

Najaar
2022

Nikhef

Nationaal
instituut voor
subatomaire fysica

DIM ENS IES

ONDERWIJS
Waarom Nikhef-
onderzoekers ook
graag lesgeven

UTRECHT
Nikhef-partner op het
raakvlak van deeltjes en
zwaartekrachtsgolven

Op weg voor de Einstein Telescope

Wie in september in de grensregio van Zuid-Limburg was, heeft ze kunnen zien rijden: drie witte vibroseistrucks die zich op een slakkentempo van 3 tot 4 kilometer per dag door het Heuvelland en de Voerstreek verplaatsten. Om de 20 meter stonden ze even stil om wat trillingen de grond in te sturen. De teruggekaatste trillingen werden geregistreerd door sensoren, en gaven zo informatie over de bodemstructuur.

Het onderzoek met deze trucks is één van de vele bodemonderzoeken in het gebied waar Nikhef bij betrokken is. Uiteindelijk moeten al die onderzoeken samen een goed beeld geven van de bodem, en óf en waar de ondergrondse Einstein Telescope hier zou kunnen komen.

Ook nationaal zijn er volop ontwikkelingen. Het Nederlandse kabinet besloot afgelopen voorjaar om 42 miljoen euro uit het Nationaal Groeifonds te investeren in voorbereidende werkzaamheden voor de Einstein Telescope. Daarnaast is nog eens 870 miljoen euro gereserveerd, waarmee Nederland zich samen met

België en Duitsland kandidaat zou kunnen stellen om de faciliteit te huisvesten. Met deze impuls is een projectbureau opgestart in Maastricht, waarin de voorbereidingen en onderzoeken voor de grensregio op één plek bij elkaar komen. Het gaat dan om de geologie en seismiek, planologische en juridische aspecten, communicatie en het stimuleren van een innovatie-ecosysteem rondom de Einstein Telescope.

En dan is er nog de Europese dimensie. Andreas Freise volgde recent Jo van den Brand op als Europees projectdirecteur. Hij stuurt nu samen met zijn collega's Fernando Ferroni uit Italië en Mario Martinez uit Spanje de activiteiten aan die zullen leiden tot een operationele infrastructuur.

Naar verwachting wordt rond 2025 besloten waar in Europa dit nieuwe supergevoelige zwaartekrachtsgolfobservatorium wordt gebouwd. De hoop is dan vanaf 2035 de baanbrekende ontdekkingen te kunnen doen waar het instrument voor ontworpen is. Mogelijk vanuit Zuid-Limburg.

Foto's: Frank Linde, Bjorn Vink



Winnen op raakvlakken

In dit nieuwe nummer van ons magazine DIMENSIES vindt u een portret van de Nikhef-groep aan de Universiteit Utrecht. Dat is een van de zes universitaire onderzoeksgroepen die samen met het NWO-instituut het Nikhef-samenwerkingsverband vormen, een platform met nationale coördinatie waarmee de Nederlandse deeltjes- en astrodeeltjesfysici internationaal veel meer impact maken.

De groep in Utrecht is extra interessant omdat er in feite twee natuurkundige onderwerpen in samenkomen. Enerzijds is Utrecht het Nederlandse hoofdkwartier voor ALICE, het experiment op CERN waarbij in het klein de materie van vlak na de oerknal wordt nagebootst en bestudeerd. Anderzijds is Utrecht een centrum van het Nederlandse onderzoek naar zwaartekrachtsgolven van botsende zwarte gaten en neutronensterren in het heelal.

Beide thema's zijn van grote klasse, maar in Utrecht gebeurt er nog iets bijzonders: de beide groepen zoeken nadrukkelijk naar hun raakvlakken. Omdat blijkt dat de wetten die supercompacte neutronensterren bij elkaar houden ook bij de samengeperste oerkmalmaterie een rol spelen. Zo ontstaan op het raakvlak nieuwe ideeën en inzichten voor beide zijden.

Vrijwel alle onderzoekers van Nikhef begeleiden studenten en promovendi en zijn daarmee verbonden aan een van de zes deelnemende universiteiten. Een groot aantal geven daar ook les. Daardoor is Nikhef niet alleen een onderzoeksinstituut maar sluit het ook op een heel ander raakvlak aan bij de universiteiten: via het onderwijs.

In deze DIMENSIES vertellen onderzoekers hoe lesgeven het leven van een wetenschapper misschien zwaarder maakt, maar ook verrijkt. Lesgeven aan nieuwsgierige studenten, blijkt daar, inspireert wetenschappers enorm. Anderzijds is het onderwijs ook een uitgelezen kans om nieuwe generaties jonge onderzoekers de weg naar de deeltjesfysica te wijzen. Nog een raakvlak dat twee kanten op werkt.

Stan Bentvelsen, directeur Nikhef

Over Nikhef

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

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

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

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

DIMENSIES najaar 2022

REDACTIE

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

AAN DIT NUMMER WERKTEN MEE

Joan Berger (foto's), Harry Heuts (foto's), Marco Kraan (foto's), Ivar Pel (foto's), Maureen Voestermans (tekst)

ONTWERP EN VORMGEVING

Enchilada (ontwerp), Naïm Niebuur studio (vormgeving)

OP DE COVER

Nikhef-onderzoeker Gideon Koekoek geeft college bij de Universiteit Maastricht. Foto: Harry Heuts

Extremen in Utrecht

Aan de Universiteit Utrecht trekken twee heel verschillende Nikhef-teams samen op. De een bestudeert botsende zwarte gaten, de ander botsende zware atomen. 'We verstaan elkaar inmiddels heel behoorlijk.'

Nikhef-programmaleider Raimond Snellings van het ALICE-experiment op CERN mag dan hoogleraar deeltjesfysica in Utrecht zijn, soms moet ook hij gewoon weer aan het huiswerk. Studeren om te weten waar de collega's een kamer verder op het lab het precies over hebben. 'Ik heb mijn algemene relativiteitstheorie wel even wat moeten ophalen', zegt hij in zijn werkkamer in het Ornstein-laboratorium op het Utrecht Science Park.

In de kamer naast hem zit Chris Van Den Broeck, een specialist in het doorgronden van zwaartekrachtsgolven. Beide hoogleraren leiden elk een team van ongeveer twintig staf, postdocs en promovendi. GRASP heet het instituut, van Gravitation and Subatomic Physics. Varend onder de vlag van de Universiteit Utrecht en tegelijk die van Nikhef. Utrecht is van oudsher een van de universitaire partners in de Nikhef-familie.

Op het eerste gezicht hebben de twee Utrechtse natuurkundigen en hun teams misschien niet zo heel veel gemeen. De een bestudeert hoe materie zich onder de extreme omstandigheden van de oerknal kan hebben gedragen. Met het grote en ingewikkelde ALICE-experiment op CERN in Genève, waarin met de grote versneller loodatomen op elkaar worden geschoten.

De ander probeert de rimpelingen in ruimte en tijd en hun bronnen te doorgronden. Deze worden met grote zwaartekrachtsgolfdetectoren als Virgo in Italië en LIGO in de VS opgevangen uit het heelal. Ze zijn doorgaans afkomstig van zwarte gaten die elkaar opslokken, en nu en dan ook neutronensterren.

De een bouwt machines en detectoren en reist veelvuldig naar Genève en weer terug. Handen uit de mouwen. De ander werkt vooral met computers, software en simulaties en zit aan grote monitoren in lichte kantoren.

En toch is er samenhang. Om het verband tussen beide aan te geven, trekt Chris Van Den Broeck de dop van zijn blauwe markerstift en tekent een grafiek

op het whiteboard aan de muur. Horizontaal staat de dichtheid van materie uit, verticaal de temperatuur ervan. Wat doet materie als het enorm op elkaar geperst wordt? Wat als het extreem heet wordt? En wat gebeurt er in alle mogelijke combinaties van beide grootheden in het tussengebied?

Van Den Broeck: 'De gemene deler van het onderzoek met zware ionenbotsingen en botsende zwarte gaten is dat we beide gebieden van dit fasediagram verkennen. Niet meteen dezelfde gebieden. Maar er is meer dan voldoende raakvlak om samen te willen optrekken. Uiteindelijk bekijken we namelijk allebei materie onder de meest extreme omstandigheden die we kennen.'

