

ROBBERT

UITGAVE VAN HET NEDERLANDS TIJDSCHRIFT VOOR NATUURKUNDE

HOERA!
DE NNV
BESTAAT...

...3.155.760.000 KEER DE
DUUR VAN 9 192 631 770
PERIODEN VAN DE STRALING
DIE CORRESPONDEERT MET
DE OVERGANG TUSSEN DE
TWEDE HYPERFIJNENERGIE-
NIVEAUS VAN DE GRONDTOE-
STAND VAN EEN CESIUM-133-
ATOOM IN RUST BIJ EEN
TEMPERATUUR
VAN 0 K!



RGvT



DROOMPLEKKEN
OM ONDERZOEK TE DOEN

"HET HELE UNIVERSUM SCHREEUWT ONS TOE"
INTERVIEW MET ROBBERT DIJKGRAAF

DE WEG VAN DE MINSTE WEERSTAND
DRIE MISVERSTANDEN BIJ HET SPORTEN

COLOFON

NEDERLANDS TIJDSCHRIFT VOOR NATUURKUNDE

Het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde is het maandelijkse tijdschrift van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging en richt zich op de Nederlandstalige natuurkundige gemeenschap. Niets van deze uitgave mag op welke wijze dan ook gekopieerd of vervaelvuldigd worden zonder nadrukkelijke toestemming van de auteur(s) en de redactie. De auteursrechten van de artikelen in dit tijdschrift liggen bij de desbetreffende auteur(s).

NNV-BUREAU

Lidmaatschappen en abonnementen

Nederlandse Natuurkundige Vereniging
Noortje de Graaf (directeur), Anja Al en
Debora van Galen Last (secretaresse)
Postbus 41882, 1009 DB Amsterdam
Telefoon: 020-59 222 11
E-mail: bureau@nnv.nl
Website: www.nnv.nl

EINDREDACTIE

Artikelen en advertenties

Esger Brunner/ Marieke de Boer
Postbus 41882, 1009 DB, Amsterdam
Telefoon: 020-59 222 50
E-mail: ntvn@ntvn.nl
Website: www.ntvn.nl
Twitter: NTVN_tweets

HOOFDREDACTIE

Anneke de Leeuw, Els de Wolf

REDACTIE

Lodewijk Arntzen (TN-HH), Joost Bakker (RU Nijmegen), Rob van den Berg, Claud Biemans (Frontlinie), Sébastien de Bone (TUD & CWI), Roeland Boot (Thorbecke VO en DIFFER), Steven Bos (UL), Kasper van Dam (Nikhef), Stijn Debackere (UL), Menno van Dijk (Shell), Eduard Driessen (IRAM), Aernout van Enter (RUG), Vincent Icke (UL), Jeroen Kalkman (TUD), Herman de Lang, Marco van Leeuwen (Nikhef en UU), Frans van Lunteren (UL), Willeke Mulder (UL), Hans Muller, Rasa Muller (Nikhef), Jacco de Pooter (VSL), Gerard van Rooij (UM, DIFFER, TU/e), Wilfried van Sark (UU), Klaas Schonenberg, Michiel Thijssen, Wim Verkley (KNMI), Hugo Matthieu Visser, Bobby Vos (University of Cambridge), Henk Vrielinck (U Gent), Robert Jan van Wijk (ASML), Anne-Marje Zwerver (TUD)

STUDENTENREDACTIE

Gianluca de Bruin (TUD), Rick ten Eikelder (Saxion), June Groothuizen (UvA), Eva Groenendijk (UU), Joost de Kleuver (RU), Romaine Kunst (UT), Frank Rensen (UL), Thomas Swarts (RUG), Iris Rommens (Fontys), Frank de Veld (TU/e), Luc Wigbout (HHS)

VORMGEVING

Studio Aschwin

DRUKWERK

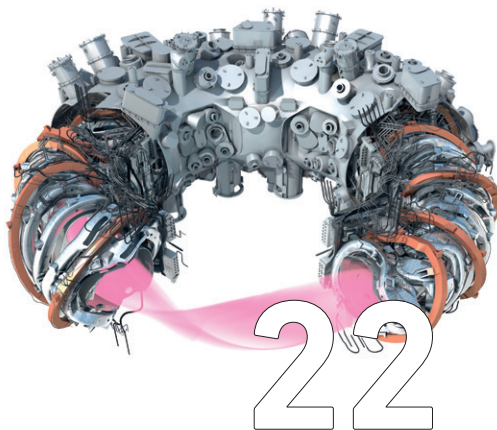
Wilco Meppel

OPLAGE

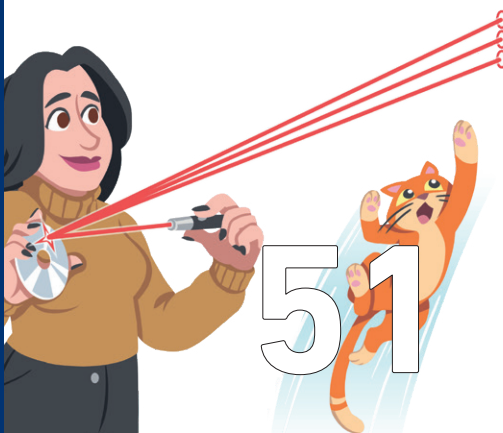
29.350, gedrukt op FSC-papier



Klimaatkluwens ontwarren



Een echt quantumland



Energie voor de toekomst

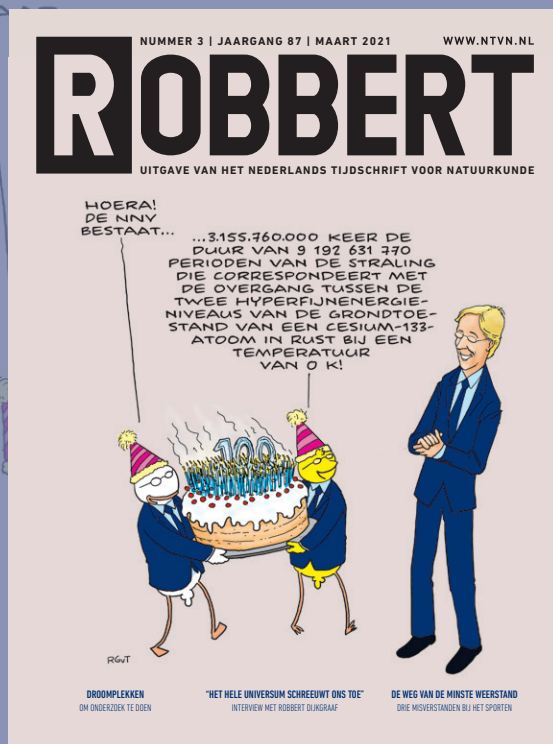


Do try this at home

INHOUD

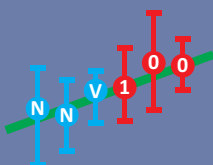
Natuurkunde is alles! REDACTIONEEL Diederik Jekel	05
Interview met Robbert Dijkgraaf DE NATUURKUNDIGE Martijn van Calmthout en Rasa Muller	06
Klimaatkluwens ontwarren Sonja Knols	10
Nederland jaagt op zwarte gaten Govert Schilling	14
Natuurkundig erfgoed Dirk van Delft	20
Energie voor de toekomst Roel van der Heijden	22
Werkplek om van te dromen Anouck Vrouwe	26
Lorentz op de Afsluitdijk Floris Tilanus	32
Do try this at home: de beker van Pythagoras Anne-Marije Zwerver	34
Grootse wetenschap Robbert Dijkgraaf	36
Honderd jaar natuurkunde Jeroen van Dongen en Frans van Lunteren	40
Een echt quantumland Martijn van Calmthout	46
Do try this at home: quantum Anne-Marije Zwerver	51
Natuurkundigen in het bedrijfsleven Jeroen Akkermans	52
Do try this at home: kaars doven Anne-Marije Zwerver	57

HOERA!
DE NNY
BESTAAT...



Illustratie: John Reid, Bastiaan Geleijnse en
Jean-Marc van Tol.

De weg van de minste weerstand Yannick Fritschy	58
“Laat je verbazen” Marieke de Boer en Sébastien de Bone	60
Do try this at home: de zuil van Volta Anne-Marije Zwerver	62
Agenda 2021	63



Dit jubileumnummer kwam tot stand door de inzet van de auteurs, gastredactieleden Robbert Dijkgraaf, Martijn van Calmthout, Jorg Brunner, Debora van Galen Last en onze redactie. Sébastien de Bone, Martijn van Calmthout, Kasper van Dam, Anneke de Leeuw, Rasa Muller, Els de Wolf en Anne-Marije Zwerver vormden de kernredactie van dit nummer. We willen iedereen hartelijk danken voor hun inzet.

Als NNV willen we in dit feestelijke jaar 2021 een erfenis nalaten in de vorm van een dichterlijke beschrijving van de deeltjes van het standaardmodel. We zijn hierbij geïnspireerd door het periodiek systeem in haiku: <https://vis.sciencemag.org/chemhaiku>. Dit bracht ons op het idee om een poëziewedstrijd te organiseren.

Deeltjes in dichtvorm vangen, dat is een mooie activiteit voor rond de feestdagen. Daarom bij deze de oproep om de inspiratie los te laten op één of meer van de 17 deeltjes van het standaardmodel: up, down, elektron neutrino, elektron, charm, strange, muon neutrino, muon, top, bottom, tau neutrino, tau, foton, W-boson, Z-boson, gluon, higgsdeeltje.

Dicht een deeltje!

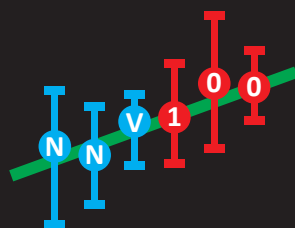
H e t s t a n d a a r d m o d e l i n p o e z i e

De winnende gedichten vormen gezamenlijk het standaardmodel in poëzie en zullen worden gepubliceerd zowel in het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde als online. Het wedstrijdreglement is te vinden via www.nnv.nl/Dichtwedstrijd, hier is ook het wedstrijdformulier te downloaden.

De dichtvorm is vrij, een gedicht bestaat uit maximaal 8 regels en de gebruikte taal is Nederlands. Wie dicht de mooiste omschrijving of beschrijving van een deeltje in haiku, elfje, limerick, rondeel, ollekebolleke,?

Indienen kan tot en met 2 april 2021, de dag waarop de NNV op de kop af 100 jaar bestaat. Daarna gaat de jury, waaronder ook Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft, aan de slag om de winnende gedichten te selecteren.

We zien uit naar de verschillende bijdragen!



NATUURKUNDE IS ALLES!

Voor u ligt de Robbert, de jubileumspecial van het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde. Een prachtig tijdschrift dat laat zien dat natuurkunde eigenlijk voor iedereen interessant is. Het is de meest diverse, diepgravende en spannende discipline die ik me voor kan stellen. Het beslaat alles: van de kleinste deeltjes waaruit u en ik bestaan, tot het hele universum met alle sterren en planeten die daarin hangen. Natuurkundigen bekijken processen die duizenden miljarden jaren duren zoals het verdampen van een zwart gat of metingen die minder dan een miljardste van een miljardste seconde duren, zoals de tijd die het kost voor een lichtdeeltje om door een waterstofmolecuul te vliegen.

De natuurkunde vind je terug in alle technologische vooruitgang die uw leven verrijkt en het kan ook helpen maatschappelijke vraagstukken op te lossen. Hoe kunnen we ons energie- en klimaatvraagstuk oplossen? Hoe zien computers van de toekomst eruit en hoe kunnen ze helpen betere medicijnen of materialen te maken? Maar ook hoe kunnen we natuurkundige technieken gebruiken om De Nachtwacht te restaureren?

Die diversiteit maakt dat ik me sinds mijn natuurkundestudie geen dag meer verveld heb. Achter al het mooie van de natuur zit namelijk een interessant natuurkundig verhaal. Iemand die deze schoonheid als geen ander over kan brengen is Robbert Dijkgraaf. Hij rondde zijn studie natuurkunde cum laude

af, studeerde enkele jaren aan de Gerrit Rietveld Academie en is de belichaming van de reikwijdte van natuurkunde. Hij is directeur van het prestigieuze Institute for Advanced Study te Princeton en legt op onnavolgbare wijze natuurkunde uit aan het brede publiek. Deze special is gemaakt voor het honderdjarige bestaan van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging (NNV). Als eerbetoon aan de breedheid van de natuurkunde en met Robbert Dijkgraaf als gastredacteur komt alles in de Robbert bij elkaar.

De NNV is de vakvereniging voor natuurkundigen en probeert het in Nederland zo fijn mogelijk te maken voor de beoefenaars van de natuurkunde. We leven steeds meer in een tijd waar feiten ondergesneeuwd raken door emoties. Daar maak ik me soms zorgen over. Waarheid begint met het vergaren van kennis. Die kennis verkrijgt u door goed om je heen te kijken en hypothesen op te stellen en dan te kijken of die ook echt kloppen. Dat lukt alleen als je leert hoe leuk het is om om je heen te kijken. Daarom ben ik zo blij met deze uitgave en met het feit dat u zich erin mag verliezen. Veel plezier!

Diederik

Diederik Jekel, voorzitter NNV

A portrait of Robbert Dijkgraaf, a middle-aged man with light brown hair and glasses, wearing a dark blue blazer over a light blue button-down shirt. He is standing with his arms crossed against a background of vertical wooden slats.

**“Het hele universum
schreeuwt ons toe:
begrijp mij”**

Interview met Robbert Dijkgraaf

Robbert Dijkgraaf, natuurkundige en gastredacteur van het jubileumnummer dat u voor zich heeft, over de wil om te begrijpen en de lol van het uitleggen. Over vertrouwen in de wetenschap en de kracht van de Nederlandse fysica.

Robbert Dijkgraaf zit in Princeton met zijn laptop voor zijn boekenkast en onwillekeurig gaat de blik gedurende het videogesprek vanuit Nederland ook even naar de titels daar. We zien een biografie van Hendrik Lorentz. Een geschiedenis van de atombom. Kunstboeken over Vincent van Gogh, Willem de Kooning en meer. Theoretisch natuurkundige Robbert Dijkgraaf (Ridderkerk, 1960) is misschien wel de bekendste natuurkundige van Nederland. Hij trad op televisie veelvuldig aan bij *De Wereld Draait Door* en was als president van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen pleitbezorger voor de wetenschap en uitlegger van natuurkunde tegelijk. Sinds 2012 is hij directeur van het legendarische Institute for Advanced Study in Princeton, ooit werkplek van Albert Einstein. Diens vleugel staat in Dijkgraafs dienstwoning.

U was al de bekendste professor van Nederland. En nu ook nog een eigen tijdschrift?

“Op verzoek en ter gelegenheid van het eeuwfeest van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging. Met veel genoegen dus. Ik zit weliswaar in Princeton, maar voel me nog steeds heel erg verwant met de Nederlandse natuurkunde nu en in het verleden. Het blad geeft de mogelijkheid om mijn enthousiasme voor mijn vak met zo veel mogelijk mensen te delen. Natuurkundige zijn is voor mij veel meer dan een baan, het is mijn leven. Het brengt me zo veel. Plezier. Uitdagingen. Avontuur. Dat gun ik iedereen.”

Wat is die verwantschap met de Nederlandse natuurkunde?

“Ik ben heel trots op de Nederlandse natuurkunde. Die heeft echt een eigen gezicht en karakter. Zeker mijn eigen vakgebied, de theoretische fysica met grote namen in de geschiedenis en nog steeds. In die geschiedenis wortel ik ook als fysicus, ik kan ongeveer de handen schudden van mensen als Hendrik Lorentz. Nederland is wat dat betreft een bijzonder land. Het is relatief klein waardoor natuurkundigen gemakkelijk samenwerken en een hechte gemeenschap vormen. Ik denk dat dat een van de redenen is dat we het internationaal gezien nog steeds buitengewoon goed doen.”

Een mooie traditie om uit voort te komen.

“Heel stimulerend. Toen ik in Utrecht natuurkunde ging studeren wist ik dat daar spannende dingen gebeurden. Dat er een jonge natuurkundige werkte die wereldnieuws was, de latere Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft. Dat was dus een mooie plek om te zijn. En het bijzondere aan wetenschap is dat iedereen zijn of haar wortels heeft maar vooral op zoek is naar een nieuwe bestemming. Dat was Utrecht in mijn tijd. En hier in Princeton vind ik het haast ontroerend om jonge mensen bijna als bedevaartgangers te zien aankomen op zoek naar gelijkgestemden.”

U woont en werkt nu in de Verenigde Staten. Hoe ziet u de Nederlandse natuurkunde?

“De Nederlandse natuurkunde kan zich internationaal uitstekend meten, beter dan je misschien zou verwachten voor een relatief klein land. Voor Nederland is de fysica een soort scrabblewoord met driemaal woordwaarde. Het is een vak dat grote vragen biedt en daarmee talent naar de wetenschap trekt. Het is een vak met veel technische toepassingen, cruciaal voor de moderne samenleving. En het laat zien dat samenwerking loont. Het maakt niet uit waar je zit, het vak verbindt.”

