn voor iedereen intrigerende vragen.'

**Abdus Salam-prijs voor
VLUCHTELINGENWERK**

Voormalig Nikhef-promovendus Tino Nyawelo krijgt dit jaar de *Spirit of Abdus*



Foto: University of Utah

Salam-prijs voor zijn werk om vluchtelingen bij de wetenschap te betrekken. Nyawelo werkt nu in Utah aan de Universiteit van Salt Lake City. Hij vluchtte ooit zelf uit Soedan en promoveerde uiteindelijk aan de VU Amsterdam. Hij richtte in de VS het REFUGES-programma op dat zich inspant om getalenteerde vluchtelingen te steunen bij een exacte wetenschappelijke opleiding. Nyawelo is nauw betrokken bij het opzetten van een outreachprogramma voor scholieren om kosmische straling te meten met zelfgebouwde detectoren. Het project is een voortzetting van het HiSPARC-pogamma van Nikhef bij Nederlandse scholen.

**Voorwerk afgerond voor
HOGE-INTENSITEIT VERSNELLER**

In Genève is afgelopen winter op CERN al het civieltechnische voorwerk voor de aanleg van de intensere versie van de LHC-versneller



Foto: CERN

afgerond. De High Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) moet in 2029 in gebruik worden genomen. Met de upgrade zal de versneller tot tienmaal meer protonbotsingen per seconde leveren. Daardoor kunnen deeltjesprocessen veel preciezer worden bestudeerd. In de 27 kilometer lange LHC-ring zijn daarvoor veel aanpassingen nodig, waarvoor nieuwe ondergrondse ruimtes en gangen zijn aangelegd. Nikhef werkt niet mee aan de nieuwe versneller, maar wel aan de voorbereiding van de grote detectorexperimenten op de komende deeltjesvloed en de netwerken om alle data te kunnen verwerken.

**Studium Generales bieden
LEZINGEN DEELTJESFYSCA**

Studium Generale Leiden presenteerde afgelopen voorjaar Expeditie Deeltjesfysica, een zesdelige lezingenreeks voor een algemeen publiek. De wekelijkse lezingen waren ook online te volgen en zijn nog steeds op de website van de Universiteit Leiden te bekijken. De Leidse lezingen waren een initiatief van hoogleraar wetenschapscommunicatie en

Nikhef-fysicus Ivo van Vulpen. Alle voordrachten, zowel over de deeltjestheorie als over experimenten, werden door Nikhef-wetenschappers verzorgd. In maart organiseerde Nikhef-onderzoeker Jacco de Vries voor Studium Generale Maastricht een vijfdelige lezingenreeks over het ontstaan van de moderne natuurkunde, waarin subatomaire fysica (deeltjes en ook zwaartekracht en zwaartekrachtsgolven) een belangrijke rol speelde.



Foto: Nikhef



Foto: Charlotte Odijk

**Tristan du Pree
HOUGLERAAR TWENTE**

Nikhef-fysicus Tristan du Pree is per 1 januari benoemd tot hoogleraar hoge-energiefysica aan de Universiteit Twente in Enschede. Du Pree is experimenteel fysicus en verbonden aan het ATLAS-experiment bij de LHC-versneller op CERN. Hij onderzoekt de eigenschappen van het in 2012 ontdekte higgsdeeltje en de rol ervan in de deeltjeswereld. Du Pree is als onderzoeker met een NWO Vidi-beurs sinds 2017 staf lid van Nikhef. Hij geeft in Enschede het introductiecollege hoge-energiefysica, een populair keuzevak bij studenten. Du Pree wil het onderzoek op Nikhef en aan de Universiteit Twente op het gebied van detectoren, koeling en supergeleiding dicht bij elkaar brengen.

**Geld voor netwerk
INDUSTRIECONTACTEN**

Het ministerie van EZK stelt de komende vier jaar 870 duizend euro beschikbaar voor het netwerk van verbindingsofficieren die grote wetenschappelijke instituten en de Nederlandse industrie bij elkaar brengen. Het zogenoemde ILO-netwerk wordt gedragen door Nikhef en nog drie grote NWO-instituten met veel technische behoeften: ASTRON, SRON en DIFFER. Het netwerk probeert vanuit onderzoeksorganisaties als CERN, SKA, ESA en ITER bedrijven te identificeren die betrokken kunnen en willen worden bij het onderzoek naar of de levering van componenten. Het netwerk presenteert zich geregeld op technische beurzen. De website bigscience.nl krijgt een centrale rol, zegt Jan Visser van Nikhef en het ILO-netwerk.

BIG science.nl



Erno Roeland bouwt mee aan een superlichte draagstructuur

'Dit is de draagstructuur voor wat de *Inner Tracker* heet. De ITk is een heel belangrijk nieuw onderdeel van de grote ATLAS-detector op CERN. Een hartstikke mooi ding, en fantastisch om te construeren. ITk is een detector die aan de in- en uitgang van de bundel heel precies wegliggende deeltjes kan waarnemen. Wij ontwerpen en bouwen voor ITk de hele draagstructuur, die tegelijk heel licht en superstijf moet zijn. En bestand tegen de straling en de kou. Nikhef is daar goed in, er zijn niet zoveel instituten in ons vak die professionele instrumentmakers in huis hebben.

De draagstructuur voor ITk is een centrale cilinder met zes

grote wielen aan spaken, alles van koolstof, waarop uiteindelijk de sensoren zullen worden geplaatst. Helemaal verlijmd, en alles binnen heel nauwe toleranties. Het ziet er wat grof uit, met zo'n steiger, maar het is heel geconcentreerd werk waarbij je almaar posities en afstanden moet controleren en corrigeren.

Zo'n groot werkstuk is maanden werk, ook omdat lijm nu eenmaal steeds moet uitharden. We bouwen er als team in totaal twee van, grotendeels in de cleanroom vanwege de stabiele temperatuur en

vochtigheid. In van die speciale pakken, om stof weg te houden.

De eerste draagstructuur is bijna klaar, alleen de geleiders, kabelbanen en de koeling moeten nog ingelijmd worden. Deze eerste gaat daarna naar DESY in Hamburg, waar de sensoren als een soort bloembladen in de wielen geplaatst worden. De tweede gaan we daarna helemaal hier in

Amsterdam bouwen en assembleren. Van de eerste hebben we heel veel geleerd, de tweede gaat vast wat sneller. We kennen nu de weg en het proces. Ergens rond 2029 moeten ze alle twee in ATLAS zitten en metingen gaan doen. Mooi om daar met je eigen handen aan bij te dragen.'

Foto: Marco Kraan

Erno Roeland is instrumentmaker bij de afdeling Mechanische Technologie van Nikhef

INHOUD

- 2 800 gigabit**
datasnelweg
op Nikhef
- 3 Stan Bentvelsen**
Grenzen verleggen
- 4 Nijmegen**
Hoge energie vanuit
allerlei perspectieven
- 10 Dorothea Samtleben**
gaat neutrino­fysica
leiding geven
- 12 ETpathfinder**
in volle
omvang
- 14 Promoveren**
bij Nikhef
- 19 Nieuw project**
Luisteren naar
neutrino's
- 20 LISA**
Ruimtetelescoop
voor
zwaartekrachts-
golven
- 21 Theoretische
kosmologie**
Marieke Postma
over haar onderzoek
- 23 Mooi werk**
Erno Roeland
over de
Inner Tracker