Inmiddels, heeft Snellings kort daarvoor vastgesteld, verstaan de beide teams elkaar al heel behoorlijk. 'Hoe verschillend onze technieken ook zijn, het draait om inzichten die elkaar kunnen aanvullen en voeden. Op onze colloquia levert dat interessante vragen en gesprekken op', zegt hij.

Chris Van Den Broeck is in Utrecht de man van de algemene relativiteitstheorie. Hij kan lezen en schrijven met Einsteins theorie van ruimte en tijd. En vooral met de toepassing ervan op extreem compacte objecten zoals zwarte gaten en neutronensterren: hemellichamen die zoveel massa samenvakken dat ze de ruimtetijd zelf vervormen.

Zijn vakgebied, vertelt hij, is nog steeds *booming*. 'Het zijn wat we noemen de *salad days*: er gebeurt sinds de eerste detectie van zwaartekrachtsgolven in 2015 haast te veel moois om het allemaal op te kunnen pakken.'

De groep, die een paar jaar geleden met Van Den Broeck van Amsterdam naar Utrecht verkaste, is de laatste jaren sterk gegroeid. Verreweg de meeste postdocs en promovendi zijn afkomstig uit verre landen, met name het Verre Oosten en Azië.

Zwaartekrachtsgolven zijn rillingen in de ruimtetijd zelf, die ontstaan als twee supercompacte objecten met hun verwrongen omgeving op elkaar botsen. Uit de vergelijkingen en simulaties van zulke catastrofale gebeurtenissen blijkt dat de rimpelingen in de ruimtetijd zich als kringen in een vijver in het heelal uitbreiden. Sinds 2015 hebben de Virgo- en LIGO-detectoren tientallen van zulke signalen waargenomen. In een enkel geval konden astronomen zelfs het object zien dat de vermoedelijke bron was.

Chris Van Den Broeck

Raimond Snellings

De ALICE-detector op CERN

De groep in Utrecht is volledig gericht op het oppikken van die rimpelingen in de detectorgegevens, en het doorgronden ervan. Het vinden van de signalen is al een vak apart: de minieme afwijkingen in eindeloos veel metingen vol ruis worden met speciale software-pipelines opgespoord.

In de precieze vorm van een ruimtetijd-golf is voor specialisten als Van Den Broeck en zijn team veel informatie te vinden. Bijvoorbeeld over wat er precies miljarden jaren geleden op elkaar is gebotst, van de massa tot de draaibeweging van de zwarte gaten of neutronensterren. De golfvormen worden daartoe vergeleken met simulaties op grond van stermodellen en relativiteitstheorie. Daarbij is de aanloop van steeds wildere schommelingen veelzeggend, maar tegenwoordig ook de zogeheten *ring down*: de manier waarop het nieuwgevormde zwarte gat als een trillende pudding geleidelijk weer tot rust komt. Astrofysici kunnen die patronen vergelijken met hun

modellen van met name neutronensterren, waarvan nog steeds de vraag is hoe het neutronenspul waarvan ze gemaakt zijn zich precies gedraagt: hard of zacht, vloeibaar, stroperig, taai?

Anderzijds zijn er ook nog veel open vragen over zwarte gaten. Hun bestaan, voorspeld door Einsteins theorie van een eeuw geleden, is nu wel aangetoond. Maar hoe ze precies ontstaan, hoe zwaar de sterren mogen of moeten zijn waaruit ze ontstaan, is allemaal nog onderwerp van discussie. En van verrassingen, zegt Van Den Broeck. 'In theorie is er een gebied waar objecten te licht zijn om een zwart gat te vormen. En toch lijken we die nu en dan ook te zien. Voor een theoreticus als ikzelf is zoiets natuurlijk geweldig. Wat is hier gaande? Wat hebben we in de theorie gemist?'

Het is allemaal werk dat vooral rekenkracht vergt en rustige werkkamers vol grote beeldschermen met code en nu en dan simulaties van in een draaikolk snel naar elkaar toe cirkelende zwarte gaten. Soms klinkt op de gang een karakteristieke WHOOP van iemand die de golfvorm als ringtone op zijn mobieltje heeft geïnstalleerd.

Voor de ALICE-tak van de Utrechtse Nikhef-afdeling is de laatste jaren de techniek buitengewoon dominant geweest. De huizenhoge ondergrondse detector bij de LHC-versneller in Genève (ALICE staat voor "A Large Ion Collider Experiment") heeft een drastische verbouwing ondergaan. Aan het experiment werken meer dan 1800 fysici uit ruim veertig landen samen.

Nikhef nam een van de hoofdrollen voor zijn rekening met een nieuw ontwerp van het *Inner Tracking System* (ITS) vol siliciumsensoren, dat als eerste de botsende atoomkernen in beeld brengt. Delen van ITS zijn in Nederland ontworpen en gebouwd. In feite, zegt Snellings, is er de



Marco van Leeuwen

(Amsterdam, Nederland 1975) is sinds 2013 Nikhef-stafid en vanaf januari 2023 wetenschappelijk woordvoerder voor het ALICE-experiment op CERN. Woont veelal in Genève, heeft een Nikhef-bureau in Amsterdam. Maar altijd in nauw contact met Utrecht, het hoofdkwartier van ALICE in Nederland en ook zijn andere woonplaats. Natuurkundige van nature, al sinds school. Brede interesses. Specialist in deeltjesproeiers (jets) uit quark-gluonplasma's.

Anna Puecher

(Trento, Italië 1994) doet sinds 2019 promotieonderzoek naar **zwaartekrachtsgolven**, van het testen van de Algemene Relativiteitstheorie tot betere toekomstige detectoren. Eerst in Amsterdam, maar daarna in Utrecht. Eigenlijk wilde ze archeologie studeren, maar als scholier bezocht ze een seminar waardoor het toch natuurkunde werd. De discussies met deeltjesfysici vindt ze behoorlijk ingewikkeld, maar de groep is tof. Zou graag twee neutronensterren zien botsen.



Alessandro Grelli

(Umbertide, Italië 1980) is universitair docent aan de Universiteit Utrecht en verbonden aan het ALICE-experiment op CERN. Speurt naar zware quarks in proton-proton en loodkernbotsingen. Wilde ooit filosofie studeren, maar koos voor natuurkunde omdat daar altijd iets nieuws te beleven valt. Kreeg diverse aanbiedingen, maar koos als AC Milan-fan voor Utrecht omdat het de thuisstad van voetballer Marco van Basten is, zijn held.

Chinmay Kalaghatgi

(Hubali, India 1992) is sinds 2020 postdoc aan de Universiteit Utrecht en Nikhef. Een specialist in data-analyse van **zwaartekrachtsgolven** van botsende zwarte gaten. Liefst supersnel draaiende systemen waarmee de zwaartekrachtstheorie direct kan worden getest. Droomt ervan afwijkingen van Einsteins relativiteitstheorie te ontdekken. Door natuurkunde gegrepen via de boeken van (leestip) onder meer de Indiase fysicus en science-fictionschrijver Jaynant Narlikar.



afgelopen jaren een bijna geheel nieuwe ALICE-detector gebouwd. 'Veel completer dan wat we hadden en klaar voor de toekomst.'

De Nederlandse inbreng in ALICE is vanaf komende winter nog eens extra duidelijk als Nikhef-fysicus Marco van Leeuwen in Genève de nieuwe *spokes-person* wordt. Hij zal drie jaar lang het belangrijkste wetenschappelijke gezicht zijn van het ALICE-experiment op CERN. In juli is de LHC weer in bedrijf gekomen voor een volgende meetperiode. De versneller jaagt vooralsnog protonen rond, die belangrijk zijn voor de andere drie detectoren op CERN die naar fundamentele

deeltjesprocessen kijken: ATLAS, LHCb en CMS.

Het cruciale moment voor ALICE is traditioneel het einde van het jaar, als de versneller een paar weken zware ionen met vrijwel de lichtsnelheid laat rondrazen en botsen. Bij die frontale botsingen treffen de atoomkernen vol protonen en neutronen elkaar en ondergaan ze bij temperaturen van meer dan duizend miljard graden dramatische veranderingen, de zogeheten fase-overgangen, waarbij druppels van alleen nog quarks en gluonen ontstaan. Dit quark-gluonplasma moet microseconden na de oerknal ook hebben bestaan, is het idee.