Hoezo doet Nederland het beter dan je zou verwachten?

“Ik maak me soms zorgen over de teruglopende middelen. Wereldwijd wordt er ruimhartig geïnvesteerd in bèta en techniek. In Nederland al een hele tijd niet, kijk de cijfers maar na. Het aandeel van de fysica neemt af. Terwijl de natuurkunde in het wetenschappelijke ecosysteem veel rollen te vervullen heeft: we winnen grote prijzen, bedienen de maatschappij, spreken tot de verbeelding. Dat blijft allemaal niet vanzelf goed gaan. Bovendien moeten we nog verder. We hebben in de honderd jaar dat de NNV bestaat prachtige natuurkunde gezien, maar in feite zijn we nog maar net begonnen.”

Er wordt anders vaak gezegd dat de vorige eeuw die van de natuurkunde was en dat het wel een beetje klaar is.

“Er zijn zeker drie redenen waarom dat niet klopt. Om te beginnen: welke wetenschap heeft de afgelopen jaren zo vaak de voorpagina's van alle kranten in de wereld gehaald? Higgsdeeltjes, zwaartekrachtgolven, een foto van een zwart gat. Taxichauffeurs in willekeurige steden begonnen er spontaan over. Vijf-sterrennieuws. Geen vak dat *over the hill* is, lijkt me. Daarnaast is de natuurkunde het vakgebied dat als geen ander weet wat het nog niet weet. We begrijpen vijf procent van het universum. De rest, donkere materie en donkere energie, schreeuwt uit: begrijp mij! We zijn dus echt niet klaar. Hooguit kan het lang duren voor we verder komen.”

En de derde reden?

“De derde reden is de belangrijkste. Tot voor kort bestudeerden we als natuurkundigen wat de natuur ons aandroeg. Je nam helium, koelde het extreem af en keek wat er gebeurde. Maar dat is aan het veranderen. We beginnen materialen en systemen te bouwen die wel toegestaan zijn door de natuur, maar daar om de een of andere reden niet vanzelf bestaan. Een eendimensionaal quantumtouwje. Ik noem maar wat. Allerlei gekke materialen en verschijnselen die ons dingen leren over de natuurwetten die we niet eerder hebben gezien. Slechts een verwaarloosbare fractie van alle mogelijke vormen van materie en energie zijn bekend. Er is dus, afgezien van donkere materie, een nog veel groter deel van de natuur



dat we in feite nog niet eens bekeken hebben. Ik denk dat de natuurkunde daarmee opnieuw een hoge vlucht krijgt in de eenentwintigste eeuw.”

Tegelijkertijd zal de buitenwereld misschien meer geïnteresseerd zijn in vaccins en geneesmiddelen, bijvoorbeeld tegen COVID-19?

“Dat is een belangrijk punt. Waar het uiteindelijk om draait is een betere wereld voor iedereen. Mensen realiseren zich vaak te weinig hoe moeilijk het is om dat voor elkaar te krijgen. We hebben totaal nieuwe energiebronnen of slimme materialen nodig. Juist in toegepaste wetenschap sta je soms opeens voor een hoge muur. Met de huidige kennis kom je er niet overheen. Daar wordt fundamentele kennis belangrijk. Haast letterlijk wroet dat in de fundamenteën. Waardoor je misschien wel onder de muur door kunt, in plaats van er overheen te klimmen. Toen Heike Kamerlingh Onnes in 1911 de supergeleiding ontdekte, was er helemaal geen opwinding. Nu is dat de basis voor de fMRI, die hersenscans mogelijk maakt. En grappig genoeg trouwens ook voor het deeltjesonderzoek met de grote versnellers van CERN in Genève.”

Maar 1911 is lang geleden, en wat is nu de kennis die we over een eeuw nodig zouden kunnen hebben?

“Daarover moeten we eerlijk zijn, dat weten we niet. Dus krijg je discussie over het geld. Waar moet je op inzetten? Ik denk dat veel toegepast onderzoek heel goed in de industrie kan plaatsvinden. Een overheid moet geen vaccin gaan maken. Publiek geld moet juist in de fundamenteën worden ingezet, daar gebeurt anders niks.”

Spreekt hier een toekomstige minister van Onderwijs?

“O, nee, absoluut niet. Ik ben ongeschikt voor de politiek.

Te naïef misschien. Maar vooral diep overtuigd van win-win-situaties. Kennis kan zich alleen maar vermeerderen, daar wint altijd iedereen bij. In de politiek is de een zijn winst de ander zijn verlies. Niet mijn wereld.”

U springt wel altijd op de bres voor de wetenschap.

“Maar dat kost me geen enkele moeite, omdat we een uniek product hebben: de waarheid. Daarmee kun je dus iets verkopen en er helemaal achter staan. Genuanceerd, eerlijk en zonder bijbedoelingen.”

Er zijn anders veel zorgen over het toenemende wantrouwen in de wetenschap.

“Misschien klinkt het gek, maar daar ben ik helemaal niet zo van overtuigd. Het is haast een cliché dat de wetenschap het aflegt tegen fakenews. Er heerst ook een vreemd idee over het verleden, toen alles beter zou zijn geweest. Een soort retro-futurisme. Ik denk dat de wetenschap vroeger de meeste mensen helemaal ontging. Nu is dat anders. Tegelijk is de wereld ingewikkelder. We staan als wetenschappers op een markt waar van alles tegelijk wordt geroepen. Prediken vanaf een kansel helpt dan niet meer. We moeten nieuwe wegen vinden om te communiceren. Dat is een uitdaging voor de huidige en komende generaties. Met één belangrijke voorsprong op al het andere: ons product is geweldig. Wat we zeggen klopt. En de resultaten zijn vaak beter dan verwacht.”

Eerlijk duurt het langst?

“Wetenschappelijke kennis, onze formules en inzichten hebben een universele waarde. Dat verandert niet. Maar hoe je het vertelt en uitdraagt wordt bepaald door de tijdgeest.”

Outreach lijkt u geweldig makkelijk af te gaan. Televisie, columns, boeken. Het kan niet op.

“Dat is ook een voortdurend zoeken. Ik heb vaak het gevoel gehad dat ik aan de rand van een grote leegte stond. Hoe moest ik het verhaal vertellen? Maar dan duwt iemand je eens in de leegte voor je en dan merk je dat je dat overleeft. Dan zwem je terug naar de kant en denkt: ok, dat kan ik dus. En de volgende keer spring je er zelf in. Het lijkt eigenlijk best wel op hoe je onderzoek doet. Kijken hoe ver je kunt gaan, jezelf uitdagen.”

En waarvoor precies?

“Lesgeven en vertellen is enorm leerzaam. Pas als ik gevraagd word iets uit te leggen, ga ik er serieus over nadenken. Hoe zit het ook weer precies? Welke dingen moet je combineren? Waarom wil ik dit eigenlijk weten? Je legt paden aan om mensen overheen te leiden die ook voor jou nieuw zijn. Daar leer je als wetenschapper zelf misschien wel het meeste van.”

U bent snaartheoreticus. Komt u überhaupt nog aan eigen onderzoek toe?

“Hier in Princeton valt dat in alle eerlijkheid niet mee. Ik heb drie grote liefdes in mijn werk: onderzoek, uitdragen en instituties. Die laatste is niet de spannendste van de drie, maar ik voel het als een gemeenschapsdienst om het wel te doen. In werkelijkheid faal ik in alle drie, maar ik probeer het falen zo gelijk mogelijk te verdelen.”

Is dat niet frustrerend?

“Je onderzoek kan frustrerend zijn. Zeker als je in oude aantekenboeken kijkt en ziet dat je dat nieuwe idee tien jaar geleden ook al hebt geprobeerd. Frustrerend is ook dat alle discussies over budgetten en tijdsdruk zich altijd maar weer herhalen. Of dat jonge onderzoekers niet dezelfde kansen krijgen als ik destijds, maar eindeloos moeten worstelen. We zijn als de Rode Koningin uit *Alice in Wonderland*: hard rennen om op je plaats te blijven.”

Nooit heimwee naar gewoon weer onderzoek doen?

“Zeker, ik denk daar wel over na. Maar ik verheerlijk mijn eigen verleden ook wel, merk ik. Soms denk je: was ik nog maar die promovendus toen ik me volledig in het onderzoek kon storten. Terwijl dat in het echt vermoedelijk een periode vol existentiële angst was, natuurlijk. Wat ik wel weet is dat de waardevolste dingen vaak het kwetsbaarst zijn. Praktische zaken gaan heel gemakkelijk voor. Ik probeer me wel steeds te bedenken: waar doe ik het voor? Wat is het grotere verhaal?”

En, wat is dat grotere verhaal dan?

“Iedere onderzoeker heeft een klein verhaal, een formule of experiment waar je van houdt, dat je interesseert. Werk waarin je je kunt verliezen. En dat je uiteindelijk naar een groot inzicht leidt. Mijn rol hier in Princeton is tegen mensen zeggen: het is oké om je in je werk te verliezen. Doe maar. Ik druk als directeur de ruis wel weg. Ik doe als het

ware de afwas, zodat de anderen snel verder kunnen.”

Is het niet zonde dat juist goede wetenschappers in het management worden gezogen?

“Ja, dat is doodzonde. Maar ik heb liever dat onderzoekers het zelf doen, dan niet-wetenschappers. Dat leidt tot enorme ongelukken. Dit systeem van zelfbestuur is een vloek voor sommigen van ons, maar het beste voor de wetenschap als geheel.”

Natuurkundigen denken vaak dat ze alles kunnen. Onderzoek? Kom maar op. Besturen? Natuurlijk.

“Ik denk niet dat we als fysici arroganter zijn dan anderen. Maar tegelijk is de natuurkunde wel iets heel centraals in de wetenschappen. Wat doet natuurkunde? We proberen de structuren in de natuur te begrijpen en te vangen in simpele wetten. Er is een diep geloof dat dat kan en het blijkt een succesvolle strategie. We hebben geleerd: de wereld heeft structuur en die kunnen we doorzien. In elk geval behoorlijk goed. Beter dan wie ook kon verwachten.”

U noemt het een geloof?

“In elk geval een vertrouwen dat het goed komt. Ik zie het als een Sinterklaassurprise. We maken de doos van de werkelijkheid open en vinden binnenin een mooi klein standaardmodel. Een simpele formule die alle deeltjes en krachten beschrijft. Stel je voor dat je dat standaardmodel openmaakt en het blijkt daarbinnen, o ironie, een zootje. Dat zou gruwelijk zijn.”

Waar ligt u als natuurkundige wakker van?

“Als je naar onze theorieën kijkt, zijn er twee puzzelstukjes die maar niet aan elkaar willen passen: quantumtheorie en de ruimtetijd van de algemene relativiteit. Tegelijk weten we dat het in de natuur wel werkt. Dat betekent vermoedelijk dat ruimte en tijd geen fundamentele begrippen zijn en quantumtheorie ook niet. Het zijn manifestaties van iets diepers. Maar wat dan? Dat is heel ingewikkeld en verwarrend. Het is alsof je tegen een wiskundige zegt dat er eigenlijk geen getallen bestaan.”

En uw angst is misschien dat we er als mensen niet uitkomen?

“Daar ben ik niet zo bang voor, maar wat ik wel weet is dat het zomaar ontzettend lang kan duren. Ik verwacht eerlijk gezegd niet dat een nieuw deeltje op CERN de oplossing is, of iets in een ander experiment. Het wachten is op iemand ergens op de wereld die het licht ziet. Die denkt: wat zijn we nou eigenlijk aan het doen? Een Einsteinachtig moment van inzicht. Dat kan morgen gebeuren, maar ook pas over honderd jaar.”

Maar het Einsteinmoment komt er?

“Natuurlijk. Er moet een alomvattende theorie zijn omdat we een alomvattend universum hebben. Op alle muren in het hele universum staat het: ik wil begrepen worden. Het zoeken is naar de taal waarmee we daarin slagen.”



Klimaatkluwens ontwarren

Klimaatverandering is een wereldwijde uitdaging. Hoeveel gaan de ijskappen smelten? En welke gevolgen heeft dat voor het wereldwijde weer? Complexe natuurkunde is cruciaal om deze vragen te kunnen beantwoorden.

Klimaatonderzoek staat bol van de natuurkundige fenomenen. Daarbij is het klimaat een ingewikkeld systeem. Veranderlijke processen in de atmosfeer beïnvloeden de temperatuur van het zeewater, wat gevolgen heeft voor het smelten van de ijskappen, waardoor de oceaanstromingen veranderen, die op hun beurt doorwerken in de bewegingen van de atmosfeer. En dat speelt op lengteschalen van centimeters tot duizenden kilometers, en op tijdschalen van uren tot honderden jaren. Klimaatonderzoek draait dan ook om het op een slimme manier aan elkaar knopen van natuurkundige theorieën, modellen en waarnemingen, vertelt Gerard van der Steenhoven, hoofd-directeur van het KNMI. “Klimaatmodellen zijn gebaseerd op weermodellen, die in de basis neerkomen op stromingsleer. Je gaat uit van vlakjes van bijvoorbeeld tien kilometer bij tien kilometer, met een hoogte die varieert tussen de tien en vijfhonderd meter. In dat volume bepaal je de temperatuur, druk en luchtvochtigheid. En dan ga je die blokjes onderling eigenschappen laten uitwisselen met behulp van vergelijkingen uit de stromingsleer. De belangrijkste vraag daarbij is: wat zijn de precieze beginvoorwaarden? Daarvoor heb je metingen nodig. In Nederland hebben we een heel hoogwaardig meetsysteem met weerstations, neerslagradars en weerballonnen. Die gegevens worden aangevuld met metingen vanuit schepen, satellieten en vliegtuigen. Aangezien die metingen niet keurig op de randen staan van de blokken uit je model, moet je slim interpoleren.

Daarbij komt de natuurkunde om de hoek kijken. Bijvoorbeeld om mistmodules te maken, waarin we onze kennis over de relatie tussen luchtkwaliteit, condensatiekernen en uitwisseling met wateroppervlakken combineren.”

Klimaatsscenario's en historische reeksen

Het KNMI huisvest de grootste klimaatonderzoeksafdeling van Nederland, vertelt Van der Steenhoven. “Synchroon met de IPCC-rapporten stellen we elke zeven jaar een nieuw klimaatscenario op, waarin we de nieuwste wereldwijde kennis vertalen naar de Nederlandse situatie. We geven aan hoe klimaatparameters zoals temperatuur en neerslag zich kunnen ontwikkelen onder verschillende omstandigheden. Bijvoorbeeld als we onze CO₂-uitstoot niet beteugelen of als we ons juist wel houden aan het Klimaatakkoord van Parijs.”

Een andere belangrijke taak is het beheren van historische klimaatreeksen, die tot honderden jaren teruggaan. “Om zinnige voorspellingen te kunnen doen, heb je consistente klimaatreeksen nodig. Maar de bestaande gegevens kun je niet zomaar een-op-een met elkaar vergelijken. Er bestaan verschillen in oplossend vermogen, ze zijn niet altijd op dezelfde manier gemeten en er is ook niet altijd hetzelfde gemeten. Onze onderzoekers corrigeren voor onregelmatigheden, zoals wisselingen van meetinstrumenten of meetlocaties.” Daarnaast proberen KNMI-onderzoekers weermodellen fysisch beter te maken. Daarbij spelen satellietwaarnemingen een belangrijke rol. “Een van de mooiste aardobservatie-instrumenten van dit moment is TROPOMI, ontwikkeld door KNMI, SRON, TU Delft, TU/e, Airbus en TNO. Dit instrument brengt elke 24 uur voor elke plaats op aarde de kolomdichtheid in beeld van de belangrijkste sporengassen, die bijdragen aan het broeikas effect. Zo zagen we tijdens de lockdown in China dat de uitstoot van stikstofdioxide daar fors afnam.”

Ijzige fysica

Vanwege de omvang en complexiteit van weer- en klimaatmodellen is het klimaatonderzoek geen competitieve, maar juist een coöperatieve tak van wetenschap. Zo hielp de groep van Michiel van den Broeke, hoogleraar Polaire Meteorologie aan de Universiteit Utrecht, het regionale weermodel van het KNMI geschikt te maken voor gebruik boven de ijskappen. “Wij zijn in de jaren negentig van de vorige eeuw begonnen met meten hoeveel zonlicht er op het ijs van de Groenlandse ijskap viel en hoeveel er gereflecteerd werd, om te bepalen hoeveel warmte er werd opgenomen,” vertelt Van den Broeke. “Maar die reflectie is bijvoorbeeld niet overal hetzelfde. Daarnaast is ijs allesbehalve passief. Het beweegt en vervormt op een niet-lineaire manier onder invloed van de zwaartekracht.” Ook hier spelen lengte- en tijdschalen een belangrijke rol, vertelt hij. “Smelt en aangroei van de ijskappen zijn het gevolg van een samenspel tussen relatief snelle effecten in de atmosfeer, oceaanstromingen op de schaal van jaren tot tientallen jaren en de vervorming van het ijs, waarbij je het over honderden jaren hebt.” De onderzoekers gebruiken verschillende methoden om deze effecten te bestuderen. “We doen onder andere metingen aan snelle turbulente verschijnselen in de atmosfeer die warmte en vocht transporteren. Daarnaast hebben we ook al dertig jaar weerstations op de Groenlandse ijskap staan die daar onafgebroken onder andere wind, temperatuur en hoogte van het ijs registreren. Om te bepalen hoe drijvende gletsjers van onderaf smelten, worden torpedoachtige vaartuigen gebruikt, maar ook zeehonden voorzien van sensoren. Vanuit de ruimte registreren we de dikte van de ijslaag met remotesensingtechnieken en door de zwaartekracht van de aarde te meten, kunnen we berekenen of de ijskap massa wint of verliest. Het einddoel is een klimaatmodel dat heel precies kan voorspellen waar, wanneer en met welke snelheid de ijskap gaat smelten.”