De processen bij die chaotische botsingen zijn ingewikkeld en lastig om rechtstreeks uit de deeltjesfysica af te leiden. Er komt vloeistofdynamica bij kijken, maar ook quantum-chromodynamica (QCD), de theorie voor de sterke kernkracht. 'Wij bekijken collectieve systemen ver van evenwicht, iets heel anders dan de meeste deeltjesfysici gewend zijn, ook op Nikhef. In zekere zin kan ik er soms makkelijker met Chris en zijn mensen over praten dan met collega's van andere versnellerexperimenten op CERN.'

Toch zijn er ook duidelijke raakvlakken tussen de wereld van ALICE en van de overige detectoren op CERN. Het experiment is speciaal gebouwd om naar de chaos van botsende zware ionen te kijken, maar is inmiddels wel degelijk ook in staat om botsende protonen te bestuderen. Daarin gebeurt op microschaal zelfs min of meer hetzelfde als bij zware kernbotsingen: de quarks en gluonen vormen heel even een wolkje of druppeltje met hun eigen eigenaardigheden. Gewone deeltjesexperimenten negeren die effecten, maar ALICE kijkt er een groot deel van het seizoen naar, wanneer er geen zware ionen rondgaan in de LHC. Binnenkort komen er zelfs experimenten met botsend zuurstof bij, ergens tussen protonen en loodkernen in, en dus mooi in staat om experimenteel de verbinding te leggen tussen collectief en individueel deeltjesgedrag.



Impressie van een botsing in de ALICE-detector



Melissa Lopez

(Buenos Aires, Argentinië 1995) is sinds 2020 promovendus bij GRASP, het Utrechtse instituut voor Gravitation and Subatomic Physics. Een perfecte mix van deeltjes en gravitatiefysica, vindt ze. Lopez werkt aan zelflerende algoritmes voor het detecteren van **zwaartekrachtsgolven**. Liefst van een instortende zware ster, startpunt van een supernova die astronomen daarna ook kunnen waarnemen en de geboorte van een zwart gat. Met dank aan Carl Sagan, wiens serie *Cosmos* haar ooit nieuwsgierig maakte naar de kosmos.

Panos Christakoglou

(Athene, Griekenland 1976) is sinds 2014 in dienst van NWO als Nikhef-stafonderzoeker in Utrecht. Specialist in collectief gedrag in de botsingen van protonen en van zware ionen in het ALICE-experiment op CERN. Enthousiast over het samenkomen van deeltjesfysica en astrofysica in het nieuwe ENW-XL project met onder meer de UvA. Fysicus omdat hij niet alleen graag vragen stelt, maar ook antwoorden wil.



Justin Janquart

(Geraardsbergen, België 1997) is promovendus in de groep **zwaartekrachtsgolven** van de Universiteit Utrecht en Nikhef. Hij bestudeert het effect van zwaartekrachtlenzen op zwaartekrachtsgolven. Waarom niet, dacht hij toen hij de vacature zag. Is van jongs af aan geboeid door de vraag hoe het universum werkt en schuift op Nikhef graag aan bij discussies en presentaties, ook over heel andere fysica-onderwerpen. Droomt van een verwrongen lichtsignaal van botsende zwarte gaten.

Thomas Peitzmann

(Bünde, Duitsland 1960) is sinds 2002 hoogleraar natuurkunde aan de Universiteit Utrecht en verbonden aan Nikhef. Specialist in fotonen uit botsende zware ionen in het ALICE-experiment op CERN. Vindt de samenwerking met de zwaartekrachtsgolven-groep soms nog moeilijk in echt onderzoek te vertalen. Realiseerde zich als sterrenkijkende tiener dat je natuurkunde nodig hebt om het heelal te begrijpen. Fysicus omdat hij anders dan zijn vader, een filosoof, liever onomstotelijke feiten heeft dan opvattingen.



Chris Van Den Broeck gaat nog even terug naar het fasediagram dat hij op zijn whiteboard schetste. Hij tekent er de domeinen bij waar een experiment als ALICE informatie kan geven, vooral bij lage dichtheid en hoge temperatuur. Daar tegenover zijn er de botsende neutronensterren, waar de temperaturen laag zijn maar de drukken extreem. Inmiddels, zegt hij, zijn er andere waarnemingen die iets kunnen gaan zeggen over het tussenliggende gebied. Zogeheten gammaflitsen, röntgenopnames vanuit ruimtestation ISS, nagloed van zogenoemde kilonova's. 'We zijn nog verre van klaar, dat lijkt me duidelijk', zegt Van Den Broeck, het whiteboard overziend.

Onlangs is het werk van de twee Utrechtse teams extra met elkaar verbonden via een nieuw onderzoeksprogramma van astrofysicus Anna Watts van de Universiteit van Amsterdam. Zij geldt als een expert op het gebied van neutronensterren, supercompacte ingestorte sterren waarvan een kleine bol pure neutronen overblijft met een onvoorstelbaar hoge dichtheid: een theelepeltje ervan weegt evenveel als de Mount Everest.

Deze zomer kreeg team-Watts een ENW-XL financiering voor nadere samenwerking van onderzoekers van materie onder extreme omstandigheden, zowel vanuit de natuurkunde als in de sterrenkunde. 'Soms zit je maar een gang van elkaar verwijderd en toch komt het er maar niet van om samen naar bepaalde vraagstukken te kijken', zegt Snellings. 'Dat gaan we anders doen, en ik verheug me erop.'

Wat er te halen valt liet afgelopen jaar de toenmalige promovendus Peter Pang van de Utrechtse groep zien. Pang, afkomstig uit het politiek roerige Hong Kong, was een van de hoofdauteurs van een studie in *Nature* naar de toestand van neutronensterren waarin voor het eerst rechtstreeks gegevens van zware-ionenbotsingen uit experimenten in de VS en zwaartekrachtsgolven werden gecombineerd.

De uitkomsten van dat onderzoek weken niet heel veel af van wat astronomen al denken te weten over neutronensterren: bollen van alleen maar neutronen, met een diameter van pakweg twintig kilometer, maar wel anderhalf keer zo zwaar als onze zon. De grote winst van Pangs studie was echter dat hij bewees dat twee totaal verschillende domeinen, dat van de atomen en dat van de rillende ruimtetijd, elkaar vooruit kunnen helpen. Inmiddels wordt in Darmstadt in Duitsland gewerkt aan een nieuwe versnellerfaciliteit voor botsende atomen, met lagere energie dan op CERN maar met een extreem hoge intensiteit. Dit om de verbanden tussen de twee domeinen nog sterker te maken.



Paul Kuijer

(Amsterdam, Nederland 1957) is Nikhef-onderzoeker in Amsterdam, maar via ALICE nog altijd verbonden met Utrecht, waar hij ooit werkte. Bouwde eerder delen van de vernieuwde ALICE-detector op CERN, werkt nu mee aan de constructie van de ETPathfinder in Maastricht, een testlab voor geavanceerde metingen van **zwaartekrachtsgolven**. Altijd geïnteresseerd in hoe dingen van binnen werken. Fysici doen dat op het meest fundamentele niveau.

De deeltjesboekhouder

Zijn overzichten van nieuwe deeltjes zijn spraakmakend op Twitter. Nikhef-fysicus *Patrick Koppenburg* over het belang van boekhouden in de natuurkunde.

Het zijn er nu zevenenzestig, zegt Patrick Koppenburg, een boomlange in Duitsland geboren natuurkundige die voor Nikhef bij CERN werkt en een bescheiden held is op Twitter met duizenden volgers. Zevenenzestig nieuwe deeltjes zijn de afgelopen tien jaar ontdekt door de experimenten bij de LHC-versneller op CERN. Als een boekhouder houdt hij dat dagelijks bij. Altijd wachtend op meer.

Het higgsdeeltje, ontdekt in 2012, is veruit het bekendste. Een cruciaal onderdeel van de deeltjestheorie en min of meer de reden dat de gigantische versneller in Zwitserland überhaupt is gebouwd.

Maar daarnaast werden in die jaren ook vele tientallen zogenaamde hadronen aangetoond in de sporen van protonbotsingen. Nieuwe deeltjes samengesteld uit twee, drie en soms zelfs vier of vijf quarks. Ze vervallen in een oogwenk of zelfs minder. Geen dingen die vaak de krant halen. Maar hun bestaan bevestigt vooral allerlei aspecten van de deeltjestheorie.

Patrick Koppenburg is sinds 2009 verbonden aan Nikhef. Hij is met zijn gezin permanent gevestigd in Genève, waar hij werkt voor het LHCb-experiment bij CERN, een van de vier grote detectoren bij de LHC, de grootste versneller ter wereld. Als het moet, komt hij overigens gewoon naar Amsterdam. Steeds vaker met de trein, dat wel. Om milieu- en klimaatredenen natuurlijk.

Koppenburg: 'Mensen zoals ik, zonder onderwijstaak, zijn gewild bij CERN omdat ze er altijd zijn en fulltime verantwoorde-

lijkheden kunnen nemen. En omgekeerd ben ik als Nikhef-senior bij CERN ook een belangrijk aanspreekpunt voor Nederlandse studenten en postdocs die hierheen komen.'

Het LHCb-experiment bij CERN is zijn echte thuisbasis waar hij vooral werkt aan het leveren van analysesoftware die in het experiment wordt gebruikt om de deeltjessporen in de detector te analyseren. Het experiment, waar honderden onderzoekers uit de hele wereld aan werken, voelt voor hem als een familie. 'Een familie die zo goed mogelijk zorgt voor het enorme apparaat dat we samen hebben gebouwd. Het zou een hele stap zijn, mocht ik ooit besluiten iets anders te gaan doen.'

Ooit schreef hij zijn masterscriptie over LHCb, toen die detector nog niet eens in bedrijf was. Zonder data, maar wel over een bepaald verval van B-mesonen dat ook nu nog interessante metingen oplevert. En na wetenschappelijke omzwervingen in Japan en Londen werd hij eerst operationeel coördinator bij LHCb, degene die het verzamelen en verwerken van meetgegevens organiseert en controleert. Daarna koos de LHCb-samenwerking hem voor een paar jaar tot fysicacoördinator, spin in het web van alle onderzoekslijnen van het experiment. Hard werken, maar een eervolle functie.

Maar ook voor de buitenwereld is Koppenburg geen onbekende. Vooral op Twitter becommentarieert hij graag nieuws uit de deeltjeswereld als @PKoppenburg. En zijn *plots* waarin hij altijd de laatste nieuwe deeltjes noteert worden veel

bekeken. Duizenden volgen zijn nuchtere en verhelderende commentaar.

Koppenburg: 'Ik doe dat niet eens zozeer om de cynici tegen te spreken die beweren dat er sinds het higgsdeeltje niets meer is gebeurd in de deeltjesfysica. Ook dat, maar vooral om te laten zien dat de natuurkunde niet uit de lucht komt vallen, de formules van Newton of Einstein die je op school leert zijn hen niet door God inge-fluisterd. Die zijn het resultaat van geconcentreerd onderzoek.'

Hij zou eigenlijk willen dat je op school vooral leert hoe wetenschappelijk onderzoek werkt. 'Je kunt altijd formules opzoeken, dat doe ik zelf ook. Lang leve Wikipedia.'

Twitter

Op de meest recente grafieken die Koppenburg op Twitter laat zien, staan nu zo'n twintig grootheden in de eigenschappen van deeltjes die niet lijken te kloppen met wat de theorie voorspelt. Daartoe behoort ook het verval van B-mesonen tot K-deeltjes waarover Koppenburg ooit zijn masterscriptie schreef.

Ze zijn statistisch gezien lang niet allemaal hard genoeg. Maar ze zijn er wel, hints van afwijkingen die nog niemand kan verklaren. En sterker: de kleine anomalieën raken niet op, integendeel, er worden steeds meer gevonden.

Wat op zich al een belangrijke les is, vindt Koppenburg. 'De oogst van de LHC is rijker dan we bij de bouw hadden ver-

wacht. Niet alleen omdat er meer te vinden is, maar ook omdat onze detectoren en versnellers gaandeweg meer blijken te kunnen dan je aanvankelijk durft te hopen.'

Een belangrijke focus ligt nu op wat *lepton non-universality* wordt genoemd: het groeiende vermoeden dat deeltjes zoals elektronen, muonen en tau-leptonen verschillen in meer dan alleen hun massa, zoals de theorie veronderstelt. LHCb vindt stap voor stap aanwijzingen hiervoor, maar is ook voorzichtig met het trekken van conclusies. Meer meetwerk kan de afwijking ook gewoon weer kleiner maken, want het zou toch een rare uitschieter kunnen zijn.

Een waarschuwing is bij dit alles wel op zijn plaats, vindt Koppenburg. 'Dit is natuurlijk ook een beetje *cherry picking*. Alles wat normaal is, komt niet in deze *plots* voor. En er zijn heel veel metingen die precies uitkomen zoals verwacht en alleen het Standaardmodel bevestigen. Dat is ook nuttig om te weten, en zelfs cruciaal voor latere experimenten. Maar de krant haalt het niet.'

Veel van die zogenaamde anomalieën draaien om ingewikkelde afgeleide grootheden, waar de buitenstaander eigenlijk weinig mee kan. Maar dat geeft niet; zelfs natuurkundigen klagen soms over de vreemde parameters en verhoudingen waar hun LHCb-collega's nu weer mee jongleren. De boodschap is echter duidelijk: er valt nog veel te verklaren in de deeltjeswereld. Koppenburg: 'Dat zie je in één oogopslag aan mijn *plots*.'

Nieuw ontmoetings- hart

Waar ooit de binnentuin van Nikhef lag, krijgt het nieuwe ontmoetingshart van het instituut steeds meer vorm. Daarmee is de renovatie van het Nikhef-hoofdgebouw op Amsterdam Science Park een nieuwe fase ingegaan.

De stalen constructie die afgelopen

zomer binnen een paar weken verrees, geeft al een indruk van de enorme ruimte die het instituut door de overkapping van de binnentuin er in de toekomst bij krijgt. Het plafond van de nieuwe colloquiumzaal is al te herkennen. En ook de betonnen vloer van een aantal loopbruggen is al

geplaatst. Deze gaan straks op de eerste verdieping de twee vleugels van het gebouw met elkaar verbinden.

De zon valt volop naar binnen. In het nieuwe moderne atrium zullen ontmoeting en openheid centraal staan. Het glazen dak gaat voor een lichte en transparante

sfeer zorgen waarin ruimte is voor discussies, toevallige ontmoetingen, nieuwe inzichten en inspiratie. Voor Nikhef-collega's én bezoekers.

Waar nu nog een hoogwerker staat, loopt volgend jaar, na de opening van het gerenoveerde gebouw, de nieuwe

expostrap langs de volle lengte van het atrium. Daarop gaat Nikhef zijn baanbrekend onderzoek en state-of-the-art technologie aan gasten en bezoekers laten zien. Thematische eilanden geven dan een inblik in de wereld van de deeltjes, in de extreem nauwkeurige detectoren en reus-

achtige versnellers. Ook de modernste hardware- en softwaretechnieken die bij het onderzoek van Nikhef gebruikt worden, worden uitgelicht. Allemaal ontworpen en gemaakt en geanalyseerd door mensen van Nikhef en hun collega's overal in de wereld.

Lekker lesgeven

Het kost tijd, maar het levert veel op. Waarom Nikhef-onderzoekers graag onderwijs geven.

‘Je zult een onderwerp nooit beter leren begrijpen dan wanneer je er les over moet geven’, zegt Juan Rojo, theoreticus binnen Nikhef, hoogleraar aan de Vrije Universiteit Amsterdam en tevens voorzitter van de onderzoeksschool subatomaire fysica. Onderwijs is soms een ondergeschoven kindje binnen de wetenschap. En dat is zonde, vindt hij, want goede wetenschap valt of staat bij goed onderwezen wetenschappers. Juan is inmiddels ook een aparte training gestart om de Nikhef-staf te helpen goede supervisie te bieden aan promovendi. Want goed onderwijs geven is iets heel anders dan als wetenschapper goed je eigen onderzoek

doen. Sascha Caron vult aan: ‘Sommigen denken: als ik maar genoeg geld binnenhaal hoeft ik lekker geen onderwijs te doen!’ Onderwijs is niet alleen belangrijk voor het opleiden van de nieuwe generatie wetenschappers, het kan je ook ontzettend veel energie geven. Door iets uit te leggen leer je zelf vaak ook weer van alles. En het haalt je even uit je eigen *comfort zone*, waardoor je soms anders tegen je eigen onderzoek aankijkt. ‘Wat voor jou heel logisch lijkt, en voor je vakgenoten ook, is soms best uitdagend om goed uit te leggen’, aldus Keri Vos.