Installatie van een nieuw meetinstrument op de ijskap in Zuid-Groenland. Dit nieuwe instrument meet met grote nauwkeurigheid de invloed van luchttemperatuur op het smelten van het ijs. Foto: Maurice van Tiggelen - UU / IMAU.

Inzicht in oceaanstromingen

Het smeltende landijs veroorzaakt niet alleen een stijging van de zeespiegel, het ijskoude water beïnvloedt ook de stroming van de oceaan. Aan het NIOZ bestudeert Femke de Jong onder andere waar en hoeveel smeltwater vanaf de Groenlandse ijskap in de diepe oceaan terecht komt. Dit zoete smeltwater, dat veel lichter is dan zeewater, kan de verticale samenhang verstoren tussen de noordwaartse stroming van zout, warm water in de toplaag van de Atlantische Oceaan en het naar het zuiden stromende koude water in de diepzee. “De hoeveelheid water die naar het noorden stroomt en de warmte die deze transporteert varieert nu al van dag tot dag. Wij willen weten waardoor deze variaties gedreven worden en hoe een toeneemende hoeveelheid smeltwater deze

beïnvloedt,” zegt De Jong. “Hiervoor meten we op verschillende diepten en op verschillende locaties de stroomsnelheid, de temperatuur en het zoutgehalte van het water. We gebruiken verankerde instrumenten die twee jaar lang in het water blijven en elk uur een meting doen. Daarnaast verrichten we tijdens vaarexpedities zeer accurate en gedetailleerde metingen vanaf het schip voor context en kalibratie.”

En dan begint het grote puzzelen. “De data vanuit de verankeringen zijn op het moment dat we ze ophalen twee jaar oud. Vervolgens zijn we nog een half jaar bezig met kalibraties en het verwerken van de data. Omdat we kleine signalen meten die we naar enorme volumes extrapoleren, moeten we heel nauwkeurig te werk gaan. Dus halen we er onafhankelijke data bij, van satellietmetingen, van

collega-expedities en van ARGO-boeien (een drijvend netwerk van kleine robotsondes). Daarmee proberen we te verklaren wat we gemeten hebben. Wat is er gebeurd en wat was de context?” Dat vereist wel wat doorzettingsvermogen, zegt De Jong. “Je hebt hier niet te maken met gecontroleerde experimenten. Je moet juist uit je data zien te destilleren wat er is gebeurd. Een aantal fysische principes is natuurlijk wel constant. Als je weet dat er meer warmte uit de atmosfeer is gehaald, maar je ziet de watertemperatuur dalen, dan moet dat wel door warmtetransport komen.”

Motivatatie uit maatschappelijk belang

Klimaatonderzoek is een prachtige combinatie van metingen met geavanceerde meettechnieken en



Twee Zuid-Afrikaanse maisboeren controleren de weersverwachting op hun mobiele telefoon. Door middel van sms-diensten kan gelocaliseerde weersinformatie ook boeren bereiken die geen smartphone hebben. Foto: Agricultural Research Council South Africa.

geavanceerde natuurkunde, die we nodig hebben om een van de grootste maatschappelijke problemen van deze tijd op te lossen, zeggen de drie wetenschappers eensgezind. En ook buiten de wetenschap komt klimaatkennis de maatschappij ten goede, bewijst Fiona van der Burgt. Als consultant bij Weather Impact maakt ze weersverwachtingen voor de agrosector, en dan met name voor kleinschalige boeren in tropische gebieden. “De Afrikaanse landbouw heeft het grootste potentieel om de groeiende wereldbevolking van voedsel te voorzien. Tachtig procent van de variaties in landbouwopbrengsten wordt veroorzaakt door het weer. Door boeren te voorzien van betrouwbare weers- en klimaatvoorspellingen, kunnen zij zaaien op een moment waarbij optimaal gebruik wordt gemaakt van het regenseizoen.”

Daarbij komt een hoop pragmatisme kijken, vertelt ze. Want waar je in Nederland gewoon een weerapp zou bouwen, hebben veel mensen daar geen smartphone, zijn ze nergens geregistreerd en spreken ze geen Engels. “In de praktijk komt dat nu vaak neer op een soort buienradar-per-sms-systeem. Maar dan niet voor de komende uren, maar tot een week vooruit. En daarnaast werken we voor de wat langere termijn aan seizoensverwachtingen. Dus of we een droger of natter regenseizoen verwachten dan normaal, wat weer sterk samenhangt met fenomenen in de oceaan, zoals El Niño.” Van der Burgt is vooral bezig met de toepassingen van klimaatonderzoek en het vertalen van de resultaten naar bruikbare informatie en oplossingen voor eindgebruikers. “Welke nauwkeurigheid heeft een eindgebruiker nodig? En is

dat fysisch überhaupt mogelijk? Dat is een heel interessant speelveld.” Van der Steenhoven noemt communicatie een belangrijk onderdeel van het werk van klimaatonderzoekers. “Sinds een jaar of tien leggen we overal uit hoe het klimaat verandert, wat daar de gevolgen van zijn en wat we eraan kunnen doen. Gedragsverandering begint met bewustwording. Maar dat vereist onderhoud. Dus moeten we dit verhaal blijven vertellen.” Van der Burgt heeft daarbij nog een boodschap: “Het klimaatstelsel is te complex om conclusies over te trekken op basis van een berekening op de achterkant van een bierviltje. We hebben geen natuurkundig laboratorium om op planetaire schaal klimaatexperimenten te doen. Erken de expertise van de wetenschappers die zich aan het front van de wetenschap bezighouden met deze complexe materie.”

Nederland jaagt op zwarte gaten

Bouw van prototype Einstein Telescoop

In Maastricht wordt gewerkt aan het prototype van de Einstein Telescoop – een toekomstige detector voor zwaartekrachtgolven. Daarmee komen wetenschappers minieme rimpelingen op het spoor in de ruimtetijd, veroorzaakt door botsende zwarte gaten en andere explosieve verschijnselen in het heelal. Nederlandse natuurkundigen en astronomen blazen nu al een flinke partij mee in het onderzoek naar zwarte gaten; dankzij de Einstein Telescoop wordt die rol alleen maar groter.

Je zou maar natuurkunde gekregen hebben van meneer Koekoek. Zo'n docent die niet alleen bezig is met onbenulige zaken als hoe een knikker van een plankje rolt, maar die je ogen opent

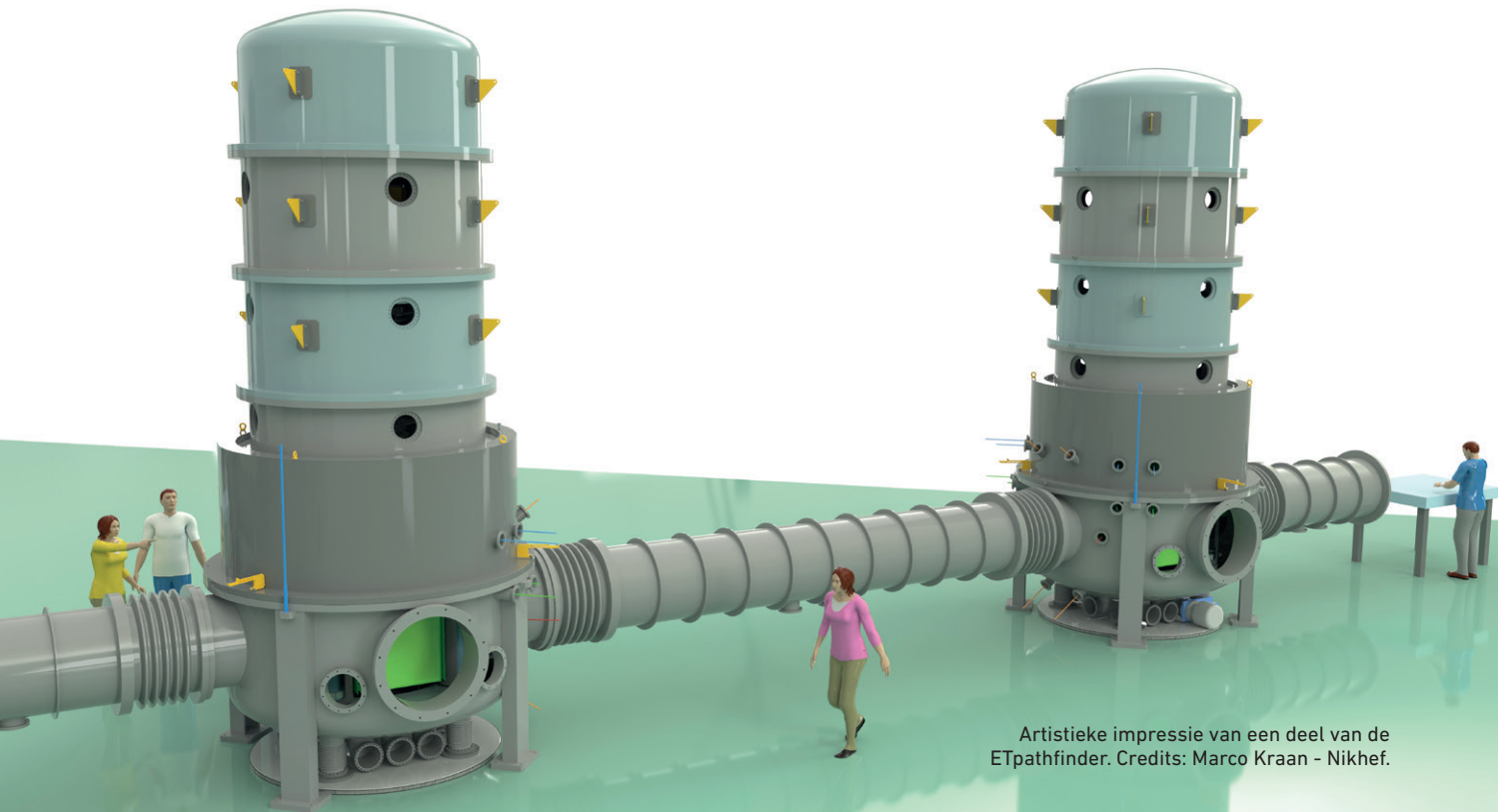
voor de grotere verbanden – de dingen die er echt toe doen. Julia Schuring kan erover meepraten. “Het was een verademing toen hij het stokje overnam van een andere docent,” zegt ze. “Het was meteen duidelijk dat natuurkunde echt in zijn bloed zit.” Op het Gerrit van der Veen College in Amsterdam raakte ze zo geïnspireerd door de lessen van Koekoek dat ze zelf natuur- en sterrenkunde ging studeren in Amsterdam. “Hij liet ons zien wat natuurkunde écht was.”

Goed natuurkundeonderwijs – het is nog steeds het stokpaardje van Gideon Koekoek, een van de ambassadeurs van honderd jaar NNV. Nadat hij aan de Vrije Universiteit Amsterdam promoveerde in de theoretische natuurkunde op onderzoek aan zwaartekrachtgolven, behaalde hij een eerstegraads onderwijsbevoegdheid, en gaf hij – naast universitaire collegereksen – vijf jaar lang natuurkundeles op de middelbare school. Maar ja, toen kwam dat telefoontje van zijn promotor Jo van den Brand, of hij niet mee wilde werken aan de ontwikkeling van een gloednieuw curriculum fundamentele natuurkunde aan de Universiteit Maastricht. Belangrijkste focus: zwaartekrachtgolven en zwarte gaten. “Ik viel met mijn neus in de boter.”

Sinds augustus 2017 werkt Koekoek in Maastricht als universitair docent; inmiddels maakt hij deel uit van de nieuwe onderzoeksgroep Gravitational Waves and Fundamental Physics (GWFP). Zijn droom is dat Nederland straks de Europese Einstein Telescoop ‘binnenhaalt’. Dat supergevoelige instrument voor het meten van rimpelingen in de ruimtetijd zou in de buurt van het drielandenpunt gebouwd kunnen worden. “Hier in Maastricht wordt nu aan het prototype gewerkt,” zegt Koekoek, “dus Nederland loopt sowieso voorop.”

Ondergrondse telescoop

De Einstein Telescoop (ET) is geen gewone sterrenkijker. De maan en de planeten kun je er niet mee zien. Je kunt hem nergens op richten en er hangt ook geen camera achter. In plaats daarvan is het een kolossale, ondergrondse detector, waarin krachtige laserstralen heen en weer gekaatst worden tussen trillingsvrij opgehangen spiegels aan de uiteinden van kilometerslange tunnels. Een passerende zwaartekrachtgolf veroorzaakt minieme variaties in de afstanden tussen de spiegels en die kom je met behulp van de gevoelige interferometers van de ET op het spoor. De Duitse fysicus Stefan Hild, sinds augustus 2019 leider van de kersverse



Artistieke impressie van een deel van de ETpathfinder. Credits: Marco Kraan - Nikhef.

Maastrichtse GWFP-groep, begint te glimpen als hij het over de Einstein Telescoop heeft. Zwaartekrachtgolven worden veroorzaakt door botsende zwarte gaten, en met de huidige generatie detectoren (LIGO in de Verenigde Staten en Virgo in Italië) zijn daar sinds 2015 enkele tientallen voorbeelden van gevonden. “Maar ET is zo gevoelig dat we straks alle versmeltende zwarte gaten in het hele universum kunnen detecteren”, vertelt Hild enthousiast. “Dat zijn er tussen de honderdduizend en één miljoen per jaar.”

Daarnaast ‘ziet’ ET ook botsende neutronensterren – extreem compacte restanten van supernova-explosies. Bij die neutronensterbotsingen ontstaan zware, zeldzame elementen zoals goud en platina. Al die metingen leveren informatie op over de meest bizarre objecten en verschijnselen in de kosmos en ze wijzen hopelijk de weg naar een overkoepelende beschrijving van Einsteins relativiteitstheorie en de quantumfysica. Natuurkundigen zijn al lang op zoek naar zo’n quantumzwaartekrachttheorie. Hild: “Als dat lukt, weten we ook wat zich binnen in een zwart gat afspeelt.”

In 2022 brengt het European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI) advies uit over de Einstein

Telescoop. Hild hoopt natuurlijk op een zeer sterke aanbeveling, maar zelfs dan zal het nog jaren duren voordat de bouw van het twee miljard euro kostende instrument van start gaat. Maar aan de rand van Maastricht, tegenover het MECC conferentiecentrum, kan hij al wel de kolossale hal laten zien waarin binnenkort de ETpathfinder gaat verrijzen – het kleinere prototype van de Einstein Telescoop, bedoeld om allerlei nieuwe technologieën uit te testen.