Tekst: Maureen Voestermans



Gideon Koekoek

Welke vakken? Advanced Mathematical Techniques of Physics (bachelor), Special Relativity (bachelor), General Relativity (master)

Waar? Universiteit Maastricht

Eigen onderzoek? Zwaartekrachtsgolven



Jory Sonneveld

Welke vakken? Het Nikhef project (master), Particle Detection (master), Astroparticle Physics (bachelor)

Waar? Universiteit van Amsterdam/Amsterdam University College

Eigen onderzoek? Detector R&D

‘Lesgeven zit me wel in het bloed. Ik heb na mijn promotie lang lesgegeven op een middelbare school en er een tweede MSc-diploma in behaald, dat was ontzettend leuk en leerzaam. Pedagogisch en didactisch gezien is dat moeilijker - deze kinderen moet je echt nog een beetje opvoeden en ze hebben natuurlijk weinig voorkennis. Op de middelbare school is de docent de belichaming van het vak ‘natuurkunde’, dat maakte een voorrecht om de eerste indruk van onze wetenschap te mogen geven. Nu, voltijd terug in *academia*, geef ik drie vakken, voornamelijk over relativiteitstheorie. Ik probeer mijn onderzoek, of in ieder geval actuele ontwikkelingen in de wetenschap, altijd mee te nemen in mijn lesgeven. Het leuke is dat het mij scherp houdt; ik wil alles tot in de puntjes weten zodat ik het goed kan uitleggen. Voor de

studenten is het leuk om te weten dat ze deel zijn van een groter geheel. De balans tussen eigen onderzoek en lesgeven is soms lastig. Ik zeg altijd: ik doe 50% van de tijd onderzoek, 50% van de tijd geef ik onderwijs, en 50% van de tijd doe ik aan outreach, o.a. als coördinator Education van de Virgo Collaboration. Gelukkig is er wel een omwenteling gaande in de manier waarop wetenschappers gewaardeerd worden. Er is een landelijk programma dat heet ‘Erkennen & Waarderen’, waarin we ervoor zorgen dat een wetenschapper niet alleen beoordeeld wordt op het aantal publicaties, maar ook op de kwaliteit van het onderwijs, de impact op de maatschappij en leiderschap - bijvoorbeeld het samenbrengen van een consortium. Ik vind dit een belangrijke ontwikkeling en ben hier ook heel nauw bij betrokken.’

‘Inmiddels geef ik alweer heel lang les want zelfs toen ik studeerde was ik actief als student-assistent. Mijn beide ouders hebben in het onderwijs gewerkt dus ik heb het niet van een vreemde. Ik geef nu een aantal vakken waaronder ‘het Nikhef Project’ voor masterstudenten van de UvA en de VU die dan ook echt lekker aan de apparatuur mogen sleutelen. We bouwen samen aan de detectoren. Dat het zo *hands-on* is vinden ze hartstikke leuk. Vooral als ze gewend waren alleen theorie te doen, dan is het bijzonder om te zien dat ze echt iets heel nieuws leren en dat het ze ook lukt. We begonnen dit vak met 12 personen maar inmiddels zijn het er 20. Je ziet dat er veel interesse voor is, daarom ben ik ook bezig met het opzetten van een nieuwe bachelor genaamd ‘Science and Design’ waarbij die *hands-on*

benadering van lesgeven centraal staat. Naast ‘het Nikhef project’ geef ik nog twee vakken, ‘Particle Detection’ samen met Kazu Akiba en een bachelorvak ‘Astroparticle Physics’ samen met Tina Pollmann. Vooral dat laatste vak was voor mij ook een manier om weer veel nieuws te leren, dat was erg leuk. Het kost weliswaar veel tijd om echt goed onderwijs op te zetten, maar het geeft me ook altijd veel energie. En het is fijn dat ik de vakken samen kan geven met collega’s.’



Sascha Caron

Welke vakken? Structure of matter: sub-atomic physics (bachelor), Particles and the cosmos (master), Machine learning in particle physics and astronomy (master)

Waar? Radboud Universiteit in Nijmegen

Eigen onderzoek? ATLAS

Mick Mulder

Welke vakken? Collider Experiments (master), Subatomic Physics (bachelor), From Small to Large to Life (honours)

Waar? Rijksuniversiteit Groningen

Eigen onderzoek: LHCb

Mara Senghi Soares

Welke vakken? Programming (bachelor Medische Natuurwetenschappen), Dynamics (master Mechanical Engineering)

Waar? Vrije Universiteit Amsterdam/

Universiteit Twente

Eigen onderzoek? LHCb

Marcel Vreeswijk

Welke vakken? Trillingen en golven (bachelor), Quantummechanica (bachelor)

Waar? Universiteit van Amsterdam

Eigen onderzoek? ATLAS

‘Ik ben behoorlijk wat tijd kwijt met nakijken! Ik heb dan ook best grote groepen, voor het vak “Subatomic physics” heb ik zo’n 100 studenten. Maar het is ook leuk hoor. En belangrijk! Corona heeft het onderwijs best wel veranderd. Die Zoom-colleges werkten echt voor geen meter. Ik heb daarom die ‘flipped classroom’ methode toegepast. Daarvoor heb ik eerst YouTube-video’s opgenomen - niet standaard college-video’s maar echt leuke filmpjes met allerlei filmpjes weer in dat filmpje gemonteerd - en die mochten de studenten dan kijken vóór het college. Tijdens het online college konden ze dan vooral vragen stellen en discussiëren. Dat werkte veel beter. Misschien werkt het zelfs wel beter dan een klassiek hoorcollege. Ik probeer nu, na corona, een mix van dit alles te doen. Dus ze kijken film-

pjes, soms krijgen ze klassieke hoorcolleges, maar vooral probeer ik meer die interactie aan te gaan samen. Het kost allemaal wel veel tijd - vooral ook nog de dingen naast onderwijs en onderzoek, zoals aanvragen indienen. Maar het is niet anders! Ik vind het echt grote onzin als mensen zeggen “ik heb al zoveel geld binnengehaald, nu hoeft ik geen onderwijs meer te geven”. Onderwijs is gewoon heel erg belangrijk.’

‘Een bijzondere groep waaraan ik momenteel les geef zijn de honoursstudenten. Dat zijn juist geen natuurkundestudenten maar studenten met een hele andere achtergrond die willen bijleren naast hun reguliere onderwijs. Het is een extra gemotiveerde groep, dat merk je wel, heel leuk. Wel hebben ze weinig achtergrondkennis dus ik moet echt bij de basis beginnen. Ik leer ze bijvoorbeeld in brede zin iets over quantumfysica. Wat ik ook interessant vind is dat ik de studenten leer om een wetenschappelijk artikel helemaal uit te pluizen. Ze moeten dan dus echt begrijpen wat er staat. Op die manier leren ze meer over de wetenschap na de universiteit, dat is denk ik wel belangrijk. Ik vind het bijzonder om te zien dat er uiteindelijk ook studenten in een PhD belanden nadat ik ze heb lesgegeven. Je hebt dan hoop ik

toch een goede invloed gehad, dat ze het vak kennelijk leuk vonden. Wat ik zelf heel fijn vond toen ik als student in de deeltjesfysica terecht kwam is dat ik eigenlijk meteen werd opgenomen in de groep, je hoorde er echt bij ook al begon je net pas. Dat gevoel hoop ik ook mee te geven aan mijn studenten. In februari ga ik met een groepje masterstudenten naar CERN, dan zien ze meteen waar ze nou eigenlijk mee bezig zijn.’

‘Eigenlijk geef ik geen typische natuurkundelessen. Aan de VU geef ik programmeren in Python op de afdeling medische wetenschappen. Dit is heel breed, het is nuttig voor natuurkundigen maar ook voor elke andere tak van wetenschap. De groep studenten in het eerste jaar was erg groot, 240 studenten. De gezamenlijke opleiding Twente/VU is ook technisch, gericht op ingenieurs. Ik vind het erg leuk om zo’n brede groep studenten te hebben, dat is heel inspirerend. Ik krijg er veel energie van! Natuurlijk, het is soms druk, maar ik zou niet alleen onderzoek willen doen - echt niet. Ik heb al eerder in Madrid lesgegeven, maar daar is het echt anders. Docenten worden daar bijvoorbeeld niet beoordeeld door studenten of examencommissies. Aan de ene kant hebben ze meer vrijheid, aan de andere kant

krijgen ze weinig steun van de universiteit. Hier in Nederland is alles veel beter geregeld. Ook als ik een grote groep studenten heb, probeer ik altijd persoonlijk contact te maken. Ik had eens een lerares kernfysica die je altijd een glimlach schonk en vroeg hoe het met je ging. Dat heb ik altijd erg gewaardeerd. Zelf probeer ik dat nu ook zo goed mogelijk te doen.’

‘Ik geef twee bachelorvakken, waarvan “Quantummechanica” samen met Auke Pieter Colijn. Daarnaast begeleid ik natuurlijk studenten met masterscripties en promoties. Ik vind het zelf wel een mooie balans met mijn eigen onderzoek aan ATLAS. Tot 2019 was ik directeur van de opleiding natuurkunde aan de UvA dus toen was ik wel echt flink druk met het onderwijs en stond mijn eigen onderzoek noodgedwongen op een lager pitje. Maar nu is het prima zo, al vond ik het wel een voordeel tijdens corona dat het geven van onderwijs via Zoom weer wat makkelijker te combineren was met reistijden. Dat is nu weer lastiger, maar we reizen natuurlijk wel nog steeds minder voor conferenties. Tegelijkertijd is echt, live, onderwijs geven natuurlijk wel veel leuker en zeker in werkcolleges kunnen de studenten elkaar zo veel beter

helpen, nog los van het sociale aspect. Voor de toekomst zou ik dan ook zeggen: sloop alle grote hoorcollegezalen en maak er werkcollegezalen van. Een groot-schalig hoorcollege kan prima digitaal plaatsvinden. Maar misschien moeten de docenten wat meer betrokken worden bij de werkcolleges, naast de student-assistenten. Op die manier heb je écht wat aan de interactie tussen docent en student. Waar ik zelf overigens erg goede herinneringen aan heb zijn de colleges van Jos Engelen.’



Panos Christakoglou

Welk vak? Quantumchromodynamica
(master)

Waar? Technische Universiteit Delft

Eigen onderzoek? ALICE



'Ja het ligt me echt, onderwijs geven. Ik weet eigenlijk niet waar dat vandaan komt. Mijn beide ouders, nu met pensioen, werkten bij de politie. Ik weet nog dat Stan Bentvelsen mij op een gegeven moment belde met de vraag of ik samen met hem een vak wilde geven in Delft, voor eerstejaars. 'Wanneer?' vroeg ik. Stan zei: 'volgende week?' Ik geef al sinds 2015 les maar dat was wel even snel aanpassen. Maar ik geniet er enorm van. Lesgeven is zo leuk. De leerlingen houden mij ook scherp, want soms denk je dat je iets heel goed weet maar als je het dan gaat proberen uit te leggen, merk je weer dat je bepaalde details eigenlijk helemaal niet weet. In de les probeer ik dan ook zo veel mogelijk echt contact te maken - in discussie te gaan samen, te leren van hun creativiteit. Ze in de ogen te kijken. Bij de bachelors liep ik eerst wat hard

van stapel; was ik druk aan het praten en schrijven op het bord maar toen ik omkeek staarden ze me allemaal doodstil aan. Nu probeer ik rustiger alles uit te leggen om te zorgen dat ze me ook echt volgen. In Griekenland is discussiëren met studenten wat gewoner. Hier vond ik ze eerst wel erg stil. Maar inmiddels weet ik goed hoe ik ze meer kan betrekken en actiever mee kan krijgen.'

**Keri Vos**

Welk vak? Quantummechanica
(bachelor)

Waar? Universiteit Maastricht

Eigen onderzoek? LHCb en Theorie

'Vorig jaar gaf ik voor het eerst het keuzevak "Quantummechanica" aan de Universiteit Maastricht. Daarnaast begeleid ik bachelor, master en honours (1e jaars) studenten. En sinds vorig jaar ben ik ook voor het eerst PhD-supervisor. De studenten in Maastricht zijn heel internationaal en mondig wat het lesgeven heel verfrissend maakt. Altijd leuk om vragen en aannames vanuit een ander oogpunt te bekijken. Wat voor jou heel logisch lijkt, en voor je vakgenoten ook, is soms best uitdagend om goed uit te leggen. In mijn colleges neem ik zoveel als mogelijk de actuele ontwikkelingen mee. Zo probeer ik de studenten enthousiast te maken voor de deeltjesfysica. Als supervisor zet ik mijn studenten daarom ook altijd aan het werk met onderwerpen die gerelateerd zijn aan mijn eigen onderzoek, zodat de

studenten echt weten wat er speelt en hoe het is om wetenschappelijk onderzoek te doen. Ik probeer de studenten vooral ook te leren denken op een bepaalde manier, dat ze bijvoorbeeld van tevoren een schatting maken in welke orde van grootte het antwoord moet komen te liggen. Dat is belangrijker dan precies met de juiste cijfertjes aan komen zetten. Zo bouw je intuïtie op en maak je ruimte voor creativiteit - dat wil ik ze graag meegeven.'



Steeds meer KM3NeT in de diepzee

Deze zomer is de neutrinotelescoop KM3NeT op de bodem van de Middellandse Zee bij Toulon en Sicilië flink verder uitgebreid. In totaal zijn er nu 32 lijnen met samen vele duizend sensoren geplaatst en actief.

'KM3NeT is nu groter dan onze oude ANTARES-detector in de Middellandse Zee. We zijn nu echt *in business*', zegt groepsleider Paul de Jong van KM3NeT bij Nikhef in Amsterdam. ANTARES werd afgelopen winter na zestien jaar trouwe dienst gesloten.

De grootste uitbreiding van KM3NeT vond in juni plaats in het Italiaanse deel van de detector, bij Sicilië op 3,5 kilometer diepte. Met een hijsschip werden in een campagne van twee weken elf nieuwe lijnen op de zeebodem geplaatst en aangesloten op het meetnetwerk.

Begin september kwamen daar nog eens twee lijnen bij. Het Italiaanse ARCA-segment heeft nu 21 lijnen, die in het donkere diepzeewater sporen van incidentele neutrino's kunnen vastleggen.

Neutrino's zijn vrijwel massalozere elementaire deeltjes waarover nog relatief

weinig bekend is omdat ze heel moeilijk te meten zijn. Ze ontstaan in enorme aantallen bij deeltjesprocessen in sterren en andere objecten in het heelal en vliegen als spookdeeltjes vrijwel ongehinderd door alle materie die ze tegenkomen.

KM3NeT pikt met fotobuizen de lichtsignalen op van geladen deeltjes die ontstaan als neutrino's toch een watermolecuul in het immense watervolume raken. De detector bestaat uit een woud van verticale lijnen vanaf de zeebodem, waarop per lijn steeds 18 bollen met 31 lichtsensoren zijn bevestigd.

Het instrument kan een kubieke kilometer aardedonker zeewater in de gaten houden. Uit de binnenkomst van de signalen in alle onderdelen samen zijn deeltjessporen te reconstrueren. De natuurkundigen van KM3NeT gebruiken die om zowel naar bronnen van neutrino's aan de sterrenhemel te speuren, als om de eigenschappen van neutrino's zelf te bestuderen.

De studie van de neutrino-eigenschappen gebeurt vooral met het Franse

deel van de detector, dat ORCA heet en bij Toulon op 2,5 kilometer diepte ligt. Afgelopen zomermaanden werden daaraan reparaties uitgevoerd en een verdere uitbreiding gerealiseerd naar nu 11 werkende lijnen.