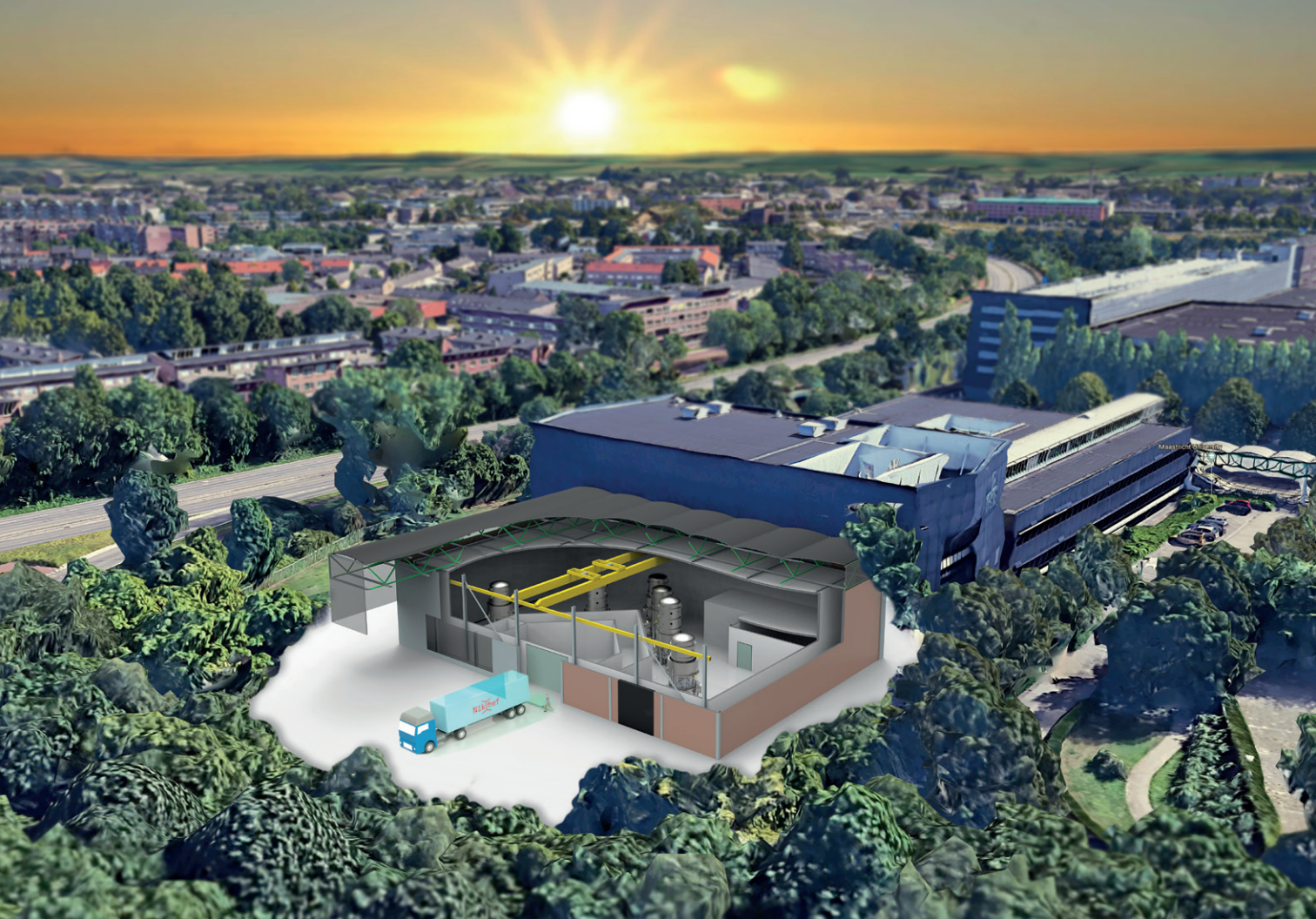
“Er is nog niet veel te zien, maar er is al wel veel gebeurd”, vertelt Hild. In de vorige eeuw maakte de transporthal deel uit van de drukkerij van dagblad *De Limburger*. Inmiddels ligt er een nieuwe, vijftig centimeter dikke vloer, die volledig geïsoleerd is van de omgeving, en die rust op 170 ‘heipalen’ van dertig centimeter in diameter en zes meter lang. Allemaal om straks ongewenste omgevingstrillingen buiten de deur te houden. Dit voorjaar wordt er een cleanroom van bijna duizend vierkante meter gebouwd. Komende zomer volgen de optische banken en de vacuümtanks, en in de loop van 2022 moeten de lasers, spiegels en interferometers geïnstalleerd zijn.

Nederlandse pionier

Het idee voor ETpathfinder komt uit

de koker van natuurkundigen die verbonden zijn aan Nikhef, het Nationaal instituut voor subatomaire fysica in Amsterdam. Nikhef coördineert het Nederlandse onderzoek aan zwaartekrachtgolven en is een belangrijke partner in de Europese Virgo-detector – Van den Brand was jarenlang de officiële woordvoerder van Virgo. “Alert zijn op nieuwe ontwikkelingen, je prioriteiten bijstellen en keuzes durven maken – daar is Nederland goed in”, zegt Hild. Dankzij die slagkracht speelt ons land nu zo’n belangrijke rol op het gebied van zwaartekrachtgolven en zwarte gaten.

Die rol begon trouwens al meer dan honderd jaar geleden. In bijna elk boek over zwarte gaten valt te lezen hoe de Duitse natuurkundige Karl Schwarzschild in 1916 liet zien dat het bestaan van zwarte gaten binnen de formules van Albert Einsteins relativiteitstheorie mogelijk is. Maar bijna niemand weet dat een Nederlander vrijwel tegelijk tot diezelfde conclusie kwam. Johannes Droste, een dertigjarige promovendus van de Leidse natuurkundige Hendrik Lorentz, publiceerde zijn resultaten echter pas in 1917 en werd er nooit beroemd mee. Een schrale troost is dat Einstein de afleiding van Droste veel eleganter vond dan die van Schwarzschild.



Artistieke impressie van de locatie van de ETpathfinder. Credits: Marco Kraan - Nikhef.

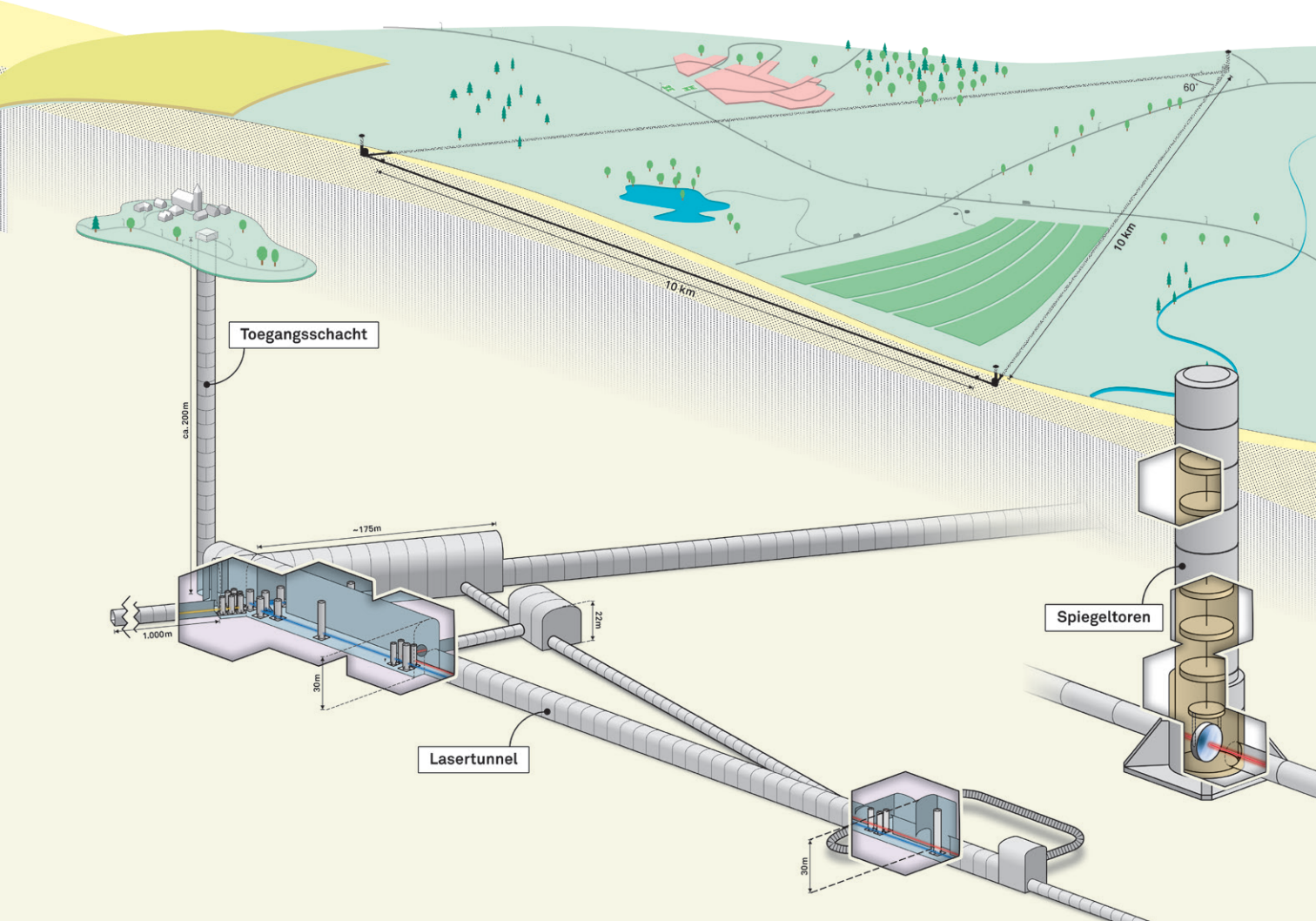
Dat zwarte gaten ook echt bestáán – daar werd nog ruim een halve eeuw aan getwijfeld. Een onzichtbaar object in het heelal met zó'n sterk zwaartekrachtveld en zó'n onvoorstelbare bijbehorende kromming van de ruimtetijd dat er zelfs geen licht uit kan ontsnappen, dat was voor veel wetenschappers een stap te ver, vooral ook omdat er binnen in zo'n zwart gat sprake leek te zijn van een dimensieloos punt met een oneindig hoge dichtheid – een zogeheten singulariteit. Pas in 1971 (toen de Nederlandse Natuurkundige Vereniging haar vijftigjarig bestaan vierde) werd ontdekt dat de kosmische röntgenbron Cygnus X-1 een klein, zwaar, donker object herbergt dat bijna vijftien keer zo zwaar is als de zon. Dat kon alleen maar een zwart gat zijn.

Zwarte gaten in soorten en maten

Tegenwoordig zijn er veel meer van die

'stellaire' zwarte gaten ontdekt en weten we dat het de overblijfselen zijn van grote, zware sterren die aan het eind van hun leven exploderen als supernova. "Op die manier kunnen zwarte gaten ontstaan die maximaal zo'n 45 keer zo zwaar zijn als de zon", vertelt de Amsterdamse sterrenkundige Selma de Mink, sinds kort werkzaam op het Max Planck Instituut voor Astrofysica in München. Daarnaast blijkt bijna elk sterrenstelsel in het heelal – inclusief ons eigen Melkwegstelsel – een superzwaar zwart gat in zijn kern te herbergen, dat miljoenen of zelfs miljarden malen zo zwaar is als de zon. Al die zwarte gaten zijn niet direct waarneembaar met een telescoop; astronomen leiden hun bestaan af uit de zwaartekrachtinvloed die ze uitoefenen op hun omgeving of uit de röntgenstraling van heet gas dat met hoge snelheid rond het zwarte gat zwiert, in een afgeplatte 'accretieschijf'. Maar wat je niet

kunt zien, kun je soms wel 'voelen'. Als twee zwarte gaten om elkaar heen draaien, elkaar steeds dichterbij komen, en uiteindelijk met elkaar botsen en versmelten, komt daar zo veel energie bij vrij dat de ruimtetijd zélf begint te trillen, alsof je een steen in een vijver gooit. Die zwaartekrachtgolven, in 1916 al voorspeld door Einstein, werden in september 2015 voor het eerst gemeten, met de twee Amerikaanse LIGO-detectoren (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory). "Dat was echt dé ontdekking van de afgelopen jaren", zegt De Mink. De initiatiefnemers van LIGO (Rainer Weiss, Kip Thorne en Barry Barish) kregen er in 2017 de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor. Samen met de Europese Virgo-detector kwam LIGO sindsdien nog een paar dozijn van die zwartegatenbotsingen op het spoor. Uit de gemeten zwaartekrachtgolven zijn allerlei details af te leiden over de



Schematische weergave van de Einstein Telescoop. Illustratie Nikhef - Thijs Balder.

betreffende botsing. De allerheftigste (tot nu toe!) was de versmelting van twee zwarte gaten van maar liefst 66 en 85 zonsmassa's, op vele miljarden lichtjaren afstand.

Zulke zwaargewichten kunnen niet in supernova-explosies geproduceerd worden, dus mogelijk zijn ze zelf al het resultaat van eerdere versmeltingen. En als er inderdaad sprake is van zo'n 'hiërarchisch botsingsscenario', dan zijn de superzware zwarte gaten in de kernen van sterrenstelsels misschien ook wel op die manier gegroeid. "We weten er nog maar weinig van", zegt De Mink, "maar dit onderzoek aan zwarte gaten biedt wel een compleet nieuwe manier om iets te leren over de levensloop van zware sterren" – haar expertise.

Groter en gevoeliger

Stereolutie bestuderen, meer te weten komen over de ontstaansgeschiede-

nis van zwarte gaten, de voorspellingen van Einsteins relativiteitstheorie checken – met de eerste detectie van zwaartekrachtgolven komt het allemaal binnen handbereik. Geen wonder dat Europese wetenschappers staan te popelen om een nog veel grotere en gevoeliger detector te bouwen, waarmee ook veel zwakkere zwaartekrachtgolven te meten zijn: de Einstein Telescoop.

De bestaande detectoren – LIGO en Virgo, maar ook Kagra in Japan – hebben elk twee 'armen' die haaks op elkaar staan, met lengtes van drie of vier kilometer en met spiegels aan de uiteinden. In beide armen kaatst laserlicht eerst honderden keren op en neer, voordat de twee bundels in een interferometer bijeengebracht worden. Als de spiegellafstanden exact gelijk zijn, doven de twee bundels elkaar uit, maar als er een zwaartekrachtgolf passeert, variëren de armlengtes heel

snel en ziet de interferometer het licht heel eventjes afwisselend uitdoven en versterkt worden.

De Einstein Telescoop krijgt niet twee, maar drie armen, elk tien kilometer lang, in de vorm van een gelijkzijdige driehoek. Op elk hoekpunt komen twee laserinstallaties en interferometers te staan, gevoelig voor verschillende zwaartekrachtgolf frequenties. En om storende signalen uit de omgeving zo veel mogelijk te dempen, wordt het hele instrument op pakweg honderd meter diepte gebouwd, in lange tunnels.

Nieuwe technologieën

De ETpathfinder – met een prijskaartje van zo'n vijftien miljoen euro – komt gewoon bovengronds te staan en krijgt twee armen van twintig meter lang. Te kort voor het daadwerkelijk registreren van zwaartekrachtgolven, maar dat is ook niet het doel. Bij de bouw van de

ZWART GAT IN BEELD



De eerste 'foto' van een zwart gat. Credits: EHT Collaboration.

Naast de toekomstige Einstein Telescoop is ook de Event Horizon Telescope (EHT) een belangrijk internationaal project voor het onderzoek aan zwarte gaten, eveneens met een prominente Nederlandse inbreng. Twee jaar geleden haalde de EHT overal ter wereld de voorpagina van de krant met de allereerste 'foto' van een superzwaar zwart gat, in de kern van het sterrenstelsel M87, op 55 miljoen lichtjaar afstand van de aarde.

De Event Horizon Telescoop is een wereldwijd netwerk van radioschotels die straling waarnemen op millimetergolflengten. Een van de initiatiefnemers is Heino Falcke van de Nijmeegse Radboud Universiteit, die in 2008 een beurs van 3,5 miljoen euro ontving van de European Research Council. Falcke is momenteel voorzitter van de wetenschappelijke raad van de EHT; radiosterrenkundige Huib Jan van Langevelde van het Nederlands Instituut voor Radioastronomie ASTRON is sinds de zomer van 2020 algemeen directeur.

"Die foto was het eerste echte bewijs voor het bestaan van een event horizon," zegt theoretisch astrofysicus Jordy Davelaar, doelend op de 'rand' van een zwart gat van waarachter geen licht meer kan ontsnappen. Davelaar, bekend geworden door zijn spectaculaire virtualreality-animaties van zwarte gaten, promoveerde afgelopen najaar bij Falcke en heeft sinds kort een postdoc-aanstelling op Columbia University in New York. "Over de ware aard van zwarte gaten is helaas nog steeds veel onduidelijk," zegt hij. "De heilige graal is een waarneming die zicht biedt op de manier waarop de relativiteitstheorie en de quantummechanica met elkaar te verenigen zijn."

Naar verwachting zal het EHT-team over niet al te lange tijd ook een foto – en misschien zelfs wel een filmpje – publiceren van Sagittarius A*, het superzware zwarte gat in de kern van ons eigen Melkwegstelsel. Die waarnemingen zijn ook al in 2017 gedaan, maar de analyse is veel ingewikkelder, omdat dit zwarte gat kleiner en lichter is, en snellere variaties vertoont.

Falcke heeft overigens plannen om de Event Horizon Telescoop uit te breiden met een radioschotel op de Gamsberg in Namibië; de financiering voor dat project is echter nog lang niet rond.

ETpathfinder gaat het om het uittesten van de vele nieuwe technieken die straks in de Einstein Telescoop toegepast moeten worden.

"We willen golven meten met een lagere frequentie", legt Stefan Hild uit, "en dat lukt alleen wanneer we de spiegels afkoelen tot zo'n tien graden boven het absolute nulpunt, oftewel -263 graden Celsius. Vanwege die lage temperatuur moeten de spiegels dan uit kristallijn silicium bestaan in plaats van uit gewoon glas. En dat betekent weer dat we een andere laserfrequentie moeten gebruiken. Verder gaan we quantumtechnologie toepassen om de meetnauwkeurigheid nog verder op te voeren."

Al die nieuwe snufjes worden de komende jaren in de ETpathfinder ontwikkeld en uitgetest. Ondertussen moeten ook de geologen nog veel huiswerk verrichten. Ergens in 2024 wordt besloten of de Einstein Telescoop in Zuid-Limburg komt of op Sardinië. Hild: "Je wilt niet na 29 kilometer graven opeens voor onaangename verrassingen komen te staan."