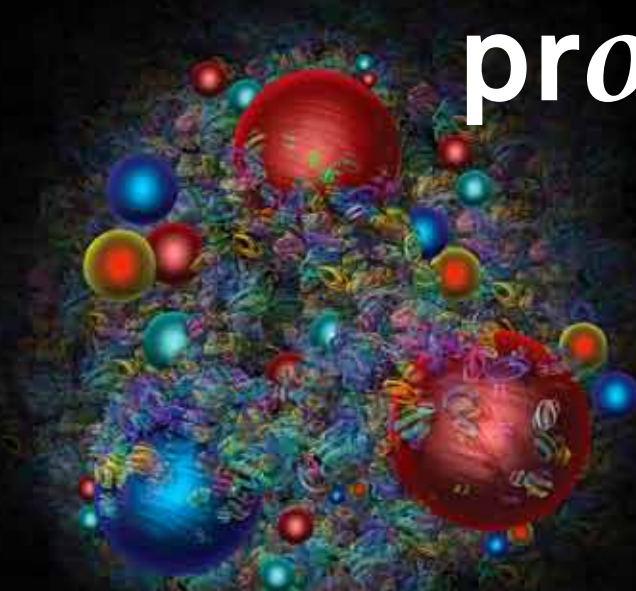
In een eerste fase zijn er plannen voor 230 lijnen in het Italiaanse deel en 115 in het Franse segment. Een deel van de sensorbollen en hun lijnen voor ORCA worden sinds enkele jaren gebouwd in een speciale KM3NeT-werkplaats van Nikhef op Amsterdam Science Park. Nederland financierde eerder de bouw van 20 lijnen en hun bollen. Daarvan zijn er nu vijftien voltooid en geleverd.

De werkplaats in Amsterdam zal op termijn ook gaan werken voor delen in de bouw, die door andere partners, Italië en Frankrijk, gefinancierd zijn zegt de Jong. Zoals veel wetenschappelijke projecten kampte ook KM3NeT het afgelopen jaar met een tekort aan onderdelen, vooral chips en elektronica. Daarin lijkt inmiddels wel weer wat schot te komen, zegt De Jong.

Foto's: KM3NeT, Stéphane Colonges



Een charmanter proton



Het proton is een ingewikkelder deeltje dan we op school leerden. Charmanter, zo blijkt uit een nieuwe studie van onder meer Nikhef-theoreticus Juan Rojo.

Wat is een proton, behalve de kern van een waterstofatoom? Schoolboeken over de hele wereld leggen uit: een proton is geen elementair deeltje, maar bestaat uit drie zogeheten quarks. Deze quarks, twee up- en een down-quark, worden door voortdurende uitwisseling van gluonen stevig bij elkaar gehouden. Het proton bevat ook strange-quarks, de zwaardere neef van het down-quark.

Deze zomer had het tijdschrift *Nature* echter nieuws. Het proton bestaat niet alleen uit de bekende up-, down- en strange-quarks, zo bleek uit een nieuwe studie, maar bevat ook een snuffje charm-quarks. Wat opmerkelijk is, omdat zulke charm-quarks in hun eentje zwaarder zijn dan het hele proton. Vreemd, maar in de wereld van het quantum kan zo iets.

Media pikten het opmerkelijke deeltjes-nieuws overal op. En terecht, denkt Juan Rojo, theoreticus bij Nikhef en hoogleraar aan de Vrije Universiteit Amsterdam. Hij is hoofdauteur van de nieuwe NNPDF-

protonstudie (*neural network parton distribution functions*) die hij met een internationaal team deed. 'Het proton is anders dan we dachten. Ik kan me goed voorstellen dat ook het brede publiek zo iets wel wil weten.'

Dat er in het proton meer gaande is dan een innig dansje van up- en down-quarks is al langer bekend. Als protonen in versnellers als de LHC op CERN hard op elkaar botsen, zijn er nu en dan duidelijk ook charm-quarks in het spel. Die ontstaan, is het idee, als de gluonen in het botsende proton zwaar op de proef worden gesteld en vervolgens in een charm-quark en zijn antideeltje overgaan.

Dat, zegt Rojo, is wat specialisten de extrinsieke charm-inhoud van het proton noemen. 'Dat je charm-quarks kunt maken met veel energie is op zich geen nieuws. Waar het ons om ging is de vraag of het proton in rust ook een vleugje intrinsieke charm zou kunnen bevatten. Net zo fundamenteel als de up- en de down-quarks.'

Dat blijkt inderdaad het geval, zo is met redelijke zekerheid de conclusie van Rojo en zijn collega's. Het gaat wel om een subtiel effect. Ongeveer een procent van de totale energie van het proton heeft de vorm van charm-quarks, schatten ze. De rest blijft klassiek up, down en strange.

'De schoolboeken hoeven dus niet meteen herschreven worden', zegt Rojo in alle eerlijkheid. 'Maar voor theoretici is er wel degelijk veel meer te zeggen over het proton dan we tot nog toe doen. Het oude beeld is niet fout, maar ook niet helemaal volledig, weten we nu.'

Het resultaat is sterker dan hij had durven hopen, zegt Rojo ook. 'We hadden het idee dat we met onze technieken wel iets zouden vinden. Maar statistisch blijkt het eigenlijk verrassend sterk.'

Voor de schatting werd de totale charm-aanwezigheid in protonbotsingen van honderden experimenten bekeken. Met een combinatie van kunstmatige intelligentie en theoretische berekeningen werd daarin het aandeel geschat van extrinsieke charm-quarks die echt door de botsing zelf worden veroorzaakt. Dat blijkt aantoonbaar minder dan het geheel. En dus, is de conclusie, moeten de protonen wel degelijk ook intrinsiek een snuffje charm-quarks bevatten.

Het gebruik van neurale netwerken is niet onomstreden, zegt Rojo. 'Maar het voordeel is dat je niet al begint met allerlei theoretische aannames over de aanwezigheid van charm-quarks in het proton, maar de data het werk laat doen. En de conclusie is stevig: zonder intrinsieke charm klopt het sommetje gewoon niet helemaal. Het proton heeft echt charm nodig.'

Wat zeker ook heeft geholpen bij de prominente publicatie in *Nature* is dat het deels door Nikhef gerunde LHCb-experiment op CERN uit een heel andere meting bijna tegelijk een schatting van het charm-quarktaandeel in het proton publiceerde. 'Geheel onafhankelijk vonden zij haast hetzelfde resultaat. Dat was echt een cadeautje, iets dat de laatste twijfels wegnam.'

Illustratie: CERN



De bestaande detectoren in de deeltjesfysica kunnen binnenkort niet meer alles wat er in hun binnenste botst tegelijk bijbenen. Het nieuwe FASTER-project voert het tempo op.

De detectoren op CERN waarmee onderzoekers de botsende protonen in de Large Hadron Collider bestuderen, zijn eigenlijk fototoestellen. Gecompileerd en huizenhoog, maar wel fototoestellen. Telkens wanneer twee plukjes protonen uit de versneller elkaar frontaal raken, drukt het systeem af en legt de sporen vast van wat er bij de botsing allemaal ontstaat.

Dat gebeurt in de bestaande detectoren als ATLAS of ALICE zo'n 40 miljoen keer per seconde, elke 25 nanoseconde opnieuw. Het levert een eindeloze reeks opnames op, waarin fysici vervolgens met computers patronen proberen te vinden.

Maar binnenkort gaat dat zeker mis, zegt Nikhef-onderzoeker Hella Snoek. In 2029 gaat de intensiteit van de LHC-bundels in Genève zoveel omhoog dat op detectorfoto's met de huidige technieken letterlijk te veel tegelijk zal gebeuren om ze daarna nog fatsoenlijk te kunnen uitpluizen.

Omgekeerd is er wel een heel goede reden om naar hogere intensiteiten in de versneller te gaan. Met heel veel botsingen kunnen ook zeldzame deeltjesprocessen worden waargenomen. Juist die kunnen belangrijk zijn voor het verbeteren van de deeltjestheorie, die op grote lijnen al heel lang verbluffend goed werkt maar die zeker nog niet compleet is.

Foto: Marco Kraan

Sneller met FASTER

Het is de reden dat Snoek vanuit Nikhef voortrekker is van een nieuw onderzoeksproject FASTER, waarin tien partners in Nederland deelnemen. Wetenschapsfinancier NWO honoreerde het plan deze zomer met een forse ENW-XL subsidie. Vanaf januari gaan tien promovendi en postdocs aan de slag.

FASTER, vertelt Snoek, voegt als het ware een nieuwe dimensie toe aan de bestaande detectietechnieken. Die extra dimensie is de tijd. Snoek: 'Om in de beeldspraak van het fototoestel te blijven: in plaats van foto's gaan de toekomstige detectoren films maken van de deeltjesbotsingen, die je vervolgens beeld voor beeld alsnog kunt analyseren.'