Volgens Gideon Koekoek is er de afgelopen tijd enorm hard gewerkt. "Het is verbazend snel gegaan", zegt hij, "en Nederland speelt nu al een unieke rol. De ETpathfinder staat per slot van rekening maar op één plek." Mocht de grote broer uiteindelijk toch op Sardinië gebouwd worden, dan blijft ons land via Nikhef een van de belangrijkste partners: alle technologieontwikkeling voor de Einstein Telescoop zal de komende decennia in Maastricht plaatsvinden. "Daarnaast heeft Nederland bijvoorbeeld ook veel expertise in de data-analyse", aldus Koekoek.

En in educatie en voorlichting, zou hij daar nog aan kunnen toevoegen. Zijn voormalige leerling Julia Schuring, die hij ook begeleidde in haar afstudeeronderzoek, wil volgend jaar een opleiding wetenschapscommunicatie gaan volgen aan de Vrije Universiteit Amsterdam. "Ik zou me graag willen verdiepen in de outreach van zwaartekrachtgolven, zwarte gaten en andere kosmologische fenomenen", zegt ze. "De bevindingen van onderzoekers zoals Gideon uitleggen aan het grote publiek, dat lijkt me fantastisch."

Wat denk jij dat er de komende jaren gaat
gebeuren op het gebied van natuurkunde?
Doe je voorspelling!

Pad naar de Toekomst

Voorspel de toekomst en schrijf geschiedenis!

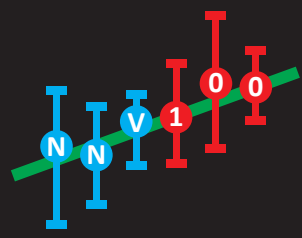
In het kader van het 100-jarig jubileum van de NNV in 2021 kijken we ook vooruit. Daarom hebben we de website Pad naar de Toekomst gelanceerd waarop iedereen toekomstvoorspellingen kan doen voor 25 toekomstige natuurkundige doorbraken, ontdekkingen of ontwikkelingen. Wanneer landt de eerste vrouw op de maan? Wanneer wordt geur toegevoegd aan de standaardtelefonie? Wanneer heeft iemand voor het eerst een buitenaards woonadres? Je mag het zeggen...

www.padnaardetoeekomst.nl

We verzamelen alle voorspellingen en maken dan gezamenlijk een beeld van de (natuurkundige) toekomst. Doe vooral mee, de (tweetalige) website staat open voor iedereen. Het is niet alleen leuk om te doen, maar het zet je ook aan tot nadenken over hoe het verder zal gaan de komende 100 jaar. En we kunnen later kijken of er juiste voorspellingen zijn gedaan!



NNV-voorzitter Diederik Jekel nodigt
je uit om de toekomst te voorspellen
op www.padnaardetoeekomst.nl



Natuurkundig erfgoed

Lens van Christiaan Huygens,
Utrechts Universiteitsmuseum

1655

KIJKEN NAAR TITAN

Met deze lens ontdekte Christiaan Huygens op 25 maart 1655 de grootste maan van Saturnus – tweehonderd jaar later door John Herschel Titan gedoopt. Het was de eerste lens die Huygens zelf sleep en inbouwde in een telescoop. Aan de rand van het glas graveerde hij een inscriptie: "Admove oculis distantia sidera nostris" (Ze brachten de verre sterren naar onze ogen). Het is een versregel van Ovidius die, met zeventien extra letters, een anagram vormt van een Latijnse zin. In vertaling: 'Om Saturnus loopt zijn maan in zestien dagen en vier uur'. Deze versregel plus extra letters stuurde Huygens naar collega-astronomen in Londen en Praag om zijn prioriteit vast te stellen. Huygens was ook degene die inzag dat Saturnus geen 'hengsels' had, zoals een aanblik met mindere instrumenten deed vermoeden, maar was omgeven door een dunne ring. Naar zijn idee was die ring massief en ondoorzichtig; later bleek hij uit gruis te bestaan. Op 14 juni 2005 daalde de Huygens-sonde van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA met parachutes af naar de bodem van Titan en was daar nog een half uur actief. Hij maakte tijdens en na de afdaling zevenhonderd foto's van een oppervlak van 'ijszand' waarover vloeibaar methaan heeft gestroomd. Via NASA-moederschip Cassini, dat rond Saturnus draaide, bereikte de helft van die foto's de aarde. De andere helft ging door een menselijke fout verloren: vergeten een ontvanger aan te zetten.



1835

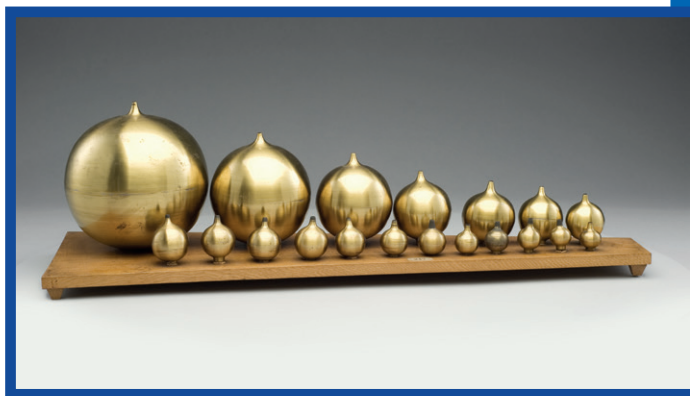
Wagentje van Stratingh,
Universiteitsmuseum Groningen

EERSTE ELEKTRISCHE AUTO

Al in 1835 reed er in Groningen een elektrische auto. Het ging om een schaalmodel ter grootte van enkele decimeters, gemaakt door hoogleraar chemie, farmacie en technologie Sibrandus Stratingh (1785-1841). Eerder had Stratingh zijn medeburgers verstoeld doen staan door in zijn stoomwagen door de Groningse straten te toeren. In zijn elektrische autootje, een van de allereerste ooit, combineerde Stratingh twee recente wetenschappelijke uitvindingen. Dat was in de eerste plaats de zuil van Volta: een stapel schijfjes van afwisselend koper en zink, gescheiden door in een zuur gedrenkt karton. Deze voorloper van de elektrische batterij was in 1800 bedacht door de Italiaan Alessandro Volta. De tweede uitvinding was de gelijkstroommotor van de Brit William Sturgeon uit 1832. Stratingh paste in zijn elektrische auto de constructie toe van de Hongaar Anyos Jedlik: een combinatie van een vaste hoefijzervormige en een draaiende staafvormige elektromagneet. De laatste bracht zijn rotatie, veroorzaakt door aantrekking en afstoting van magneetpolen, via tandwielen over op de as van de achterwielen: en weg reed de auto.



Zonder instrumenten geen natuurkunde. Sommige van die instrumenten zijn zo mooi en hebben zulke betekenisrijke verhalen te vertellen dat ze na gebruik voortleven als erfgoed. Vier voorbeelden uit collecties van Nederlandse wetenschapsmusea.



Resonatoren volgens Helmholtz, Teylers Museum

1864

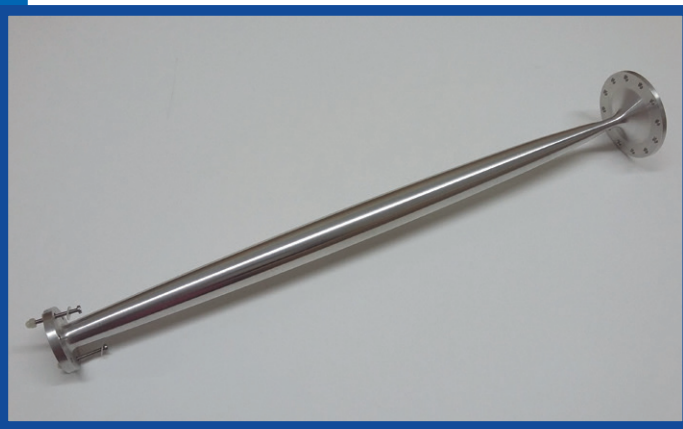
KLINKENDE BOLLEN

De Duitse arts en natuurkundige Hermann von Helmholtz (1821-1894) kennen we via zijn bemoeienis met de wet van behoud van energie. Maar hij deed ook van zich spreken op het gebied van de fysiologie van het oog en gehoor. In 1858 publiceerde Helmholtz een studie over de zintuiglijke waarneming van geluid en leverde daarmee ook een belangrijke bijdrage aan de muziektheorie. Als eerste beschreef hij de functie van de trilhaartjes in het oor, die hij herkende als objecten die met bepaalde tonen meeresoneren. De Helmholtz-resonator bestaat uit een messing bol met aan de ene kant een tuit en daartegenover een wat groter gat waaruit geluid komt. Afhankelijk van het volume van de bol is bij het aanblazen van de tuit een zekere toon te horen: de resonantiefrequentie. Houden we een Helmholtz-resonator tegen het oor, dan pikt hij uit het omgevingsgeluid – in Helmholtz' tijd het huilen van de wind, een voorbijrijdende kar, spetterend water – de resonantiefrequentie eruit en geeft die toon door aan het oor. Andersom valt met een resonator na te gaan of een bepaalde toon in geluid voorkomt en hoe sterk. De negentien resonatoren zoals hier afgebeeld, vervaardigd in de fameuze Parijse werkplaats van Rudolph Koenig, waren bedoeld om een muziekstuk op aanwezigheid van welbepaalde tonen te controleren. Hiermee kon men bijvoorbeeld controleren of een instrument goed gestemd was.

1978

DE KORTSTE WEG

Januari 1983 maakte Carlo Rubbia bekend dat in de deeltjesversneller van CERN in Genève het W-deeltje was opgedoken. Groot nieuws! Een jaar later won de Italiaanse fysicus de Nobelprijs voor de Natuurkunde. Wel moest hij hem delen met een Delftse ingenieur, zonder wiens inbreng de detectie onbegonnen werk was geweest: Simon van der Meer. De W-deeltjes, waarnaar vele jaren reikhalzend was uitgezien, dienden op te duiken bij frontale botsingen van protonen met antiprotonen. De kunst was tegengestelde bundels van beide deeltjes voldoende geconcentreerd te krijgen zodat in afzienbare tijd voldoende W-events zouden optreden. De list die Van der Meer bedacht heet stochastische koeling. Deeltjes die in de ring te snel of te traag rondjes draaiden, werden 'betrap't' waarna overdwars een signaal naar de overzijde van de ring ging om de buitenbeentjes een corrigerend zetje te geven en ze weer in het gareel te dwingen. Van niet minder belang was de hier afgebeelde aluminium magnetische hoorn. Dat instrument, ook al weer een idee van Van der Meer, bundelde de antiprotonen die uit een wolframdraadje traden na een bombardement met protonen. In combinatie met een magnetisch veld leidde de trechtervorm van deze antiprotonlens tot focussering. Dit leidde ertoe dat de antiprotonen in een accumulatorring stochastische koeling ondergingen, om vervolgens in de grote versnellerring te worden opgezweept, op weg naar een frontale botsing met een proton.



Antiprotonlens van Simon van der Meer, Rijksmuseum Boerhaave

Energie voor de toekomst



Ondanks een grote bijdrage van kolen, gas en olie in de wereldwijde elektriciteitsproductie (zo'n 63 procent in 2019) zijn de ogen voor de toekomst gericht op andere energiebronnen. Op het wensenlijstje staan bronnen die veel energie leveren, op ieder gewenst moment en die geen broeikasgassen uitstoten. Om dat te realiseren is niet alleen veel politieke wil en geld nodig, maar ook onderzoek. Wetenschappers verbeteren bestaande energiebronnen en ontwikkelen nieuwe manieren om energie op te wekken en op te slaan. Waterkrachtcentrales, windmolens, zonnepanelen, zonnbrandstoffen en kernfusie, er is vrijwel zeker niet één energiebron van de toekomst maar een groot palet aan manieren om energie duurzaam op te wekken. Het *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* vroeg drie natuurkundigen naar hun bijdrage aan enkele van die toekomstbestendige energiebronnen.

Nederland test reusachtige windmolen

Alles is groot in het havengebied op de Tweede Maasvlakte. Gigantische kranen laden en lossen machtige containerschepen. Hoge loodsen en schoorstenen staan aan de horizon. Op dit terrein lijkt de windmolen aan de Prinses Margriethaven niet eens bijzonder groot. Maar schijn bedriegt, want deze Haliade-X is de grootste windmolen in de wereld. De zogenoemde gondel, een flink blok met de generator en elektronica, staat op een 135 meter hoge paal. Vanuit daar steken drie bladen van ieder 107 meter de lucht in. Qua lengte is dat alsof je drie domtorens van Utrecht met de voet aan elkaar verbindt en rond laat zwiepen, de puntjes gaan met bijna 300 kilometer per uur rond en halen een hoogte van bijna 250 meter aan de top.

De windmolen wekt op volle snelheid een indrukwekkende twaalf tot veertien megawatt aan vermogen op. Ter vergelijking, op de Noordzee draaien nu vooral windmolens van twee tot vier megawatt. Volgens de fabrikant kan één Haliade-X zo'n 16.000 huishoudens van stroom voorzien. Toch was dat niet de belangrijkste reden voor de bouw van deze windmolen. Het is namelijk een prototype waarmee de fabrikant GE Renewable Energy moest bewijzen dat de turbine – met bladen die ruim twintig meter langer zijn dan de grootste windmolens van nu – 25 jaar lang veilig kan draaien. De goedkeuring kwam eind vorig jaar, na een testcampagne van

ongeveer een jaar. Het gloednieuwe type windmolen kan nu onder andere op de (Britse) Noordzee geïnstalleerd worden. Het prototype in Rotterdam blijft staan.

Het Nederlandse onderzoeksinstituut TNO had de leiding over een testcampagne op de Tweede Maasvlakte. Die locatie is handig voor de aanvoer over zee van grote onderdelen waaruit de windmolen bestaat, zegt Jan Willem Wagenaar, de onderzoeksleider van TNO. Een ander voordeel is dat de Tweede Maasvlakte (een kunstmatig opgespoten stuk land) een eind de Noordzee in steekt waardoor het wat betreft weercondities lijkt op de plek waar deze turbine straks draait, ver op zee.

Het gevaarte hangt vol met sensoren en de onderzoekers richten zich vooral op de bladen. Hoe reageert het materiaal – voornamelijk kunststof dat is verstevigd met glasvezel en koolstofvezel – op extreme krachten? De wind en de zwaartekracht trekken flink aan de bladen: een blad heeft een massa in de orde van 50.000 kilogram. “De vervormingen die de krachten in verschillende richtingen opleveren willen we weten, met name de zogenoemde hoekverdraaiing van de bladen (hoe ze in de lengte verdraaien – RvdH). Dat fenomeen heeft invloed op de opbrengst van de windmolen en was onvoldoende begrepen”, zegt Wagenaar. “Dit is ook belangrijk voor de ontwikkeling van nog grotere windmolens.”

Voor de installatie van hun testapparatuur gingen de Nederlandse

onderzoekers naar de Franse fabriek, om al tijdens het fabricageproces de apparatuur in de bladen te leggen. “In de bladwortel (waar hij aan de rest van de windmolen vastzit – RvdH) kun je makkelijk staan, die is vier meter in diameter! Maar die ruimte wordt snel kleiner richting het uiteinde. Wij mochten in deze bladen niet verder komen dan 35 meter, maar we wilden wel ‘dieper’ meten. Tot bijna het puntje van het blad.”

Om vervorming en kracht te meten bestaan zogenoemde rekstrookjes van metaal, maar Wagenaar en collega's kozen ervoor om met glasvezels te meten. Een afweging was dat glasvezel ongevoelig is voor blikseminslagen die aan de Rotterdamse kust nogal eens voorkomen. De onderzoekers sturen licht door de glasvezel dat een tralie op een bepaald punt (gedeeltelijk) weerkaatst. De golflengte van het weerkaatste licht is afhankelijk van de tralie: bij rek of krimp verandert de kleur. Lokaal meten de onderzoekers veranderingen van micrometers, duizendsten van een millimeter.

Het onderzoek van Wagenaar en collega's maakt steeds grotere en efficiëntere windmolens mogelijk. Waar gaat die trend eindigen? “Een windmolen van vijftien megawatt komt er nog wel, maar veel verder dan twintig megawatt komen we waarschijnlijk niet. Alles – van fabrieken tot transportschepen tot havens – moet meeschaalen in dit proces. Uiteindelijk is het wat betreft kosten niet efficiënt meer om nog grotere windmolens te bouwen. Aan de andere kant, ik denk dat

niemand tien jaar geleden had durven voorspellen dat we nu een exemplaar van veertien megawatt hebben.”

Brandstoffen maken met zonlicht

Nederland heeft een van de betrouwbaarste elektriciteitsnetwerken ter wereld. Gemiddeld is er slechts twintig

films – gemaakt van metaaloxides die waterstof maken als er zonlicht op valt. De films zijn maximaal enkele honderden nanometers dik, slechts een duizendste van een haardikte! Anja Bieberle-Hütter is de groepsleider en vertelt dat een belangrijke succesfactor voor de techniek het gebruikte materiaal voor de foto-

“Bieberle-Hütter denkt dat er straks grote ‘panelen’ mogelijk zijn – zoals zonnepanelen – die in plaats van elektriciteit waterstof produceren.”

minuten per jaar géén stroom. Maar hoe houden we die goede score als we steeds meer afhankelijk worden van wind- en zonne-energie? Windenergie is zo grillig als het weer en zonne-energie is er voornamelijk als we dit het minst nodig hebben: overdag en in de zomer. De meeste stroom gebruiken we ’s ochtends, ’s avonds en in de winter.

Onderzoekers werken daarom aan manieren om energie op te slaan. Dat kan bijvoorbeeld met zeecontainers die zijn volgeladen met batterijen. Maar deze oplossing is relatief duur en heeft bij lange na niet de capaciteit om genoeg energie op te slaan voor een koude, donkere en windstille winter. Bij onderzoeksinstituut DIFFER in Eindhoven werken ze aan een andere mogelijke oplossing, brandstoffen gemaakt met (schone) elektriciteit of direct uit het zonlicht. Een van die zonnebrandstoffen is waterstof, dat ontstaat als je water ‘opsplitst’ in waterstof en zuurstof. Je kunt waterstof opslaan en weer omzetten in water: dat levert (een deel van) de energie terug die je in het proces stopte. De onderzoeksgroep Electrochemical Materials and Interfaces experimenteert met dunne laagjes – oftewel

elektrode is, daar waar de waterstof (en zuurstof) worden gemaakt. Er zijn elektrodes van oxides van titanium, wolfram of combinaties van bismut en vanadium. Toch is de efficiëntie van de omzetting van zonlicht naar bruikbare energie momenteel niet hoog genoeg voor commerciële producten, zegt ze. “Deze materialen zijn duur. De kosten moeten omlaag om deze technologie aantrekkelijk te maken voor de industrie. Daarom kijken we naar bijvoorbeeld ijzeroxide. Daarvan is er veel op aarde, het is goedkoop en niet giftig. Wij denken dat het een goed alternatief is voor de bovenstaande materialen.”

Met de experimenten moet ook duidelijk worden wat er chemisch precies gebeurt op het oppervlak van de foto-elektrode. Met infraroodspectroscopie kijkt Bieberle-Hütter onder andere via welke reactiestappen de waterstof ontstaat. Dat is nog steeds niet helemaal begrepen. “Als je weet hoe dat precies gaat kun je ook beredeneren hoe je de ideale foto-elektrode maakt”, zegt ze. Bieberle-Hütter denkt dat er straks grote ‘panelen’ mogelijk zijn – zoals zonnepanelen – die in plaats van elektriciteit waterstof produceren. Die schoon geproduceerde waterstof is

waarschijnlijk het begin van een veel uitgebreider ‘chemisch netwerk’ van stoffen waarin we energie opslaan. Waterstof is niet ideaal om onder druk in grote hoeveelheden op te slaan. Het is daarom beter om het om te zetten in (vloeibare) brandstoffen. Handig, want dan zijn ze meteen geschikt voor de opslagtanks en de leidingen die er al zijn.

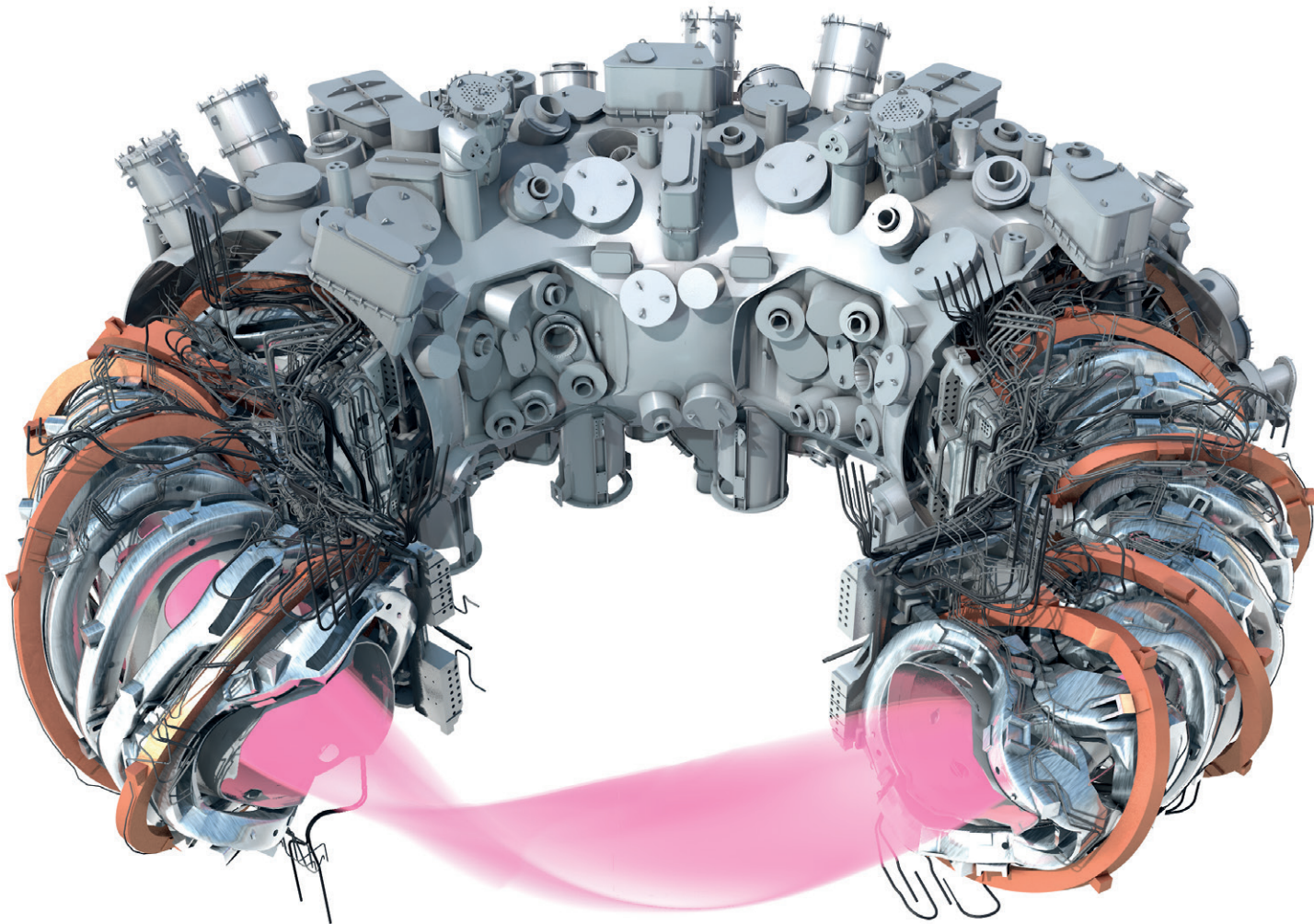
Om de efficiëntie van de foto-elektroden te verbeteren, proberen de onderzoekers elektrodes met verschillende soorten oppervlakten, zoals kleine staafjes of nanodraadjes. “We vergroten zo het reactieoppervlak waardoor je meer waterstof maakt”, zegt Bieberle-Hütter. “In theorie haalt ijzeroxide een efficiëntie van vijftien procent. Twee keer meer dan de huidige efficiëntie voor foto-elektrochemische systemen.”

De ‘vorm’ van kernfusie

Waterstof kan ook in een andere rol een bijdrage leveren aan de energievoorziening van de toekomst. Niet als energiedrager maar als bron. De zon brandt al een kleine vijf miljard jaar lang doordat zij in haar kern onder andere waterstofdeeltjes fuseert tot helium. Bij dit kernfusieproces – niet te verwarren met kernsplijting – komt veel energie vrij. Dat merken we direct op iedere zonnige dag.

Al vanaf het midden van de vorige eeuw proberen wetenschappers dit proces op aarde na te doen, waterstof wordt daarbij vervangen door twee isotopen van waterstof: deuterium en tritium. Dat zijn waterstofatomen die naast een proton respectievelijk ook nog een of twee neutronen in de kern hebben. De belofte is enorm: op papier is het een vrijwel onuitputtelijke bron van energie die weinig en relatief kortlevend radioactief afval oplevert. Bovendien is bij een kernfusiereactor de zo gevreesde meltdown niet mogelijk.

Dat klinkt goed, maar kernfusie blijkt lastig. Een zogenoemd plasma opwarmen tot ongeveer 150 miljoen graden, het vasthouden in een ijzersterk magneetveld en er vervolgens de energie van aftappen heeft al voor veel hoofdbrekens gezorgd bij weten-



Artistieke impressie van de stellarator in het Duitse Greifswald waaraan Ralf Mackenbach onderzoek doet. Credits: IPP Garchin.

schappers en ingenieurs. Het dichtst bij het realiseren van kernfusie is de gigantische ITER-reactor in Zuid-Frankrijk (het reactorvat alleen weegt al meer dan de Eiffeltoren). Na een stroef begin met vertragingen moet deze installatie in de jaren dertig van deze eeuw bewijzen dat kernfusie op aarde haalbaar is.

Ook wetenschappelijk zijn er nog een paar harde noten te kraken. Zoals over de details van het gedrag van een plasma. Wetenschappers willen het gloeiendhete en turbulente plasma tot in de puntjes begrijpen, bijvoorbeeld hoe de deeltjes bewegen en warmte verspreiden. Dat is essentieel voor het succes van kernfusie, want onbegrepen effecten en instabiliteiten maken het proces inefficiënt of beschadigen de reactorwand.

Aan de Technische Universiteit Eindhoven doet promovendus Ralf Mackenbach onderzoek naar het

gedrag van plasmadeeltjes in een zogenoemde stellarator, een soort gekronkelde variant van de donutvormige reactorruimte van ITER. Om een kernfusiereactor te laten werken moet je de deeltjes zo goed mogelijk opsluiten in een soort magnetische 'kooi', laat hij weten. Die kooi bestaat uit een nauwkeurig afgesteld magnetisch veld dat grote supergeleidende magneten opwekken. "Komen er te veel deeltjes op de wand dan verlies je een deel van het plasma en de kostbare warmte die nodig is om de fusiereactie in stand te houden. Dat wil je voorkomen", zegt hij. "Het gedrag van atoomkernen en de banen die ze volgen kennen we inmiddels goed. Maar dat geldt niet voor het turbulente gedrag dat magnetische en elektrische velden van het plasma zelf veroorzaken. Turbulentie kan ervoor zorgen dat er meer deeltjes richting de wand gaan." Mackenbach brengt dit gedrag in kaart.

Zit hij daarvoor vooral thuis achter de computer? Nee, hij is net terug uit het Noord-Duitse Greifswald waar de grootste stellarator in de wereld staat, de Wendelstein 7-X. "Uiteindelijk hoop ik daar metingen te kunnen doen die de theorie die ik nu maak gaan testen", zegt hij. "Je kunt met bijvoorbeeld spectrometers naar de golf lengtes van de straling uit het plasma kijken, dat vertelt je veel over de temperatuur en snelheid van de aanwezige deeltjes. Mijn doel is het maken van een model dat kan voorspellen wat de ideale vorm is van een kernfusiereactor die goed werkt maar óók relatief makkelijk te maken is." Er is nog voldoende onderzoekswerk voor kernfusiewetenschappers zoals Mackenbach. Toch is de realisatie van kernfusie op aarde inmiddels vooral een technisch probleem, dat we volgens Mackenbach kunnen overwinnen.

Werkplek om van te dromen

We spraken zes natuurkundigen die op een bijzondere plek hun werk doen.

Wie: Lennart de Groot
Wat: universitair docent
paleomagnetisme
Waar: Fort Hoofddijk,
Universiteit Utrecht

“De berg is een archief”

“Veldwerk klinkt misschien romantisch, maar het is fysiek zwaar. Ik waarschuw de studenten die meegaan om het niet te onderschatten. We moeten veel gereedschap omhoog sjouwen en water om de boor te koelen. Onze boor is een omgebouwde kettingzaag. We boren tot tien centimeter diep, je komt thuis met allemaal ronde staafjes steen. De hellingen zijn begroeid, meestal is er geen pad. Er zijn niet zoveel wetenschappers in mijn onderzoeksveld die dit veldwerk nog doen. Zelf vind ik het heel leuk. Je vindt altijd weer wat nieuws. Het is ook spannend. Pas na het laboratoriumonderzoek weet ik of het echt wat is. Op Gran Canaria hebben we een hele

berg bemonsterd, laag voor laag, van zeeniveau tot negenhonderd meter hoog. In die lagen zitten sporen van een omkering van het aardmagneetveld van veertien miljoen jaar geleden. Het eiland is laag voor laag gegroeid doordat de vulkaan regelmatig uitbarstte. In de lava zitten ijzeroxides. Die ‘onthouden’ bij het afkoelen het aardmagneetveld van dát moment. De berg is dus één groot archief. Door alle laagjes te bemonsteren, zien we hoe het aardmagneetveld door de tijd heen is veranderd. Ik wil vooral graag weten hoe snel deze omkering is verlopen. Het is nog onbekend hoe snel het aardmagneetveld kan ompolen. Soms blijkt thuis dat je monsters

niet goed zijn. Zo hadden we dit keer monsters van een laag waarop de bliksem was ingeslagen. Alle informatie over het vroegere aardmagneetveld is dan weg. We zijn teruggegaan naar Gran Canaria om die laag een stuk verderop opnieuw te bemonsteren.

Ons laboratoriumwerk doen we in het prachtige Fort Hoofddijk uit 1879, midden in de Botanische Tuinen van de Universiteit Utrecht. In dat fort lag vroeger buskruit opgeslagen. Om vonken te voorkomen is er nergens metaal gebruikt in het gebouw. Dat is voor ons onderzoek geweldig, want metaal verstoort onze metingen aan zwakke magnetisaties in gesteente.”



“Sneeuw is een moeilijk materiaal”

Wie: Alec van Herwijnen
Wat: groepseider lawinevorming
Waar: SLF, Zwitsers instituut voor sneeuw- en lawineonderzoek, Davos

“In de winter houd ik voortdurend het weer in de gaten. Al ons onderzoek dient één doel: de lawinevoorspellingen verbeteren. Sneeuw is een moeilijk materiaal, het is extreem poreus en makkelijk vervormbaar. De temperatuur van het sneeuwdek ligt tegen het vriespunt aan, daardoor verandert de structuur voortdurend. Dat maakt het bepalen van het lawinegevaar ook zo moeilijk. We hebben hier aan het instituut wel een koudelab, maar daar krijg je het nooit zoals in het echt. Dus we kunnen niet zonder veldwerk. Ik houd van buiten zijn, van skiën. Ik vind het ook prettig om contact te hebben met de mensen die de dagelijkse lawinevoorspellingen maken. Je weet waarvoor je het doet.

Frustrerend is het veldwerk soms ook, je bent afhankelijk van de natuur. De afgelopen twee winters konden we weinig metingen doen. Het sneeuwdek was te stabiel. Voor lawines heb je instabiele lagen nodig. Een harde ijslaag bijvoorbeeld, als de bovenlaag eerst dooit en daarna weer opvriest. Als die laag ondersneeuwt, vormt dat een zwakke plek waar een breuk kan ontstaan. Lawinevoorspellingen zijn belangrijk voor de wintersport, maar ook voor het veilig openstellen van wegen. Een fundamenteel probleem in ons onderzoeksveld is slechte data. Zo weten we vaak niet wanneer lawines naar beneden zijn gekomen – het zicht is nou eenmaal slecht als het

sneeuwt. Pas als het opklaart kunnen we ze zien, als ze dan niet alweer aan het zicht onttrokken zijn door de verse sneeuw. We experimenteren daarom met automatische lawinedetectie. Daarvoor installeren we microfoons en geofoons, sensoren die trillingen in het aardoppervlak meten. Daarmee kunnen we ‘horen’ wanneer er een lawine afgaat. Wij doen ook veldmetingen waarbij we sneeuw gecontroleerd laten schuiven. De bewegingen filmen we met een hogesnelheidscamera. Met die metingen voeden we onze computermodellen. Als de sneeuwomstandigheden goed zijn, doen we veel experimenten. Dan kunnen we weer een tijd vooruit.”



Wie: Kate Isaak
Wat: projectwetenschapper CHEOPS
Waar: ESA/ESTEC, Noordwijk

“Trots op onze baby”

“De lancering is de afsluiting van een intense periode van bouwen en testen. Dan gaat het echt gebeuren: de raket rijdt over rails naar het lanceerplatform. We hadden een muntje op de rails gelegd, zoals de traditie voorschrijft. Dat platgereden muntje, en later de lancering zelf: geweldig. Eerst zie je de raket omhooggaan, met daarin je satelliet. Daarna hoor en voel je dat ook. Dan hoop je dat je alles goed hebt gedaan.

Satelliet CHEOPS is klein maar fijn, een kubus van anderhalve meter. Het duurde vijf jaar om hem te maken, een relatief korte tijd. De detector aan boord is extreem stabiel, dat maakt hem bijzonder. Ik ben in dit project de schakel tussen de we-

tenschappers en de ingenieurs. Ik heb een budget en een tijdschema; de kunst is om daarbinnen de best mogelijke satelliet te maken. Dat is heerlijk om te doen. Er spelen zo veel gebieden van de natuurkunde een rol: materiaaleigenschappen, dynamica, elektromagnetisme... dat houdt me scherp.