Gemikt wordt op frames van 20 picoseconden. Daarmee wordt elke botsing op ongeveer duizend achtereenvolgende beelden vastgelegd, in plaats van één totaalopname. In deze slow-motion opnames is het gemakkelijker om in de detector signalen te vinden die werkelijk met elkaar samenhangen, in plaats van toevallig bij elkaar in de buurt komen.

Ambitieuze doelen, wil Snoek wel toegeven. Alle onderdelen van een detector tot op 20 picoseconden synchroniseren en stabiel houden, is bijvoorbeeld al een reusachtige uitdaging.

Snoek: 'FASTER is een heel breed plan,

waarin we alles van de snellere sensoren en uitlees-chips tot de cruciale systeem-timing en algoritmes voor analyse moeten ontwikkelen. We gaan zelfs nadenken over quantumcomputing. En allemaal in samenhang, zodat niet de algoritme-bouwer last heeft van technische keuzes die de chip- of sensorontwerper maakte, of omgekeerd.'

Ook de termijn van vijf jaar, met de komst van de vijftigmaal intensere LHC-bundels in 2029 als deadline, is ambitieus. Bedenk bijvoorbeeld, zegt Snoek, dat het nu nog om research en development gaat. 'Maar uiteindelijk moet je wel toe naar vierkante meters vol nieuwe sensoren en chips. Dat wordt een hele uitdaging.' De nieuwe techniek, denkt ze, is bijvoorbeeld van groot belang voor de grote ATLAS-detector, waarbij ze vanuit Nikhef betrokken is.

De FASTER-samenwerking is nadrukkelijk een over Nederland verspreid project, waarbij deelnemers hun eigen expertises in hun eigen omgeving gebruiken. Van micro-elektronica in Amsterdam tot quantumrekenen in Maastricht. Projectleider Hella Snoek wordt de spin in het web. 'In de detectorwereld snapt inmiddels iedereen dat timing de volgende stap moet zijn. Het is een mooi gevoel middenin die ontwikkeling te staan.'



David Groep

Charles Timmermans

Pamela Ferrari

Auke Pieter Colijn

Juan Rojo

Vijf nieuwe HOGLERAREN

Afgelopen maanden zijn maar liefst vijf Nikhef-onderzoekers tot hoogleraar benoemd. In Maastricht, Nijmegen en Amsterdam gaan zij met leerstoelen in de deeltjes- en astro-deeltjesfysica en ICT-infrastructuur onderzoek

doen en onderwijs geven. David Groep is sinds 1 april bijzonder hoogleraar e-infrastructuur aan de Universiteit Maastricht. Charles Timmermans werd op 1 april hoogleraar experimentele en instrumentele astrodeeltjesfysica aan de Radboud Universiteit. Pamela Ferrari is per 1 mei hoogleraar hoge-energy

fysica aan de Radboud Universiteit. Auke Pieter Colijn werd op 1 september hoogleraar experimentele technieken in de astrodeeltjesfysica aan de Universiteit van Amsterdam. Juan Rojo is hoogleraar theoretische natuurkunde aan de Vrije Universiteit Amsterdam per 1 september.



Foto: CERN

Large Hadron Collider BREEKT RECORDS

De LHC, de grote versneller op CERN in Genève, breekt record na record. In juli werd de in omtrek 27 kilometer lange versneller na drie jaar onderhoud en verbeteringen weer in gebruik gesteld met een record-energie van 13,6 TeV. De versneller levert meer protonbotsingen dan ooit en zal bijna 4 jaar dag en nacht in bedrijf blijven in deze zogeheten Run 3. Eind september werd ook de meest stabiele protonbundel ooit geleverd, die 57,4 uur in stand bleef. Naar verwachting levert de versneller in Run 3 meer dan twintig keer zoveel protonbotsingen als in Run 1, waarmee in 2012 het higgsdeeltje werd aangetoond.

Eindelijk weer NIKHEF OPEN DAG

Na een onderbreking van twee jaar vanwege de coronapandemie opende Nikhef dit najaar weer enkele van zijn deuren tijdens de Amsterdam Science Park Open Dag 2022. Enkele deuren, omdat het Nikhef-gebouw momenteel een zeer uitgebreide renovatie ondergaat. Nikhef-onderzoekers beantwoordden vragen van bezoekers, leidden geïnteresseerden rond in de assemblage-hal van neutrino-telescoop KM3NeT, en demonstreerden de technieken achter het zwaartekrachtsgolvenonderzoek. Zeer in trek waren ook de Virtual-Reality brillen waarmee men in de diepzee naar KM3NeT kon duiken, of door het R&D-lab ETPATHfinder kon vliegen. Dit jaar op kleine schaal. Volgend jaar gaan de deuren van het gerenoveerde gebouw weer helemaal open.



Foto: Nikhef



Foto: Nikhef

NWO steunt ELEKTRON-PROJECT GRONINGEN

Wetenschapsfinancier NWO heeft een ENW-XL subsidie van 2,7 miljoen euro toegekend aan het eEDM-experiment aan de Rijksuniversiteit Groningen, samen met VU, UvA en Nikhef. eEDM zoekt naar eventuele asymmetrie in de lading van het elektron, die een afwijking van het Standaardmodel zou betekenen. Daartoe wordt met een laser gekeken naar de elektrische binding in trage moleculen. De onderdelen van de opstelling zijn ontwikkeld, nu komt het aan op het samenbouwen. eEDM wil de bestaande metingen een factor tien preciezer maken. Onderzoeksleider Steven Hoekstra kreeg dit voorjaar ook een Vici-beurs voor zijn werk.

Lydia Brenner wil in de blinde vlek van ATLAS kijken



Foto: Ivar Pel

schien wel heel interessante deeltjes gemaakt die we slecht of helemaal niet kennen. Nieuwe deeltjes, hopelijk, die te maken zouden kunnen hebben met donkere materie. Donkere materie is het spul dat bijna alle massa in het heelal vormt, maar waarvan we totaal niet weten wat het is. In FASER zullen we dat donkere spul niet vinden, maar misschien wel nieuwe krachtdeeltjes die die donkere materie beïnvloeden. Donkere fotonen noemen we die.

De afgelopen jaren bouwden we FASER met een heel klein team, voor een flink deel met onderdelen van eerdere experimenten. Recycling, omdat het beter is voor het milieu, en ook gewoon goedkoper en sneller dan nieuwbouw. Het enige echt nieuwe onderdeel is onze permanente magneet, die heel voorzichtig staaf voor staaf moest worden opgebouwd om te voorkomen dat hij zichzelf uit elkaar duwde.

Een klein experiment als FASER betekent veel improviseren en pionieren, maar ik vind dat heerlijk. Heel anders dan in een reusachtige collaboratie als ATLAS met duizenden mensen. De detector draait sinds deze zomer mee met de nieuwe *science run* van de LHC. We zien al tau-neutrino's, meer dan in alle eerdere experimenten bij elkaar. Nu is het wachten op meer signalen. Liefst iets dat we niet kennen natuurlijk. Daar droom je van als fysicus.'

'Als je op de plattegrond van de LHC-versneller van CERN kijkt zie je hoe de bundel grofweg in een cirkel loopt. Een meter of vijftig voorbij de ATLAS-detector is de bundelpijp al zover weggebogen dat er misschien nieuwe deeltjes te vinden zijn die rechtdoor zijn gevlogen. Daarom hebben we op die plek in een oude service-tunnel ons nieuwe experiment gebouwd. FASER heet het.

De ATLAS-detector in Genève is natuurlijk een fantastisch experiment dat protonbotsingen van bijna alle kanten kan bekijken. Maar precies rechtdoor is er een blinde vlek omdat daar de bundelpijp loopt. Dat is jammer want juist in die richting worden mis-



INHOUD

- | | | |
|---|---|--|
| 2 Meetcampagne
Trillen voor
Einstein Telescope | 12 Renovatie
Nikhef in het nieuw | 21 FASTER
Detectoren met
een extra dimensie |
| 3 Stan Bentvelsen
Raakvlakken
bieden kansen | 14 Onderwijs
Inspiratie putten
uit lesgeven | 23 De droom van
Lydia Brenner
over wat ATLAS
niet ziet |
| 4 Utrecht
Deeltjes en
zwaartekracht
vinden elkaar | 19 Diepzee
KM3NeT plaatst
reeks nieuwe lijnen | |
| 10 Patrick
Koppenburg
Boekhouder
van de deeltjes | 20 Proton
Onverwachte charme
van een kerndeeltje | |