Deze missie is een stapje op weg naar het antwoord op de vraag of we alleen zijn in het universum. Dankzij CHEOPS kunnen we de grootte van planeten rond andere sterren nauwkeurig vaststellen en meer leren over de samenstelling; is het een planeet van gas, zoals Jupiter, of een harde bal als de aarde?

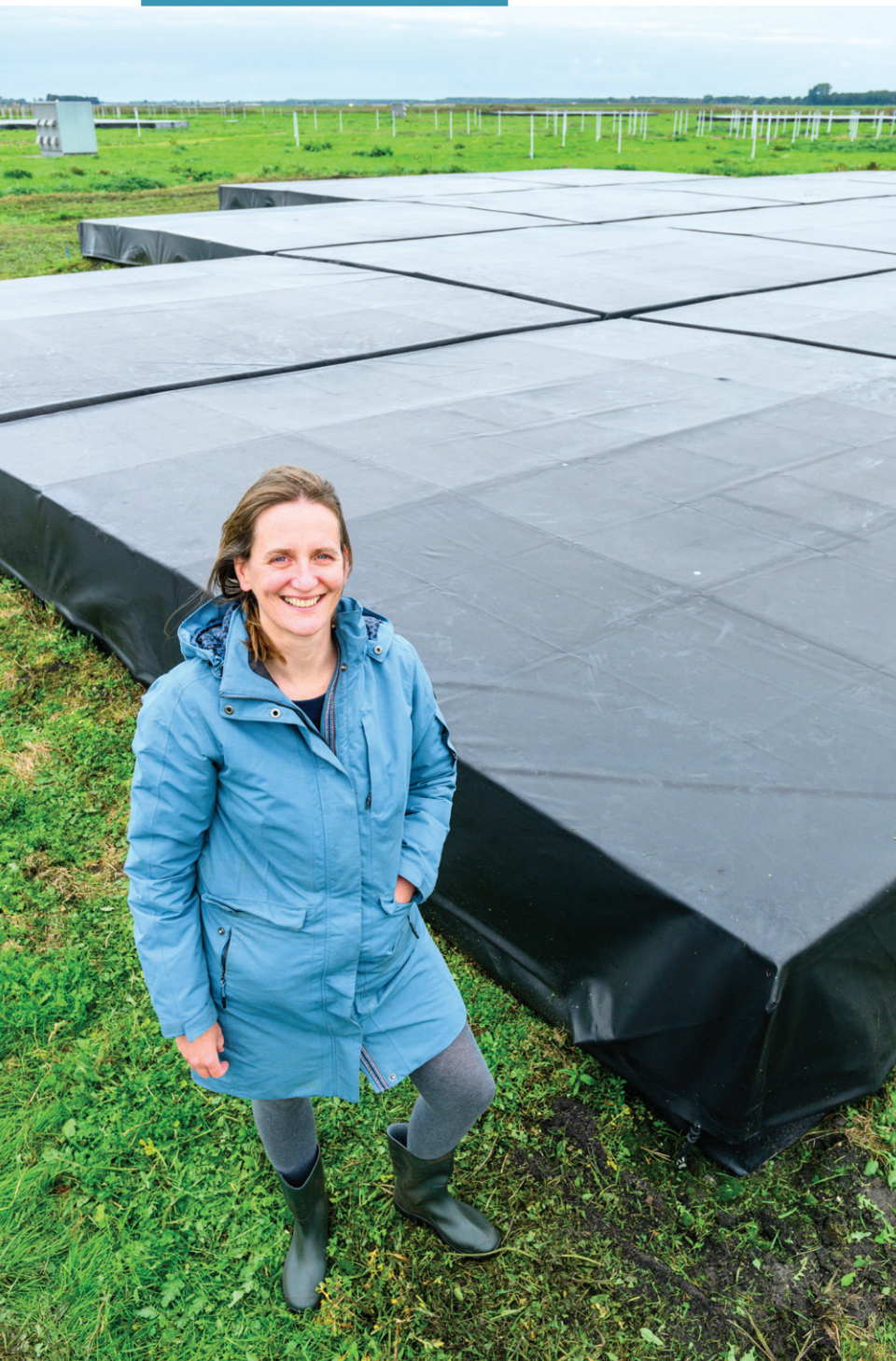
Er werkten elf landen mee aan deze

missie. Dat maakt het complex en leuk. Overal werden stukjes gebouwd en langzaam komen die samen in één satelliet. Hier bij ESTEC hebben we bijvoorbeeld getest of de elektromagnetische signalen van de raket en de satelliet elkaar niet verstoren. Dat deden we in de Maxwell-testkamer, een prachtige ruimte die signalen van buiten compleet blokt. Je kan er de kleinste effecten in meten.

De lancering, eind 2019, en het opstarten van CHEOPS liepen volgens plan. Ik ben trots, onze baby doet het goed. Ik begeleid nu de gastwetenschappers die de satelliet willen inzetten. De komende jaren plukken we de vruchten van ons werk.”

“Er landden roofvogels op onze antennes”

Wie: Maaijke Mevius
Wat: data-onderzoeker
Waar: LOFAR, ASTRON, Dwingeloo



“LOFAR is de grootste radiotelescoop voor lage frequenties ter wereld, maar hij is niet echt indrukwekkend om te zien. Geen grote schotel, maar een verzameling kleine antennes in het veld. Sommige antennes zitten ingepakt in zwarte dozen, met landbouwplastic eromheen. De leukste zijn de antennes ‘op pootjes’, die lijken op tentjes waarvan alleen de stokken zijn neergezet.

LOFAR staat in de levende natuur: wat ongemak hoort erbij. De omgeving is indrukwekkend mooi. Het terrein is van landbouwgrond veranderd in een nat natuurgebied, met veel insecten en vogels – vraag me niet welke precies. Als je erheen gaat, moet je laarzen aan. In het begin kropen er muizen in de kastjes met elektronica, dat vonden ze een lekker warm hol. Laatst hadden we last van roofvogels, die landden boven op de antennes. Dan passen we het ontwerp weer wat aan.

Mijn expertise is kleine effecten vinden in een grote datazee. Het is zo bijzonder wat er allemaal met deze telescoop kan. Je kunt LOFAR flexibel inzetten. We kunnen naar de beginjaren van ons universum kijken door alle antennes op één gebied te richten, honderden uren lang. Dan vang je een zwak signaal op van dertien miljard jaar oud, uit een donker heelal waarin net de eerste sterren gingen schijnen. Door alle antennes los van elkaar te gebruiken, kun je met LOFAR ook snelle fenomenen bestuderen. We meten op de schaal van milliseconden voor mijn onderzoekswerk aan ruimteweer, de processen op de zon die invloed hebben op de aarde. Ik kijk naar de ionosfeer, een laag hoog in de aardatmosfeer waar de invloed van de zon groot is. Een actieve zon veroorzaakt verstoringen in die laag en daardoor in gps-signalen die daar doorheen reizen. Die veelzijdigheid van LOFAR, dat is toch wel het mooiste van deze telescoop.”



Wie: Femke Verhaart
Wat: onderzoeker industriële hydrodynamica
Waar: Deltares, Delft

“Het ontwerp kan altijd beter”

“Toen ik mijn eerste drie pompstations had getest, dacht ik dat ik daarna wel snapte hoe het water door zo’n station stroomt. Dat was een verrassing. Hoe langer je dit werk doet, hoe minder je begrijpt. Turbulentie is een fascinerend fenomeen, stromingen zijn altijd weer verrassend. Dat is ook de reden dat we hier met schaalmodellen werken en niet enkel met computersimulaties.

Ik optimaliseer het ontwerp van grote pompstations, zoals die voor het koelwater van elektriciteitscentrales, afvalwatergemalen en ontziltingsinstallaties. De pompen zien eruit als scheepsschroeven, soms wel met

een diameter van vier meter. Ze zijn groot en sterk, maar ook gevoelig. Ze stuwen het water omhoog. Het is belangrijk dat het water mooi aanstroomt, anders kunnen de pompen stuk trillen.

Het werk komt nauw: door een kleine verstoring – door trillingen of lucht bijvoorbeeld – kan de pomp al kapotgaan. Zo mogen er geen draaikolken aan het wateroppervlak ontstaan, dan zuig je lucht naar binnen. Testen met schaalmodellen is essentieel. Ik kan het ontwerp na zo’n test bijna altijd wel verfijnen.

Onze opdrachtgevers komen van over de hele wereld. Wanneer een ontwerp

binnenkomt, bestudeer ik eerst de tekeningen. Soms doen we ook computersimulaties. Wanneer ik denk dat het hoofdontwerp van het pompstation in orde is, vraag ik de werkplaats om er een schaalmodel van te maken, gewoonlijk ongeveer met de verhouding een op tien. De modellen zijn van hout, daar kun je makkelijk mee werken. Ik kan er een extra schotje in zetten of driehoekjes op de wand schroeven om de stroming te verbeteren.

Ik los graag praktische problemen op, dat maakt dit werk zo fijn. Stromend water vind ik leuk om te zien. Zelfs als ik op vakantie een bergbeek zie, analyseer ik de stroming.”



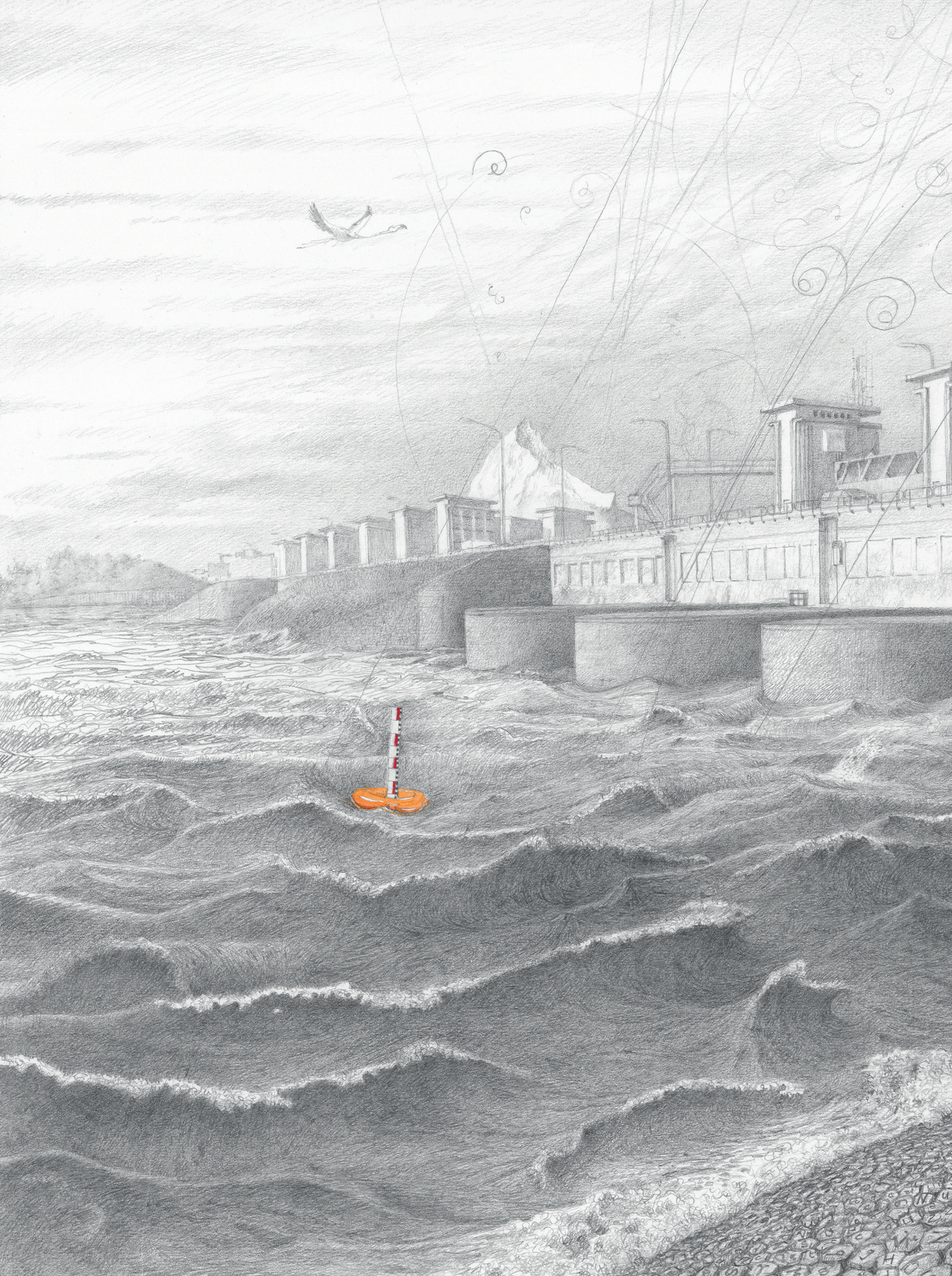
Wie: Hans van Haren
Wat: senior onderzoeker
oceanografie
Waar: NIOZ, Texel

“Ik droomde van een woud van sensoren in zee”

“De remparachute had automatisch los moeten komen, maar dat gebeurde niet. We zijn later met een onderwaterrobot teruggegaan om hem los te knippen. Daardoor konden we zien dat de ring er perfect bijligt: fantastisch. Turbulentie in de lucht brengt ons de zuurstof om te ademen. Turbulentie in zeewater zorgt ook voor verplaatsing van zuurstof en mengt voedselrijk en voedselarm water. Dat is belangrijk voor het leven in zee. Ik doe onderzoek naar onderwatergolven. Die zijn groot, soms meer dan honderd meter. Ze stromen niet hard, maar het gaat om gigantische hoeveelheden water met subtiele temperatuurverschillen. Toen ik in de jaren negentig begon als oceanograaf hadden we weinig meet-

gegevens. Je moest het doen met wat temperatuurmetingen van sensoren die aan lijnen in het water hingen. We hadden nooit genoeg meetgegevens om echt goed zicht te krijgen op het driedimensionale proces dat turbulentie is. Daarom droomde ik altijd al van een soort woud van temperatuursensoren in zee. Een jaar of tien geleden bedacht ik wat we nu doen: een grote metalen ring op de zeebodem leggen, met daaraan lijnen die met drijvers strak omhoog worden gehouden. Op die lijnen bevestigden we drieduizend extreem nauwkeurige sensoren. Dit project doen we met vijf mensen. We zijn de enigen ter wereld die zo iets doen, dus alle problemen moesten we zelf oplossen. Vooral de technici heb-

ben topprestaties geleverd. Dit project heeft me wel wat slapeloze nachten opgeleverd. Maar het pionieren is tegelijk de charme; als het lukt, levert het zo veel nieuwe inzichten op. De ring is zeventig meter breed, een gevaarte. We hebben hem op Texel gemaakt en in delen met een vrachtwagen vervoerd naar de Middellandse Zee, achttien buizen van twaalf meter lang. Eenmaal gemonteerd is hij drijvend naar de juiste plek gevaren. Het afzinken gebeurde met die remparachute; die zorgde ervoor dat de ring niet omsloeg of op de zeebodem kapot stuitte. Dit is onderzoek van de lange adem. Over drie jaar vissen we de sensoren weer op, dan hebben we onze data.”





Lorentz op de Afsluitdijk

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) geldt als een van de grootste Nederlandse natuurkundigen, grondlegger van de elektrontheorie en een inspiratie voor velen. Einstein noemde de Nederlander zijn geestelijk vader en een levend kunstwerk.

Lorentz was lang hoogleraar theoretische natuurkunde in Leiden, maar niet alleen een studeerkamergeleerde. Na zijn pensioen werkte hij in 1918 mee aan plannen voor de afsluiting van de Zuiderzee. Acht jaar lang rekende hij aan de waterhoogtes en dijkhoogtes van het nieuwe IJsselmeer. Een van zijn aanbevelingen was een bocht in de Afsluitdijk bij de toegang bij Kornwerderzand om stromingen te beperken. Die plaats in de bocht draagt sindsdien zijn naam: de Lorentzsluizen.

In 2020 inspireerde het verhaal van de fysicus Lorentz de Amsterdamse kunstenaar Floris Tilanus (1966) tot een potloodtekening van de Nederlandse geleerde en zijn sluizen. Hendrik Lorentz staat, als altijd tot in de puntjes gekleed, op het talud aan de IJsselmeerszijde van de dijk. Achter hem blinkt het sluizencomplex in de zon. Er staat wel een stevige wind die het water laat woelen en golven. De drijvende meetlat beweegt wild op en neer. Een symbool, zegt Tilanus, voor de uitdaging van de natuurkunde om de wereld met metingen te begrijpen. Het draaipunt van de prent, noemt hij het. Vandaar de kleur.

Er zijn meer symbolen in de tekening te vinden. Lorentz houdt als teken van de fysica een fotonenmolentje in zijn hand. Hij staat letterlijk op de bouwstenen van het universum, de steentjes van het talud die de quarks en leptonen en bosonen van het Standaardmodel van de deeltjeswereld verbeelden. In de lucht boven de dijk zien we de gekrulde sporen in een bellenvat, die zichtbaar maken hoe deeltjes voortdurend om en door ons heen zoeven. Hoog in de lucht vinden we ook een flamingo, een subtropische vogel die door het opwarmende klimaat steeds vaker in Nederland neerstrijkt, garnaaltjes zoekend in bijvoorbeeld het Grevelingenmeer. De ijsberg net achter de dijk is van de smeltende Noordpool naar de Waddenzee gedreven. De vraag is tegelijk wel hoe lang de dijk de stijgende zeespiegel nog tegenhoudt. Maar er is ook goed nieuws. Aan Lorentz voet kijkt een tevreden toppereend (*Aythya marila*) met de geleerde mee naar het ingedijkte water en weet: op de open Zuiderzee had ik als zoetwatervogel nooit een kans gehad.

De unieke potloodtekening Lorentz op de Afsluitdijk van Floris Tilanus, gemaakt in opdracht ter gelegenheid van 100 jaar NNV, meet zestig bij veertig centimeter. Voor lezers van dit tijdschrift is in kleine oplage, gesig-neerd en genummerd, een hoogwaardige reproductie van het origineel te koop bij de kunstenaar. De prijs bedraagt 350 euro inclusief btw en verzending. Meer informatie en bestellingen via info@floristilanus.nl.

De beker van Pythagoras

Benodigdheden

- Drie plastic bekertjes
- Rietje met knik of flexibel, waterbestendig buisje
- Een schaar
- Plakband of tape
- Eventueel: kleurstof, meer plastic bekertjes en rietjes

Werkwijze

Zet de eerste beker op het aanrecht, zet de tweede beker er op zijn kop naast en zet hier de derde beker op. Prik met de schaar, iets boven het midden, een gaatje in de derde beker. Steek een rietje door het gaatje; zorg er hierbij voor dat het ene uiteinde van het rietje de bodem van de beker raakt en hang het andere uiteinde in de onderste, rechtopstaande beker. Zorg ervoor dat het uiteinde van het rietje aan de buitenkant van de beker lager hangt dan het uiteinde in de beker. Plak het gat om het rietje heen goed af met tape, zodat er geen water door het gat uit de beker kan stromen. Vul nu de beker met water tot iets onder het gat (voeg eventueel kleurstof toe, voor een dramatischer effect). Het water blijft keurig in de beker zitten. Vul dan de beker tot deze bijna vol is. Wat gebeurt er?

Wat zie je?

Als het goed is, begint het water door het rietje naar de onderste beker te stromen en stroomt de bovenste beker helemaal leeg. Deze proef is gebaseerd op de beker van Pythagoras, ook wel de beker van rechtvaardigheid genoemd. De beker is bedacht door de wiskundige Pythagoras, om ervoor te zorgen dat zijn studenten niet te veel wijn zouden drinken. Zodra de gebruiker te gulzig is en de beker te vol schenkt, stroomt deze in één keer helemaal leeg.

Hoe kan dit?

Wanneer je de beker vult, zal het water in het rietje precies even hoog staan als in de beker, dit is de wet van de communicerende vaten. Als je de beker vult tot onder het gat en dus tot onder het buigpunt van het rietje, dan zal het water in het rietje ook onder het buigpunt staan en gebeurt er niks. Echter, schenk je het water tot boven de knik van het rietje, dan zal het water in het rietje de knik overbruggen en de lagere beker in stromen. Nu zou je misschien verwachten dat deze stroom weer zou stoppen zodra het water in de beker tot onder het gat is gedaald, maar dit is niet het geval. Het geheel vormt namelijk een hevel.

In het hogere glas drukt de luchtdruk op het wateroppervlak en duwt het water als het ware naar beneden. Aan de uitstroomkant van het rietje is de druk gelijk aan de luchtdruk min het zwaartekrachtverschil tussen het instroompunt en het uitstroompunt van het rietje. Wanneer

Do try this at home

Natuurkunde is overal om ons heen; in het licht, in het water, in de lucht. Hoewel de meeste natuurkundige experimenten in laboratoria worden uitgevoerd, zijn veel natuurkundige verschijnselen ook gewoon thuis waar te nemen. Om jullie de wondere wereld van de natuurkunde zelf te laten ontdekken, zijn daarom door dit tijdschrift heen verscheidene proefjes te vinden. Die proefjes beslaan verschillende gebieden van de natuurkunde: van stromingsleer tot quantummechanica.

Natuurlijk leggen we de proefjes ook uit. Voor het eerste proefje, op deze pagina's, staat de uitleg erbij. De uitleg bij de andere proefjes staat op onze website www.ntvn.nl. Voor alle proefjes geldt: doe eerst het proefje en observeer

wat er gebeurt, lees dan pas de uitleg.

Mocht je geen genoeg krijgen van proefjes, kijk dan vooral ook eens op www.proefjes.nl. Daar staan nog veel meer mooie experimenten beschreven. Veel plezier!



het uiteinde van het rietje lager ligt dan het instroompunt, is de druk daar dus lager dan aan het instroompunt. Onder invloed van dit drukverschil zal de vloeistof gaan stromen, net zolang tot de bovenste beker leeg is.

Je kunt deze proef ook met meer bekertjes uitvoeren. Stapel de bekertjes op tot een halve piramide en steek in elke beker, net boven het midden, een rietje, behalve in de onderste beker. Vul ook alle bekertjes, behalve de onderste, tot de helft

met water (en verschillende kleuren kleurstof) en vul dan de bovenste beker helemaal. Bekijk je zelfgemaakte water-valeffect. Let op: het onderste bekertje kan overstromen... Je kunt de beker van Pythagoras trouwens ook kopen, google maar eens. Leuk om een grap met je vrienden uit te halen. Leuk weetje: de meeste wc's werken ook met een hevel. Als je de wc thuis doortrekt, wordt deze helemaal leeggezogen, precies zoals bij de beker van Pythagoras.

Grootse wetenschap

Het sublieme van big science



Robbert Dijkgraaf vertelt over zijn
fascinatie voor grote wetenschappelijke
projecten zoals de Large Hadron Collider.

Als jongetje groeide ik op onder de rook van Rotterdam, vlak bij de grote scheepswerven die Nederland toen nog kende. Ik kan me nog goed de dag herinneren dat ik met mijn schoolklas voor het eerst zo'n werf bezocht. Nog nooit had ik zoiets imposants en angstaanjagends gezien als het enorme zeeschip in zijn droogdok. Een gigantisch bouwwerk van plaatstaal dat hoog boven alles uittorende. De lassers en ijzerwerkers kleefden als minuscule figuren aan de scheepswand. Een regen van vonken daalde neer. Misschien was het mijn levendige fantasie of mijn toenmalige fascinatie met dinosauriërs, maar ik zag het schip als het karkas van een aangespoeld voorwereldlijk zeemonster. Eerlijk gezegd was ik die werf in Slikkerveer allang vergeten, toen ik vele jaren later bij een andere rondleiding de ondergrondse kerker van de ATLAS-detector binnentrad. Dit is een van de knooppunten in de 27 kilometer lange Large Hadron Collider (LHC) in het CERN-laboratorium nabij Genève, de grootste deeltjesversneller ooit gebouwd. Mij werd op dezelfde manier de adem ontnomen als bij de aanblik van dat zeeschip. Wederom stond voor mij een monster van staal, meer dan tien verdiepingen hoog. De technici die aan het werk waren, leken te verdwijnen in de massieve kluwen van elektronica en kabels. Opvallend genoeg was de associatie met een schip op het droge zeer toepasselijk. Een van de reusachtige magneten bleek gemaakt te zijn door dezelfde werf als die uit mijn jeugd. Ook de scheepsbouw had de stap naar de toekomst gemaakt. Nu was de entree ook werkelijk dramatisch. Om de detector te bezoeken – en dat kan alleen veilig als de versneller niet in werking is – moet je een mijnschacht van honderd meter afdalen. Diep onder de grond, lopend door nauwe passages, verwacht je niet plotse-ling zo'n enorm gevaarte aan te treffen. De vergelijking met een monsterlijk fossiel, verstopt onder vele geologische lagen, was nu nog treffender. De LHC is een machine van superlatieven. Alles is het grootst, het ingewik-

keldst, het duurst. Vreemd genoeg is dit gigantische apparaat de krachtigste microscoop op aarde. De paradox van de fysica is dat om de kleinste afstanden zichtbaar te maken, je deeltjes de grootste energie moet geven. En daarvoor heb je weer het grootste apparaat nodig. Kleiner is dus groter. In de versneller worden protonen met enorme energie rondgeslingerd. De deeltjes gaan zo hard dat hun snelheid tot op de negende decimaal die van het licht benadert. Ze gaan maar elf kilometer per uur langzamer, het tempo van een goede amateurhardloper. Dankzij Einsteins relativiteitstheorie wegen ze in beweging zeventienduizend keer meer dan wanneer ze stilliggen. De LHC is een tweebaanssnelweg. De protonen gaan zowel linksom als rechtsom. Maar op een paar plekken kruisen de paden elkaar expres en botsen de deeltjes frontaal. Om de rondvliegende brokstukken van deze total loss te analyseren, zijn de enorme detectoren gebouwd. Anders dan de lege huls van een zeeschip, die gevuld kan worden met graan of olie, zijn deze machines tot aan de nok volgestouwd met elektronica. Deeltjesversnellers worden vaak moderne kathedralen genoemd. Net als de middeleeuwse kerken worden ze door vele mensenhanden gemaakt. Aan de LHC hebben zo'n tienduizend wetenschappers, ingenieurs en technici gewerkt. Ook de tijdspanne van hun bouw is lang. Misschien niet de vele eeuwen van vroeger, maar toch al gauw enkele decennia. De weg die leidde tot de ontdekking van het higgsdeeltje in juli 2012 – het voorlopige hoogtepunt van de LHC – is zo'n vijftig jaar lang geweest, van de eerste theoretische publicaties, via de langzame acceptatie van de theorie en het ontwerp van de machine, naar de bouw van de versneller en de zorgvuldige experimenten – een keten van meerdere wetenschappelijke generaties. Tegelijkertijd is deze kathedraal volledig aan het zicht onttrokken, diep verborgen onder de grond. Ik heb ondertussen zo veel presentaties gezien waarin de versneller in luchtfoto's als een felgekleurde ring op het Frans-Zwitserse landschap is

geprojecteerd, dat ik iedere keer weer teleurgesteld ben dat er helemaal niets te zien is, als mijn vlucht het vliegveld van Genève nadert. En de versneller blijft verborgen. Er zijn geen plannen de instrumenten ooit uit te graven en boven de grond te tillen. Wie weet zullen toekomstige generaties, die geen idee hebben van onze tijd, bij archeologische opgravingen tot hun verbazing op dit enorme brok fossiele elektronica stuiten.

Mijn confrontatie met de detector was een typische sublieme ervaring, net zoals mijn eerste ontmoeting met het zeeschip op de werf. Een combinatie van schoonheid en ontzag voor iets dat onbevattelijk groot is. Het sublieme wordt vaak geïllustreerd met natuurervaringen. Het overweldigende landschap van een bergmassief, de gapende diepte van een kloof, de torenhoge wolken van een onweersstorm of de pracht van een sterrenhemel op een maanloze nacht. Anders dan de schoonheid en harmonie van een bloem of een vlinder, brengt het sublieme ook gevoelens van angst en disharmonie met zich mee. Het is de confrontatie met een verschijnsel dat veel groter is dan de mens. Niet voor niets plaatsten Romantische schilders als Caspar David Friedrich vaak een nietig figuur in hun grootse landschappen om de machteloosheid van de mens ten opzichte van de natuur te benadrukken.

De vergelijking van laboratoria met kathedralen werd voor het eerst gemaakt in 1961 door fysicus Alvin Weinberg [1]. Zijn artikel lanceerde ook de term *big science* als een omschrijving van de grootschalige onderzoeksprojecten die toen opkwamen. Als de geschiedenis terugkijkt op onze tijd, zal ze, zo schrijft Weinberg, “de monumenten van *big science* – de enorme raketten, de hoge-energieversnellers, de hoge-fluxreactoren – symbolen van onze tijd vinden, net zoals ze de Notre-Dame een symbool vindt van de Middeleeuwen.” Hij heeft er plezier in deze metafoor door te trekken. Volgens Weinberg bouwen wij onze instrumenten in naam van de zoektocht naar de wetenschappelijke waarheid, zoals in eerdere tijden piramides en kerken



Het Frans-Zwitserse landschap met daarin de ring van de LHC gevisualiseerd. Op de achtergrond zijn de Franse Alpen met de Mont Blanc te zien. Foto: CERN.

werden gebouwd in naam van de religieuze waarheid. Het artikel verscheen op het hoogtepunt van de Koude Oorlog en de ruimtewedloop. Het geld kon toen niet op, zeker in de Verenigde Staten. Het Apollo-project en de maanlanding zouden uiteindelijk, zo'n 300 miljard (huidige) dollar gaan kosten. In die tijd gaf de Amerikaanse regering twaalf procent van de federale begroting uit aan onderzoek en ontwikkeling; nu is dat minder dan drie procent. Er ontstond een levendige discussie of big science ook een kwalijke invloed heeft op de wetenschap. Leidt het tot een kaste

van bureaucraten en administratoren? Gaat de publiciteit, noodzakelijk voor brede politieke steun, ten koste van de wetenschappelijke integriteit? En is dit het einde voor *little science*, al het andere onderzoek? Al deze kritiekpunten zijn zestig jaar later nog steeds relevant. Iedereen zal het ermee eens zijn dat er een natuurlijk evenwicht moet zijn tussen grootschalig en kleinschalig onderzoek. Maar big science heeft de staatsruif niet leeggegeten en enkele van de voordelen zijn nu pas zichtbaar geworden. De LHC is namelijk ook in andere opzichten een superlatief. Het is waar-

schijnlijk het grootste experiment in de geschiedenis van de mensheid in termen van het aantal deelnemers en samenwerkende instellingen en landen. Een artikel uit 2015 over de precieze waarde van de massa van het higgs-deeltje had 5.154 auteurs, werkzaam aan 336 verschillende universiteiten en laboratoria, met meer dan honderd nationaliteiten [2]. Het is niet toevallig dat een mondiaal onderzoeksinstituut dat zo'n onvoorstelbare hoeveelheid kennis en data moet verwerken, spin-offs heeft geproduceerd als het world wide web, computer grids en gedistribueerde dataopslag – stuk voor

stuk innovaties waar de hele wereld nu graag gebruik van maakt. Al deze nuttige neveneffecten zouden op zichzelf al voldoende rechtvaardiging kunnen zijn voor een ‘nutteloos’ experiment op zoek naar de bouwstenen van de werkelijkheid.

Ook de lange tijdslijnen van zo’n grootschalig experiment vragen veel organisatievermogen. Zoals Mozes die zijn volk naar het beloofde land leidde, maar het niet mocht binnentreden, zo zijn er onderzoekers die als student aan de wieg hebben gestaan maar de successen niet meer, of pas vanuit hun pensionering konden meemaken. Juist in een tijd van kortetermijndenken, waar we ons druk maken over het nieuws van de dag, is het een verademing de blik ver over de horizon te mogen richten. Net zoals een grote sprong een lange aanloop vraagt, komen sommige wetenschappelijke doorbraken pas na jarenlange voorbereiding.

Nederland mag zich zelfs een beetje de geboorteplaats denken van big science. Het succes van de koude-experimenten van fysicus Heike Kamerlingh Onnes rond de vorige eeuwwisseling in Leiden, die hem uiteindelijk zouden leiden tot de ontdekking van supergeleiding en de Nobelprijs voor de Natuurkunde, is mede te danken aan zijn unieke langetermijnvisie. Toen hij benoemd werd als hoogleraar, begon hij niet met het bouwen van experimenten of een laboratorium, maar met het opleiden van jonge, hooggeschoolde instrumentmakers die met ongekende precisie zijn apparatuur konden bouwen, uiteindelijk geformaliseerd in de oprichting van de befaamde Leidse instrumentmakersschool. Dit betekende wel dat Kamerlingh Onnes de eerste tien jaar weinig publiceerde. Maar omgekeerd had hij daarna wel een voorsprong van tien jaar op de concurrentie.

Big science kan altijd *bigger*. Er zijn plannen voor een volgende versneller met een omtrek van honderd kilometer, misschien in China of weer in Genève. De enige ultieme beperking is de omvang van onze planeet.

Een ander prachtig project, de Event Horizon Telescope, heeft precies dát

gedaan: een telescoop bouwen zo groot als de aarde. Dit leidde eveneens tot een vijfsterrenontdekking: de eerste ‘foto’ van de horizon van een zwart gat, gepubliceerd in april 2019. Deze iconische afbeelding verscheen op de voorpagina van zo’n beetje iedere krant in de wereld. Ook dit instrument is er een van superlatieven. De hoekvergroting is zo sterk dat je een appel op de maan zou kunnen zien of de atomen in je eigen vinger. Het combineert de invallende radiogolven op verschillende locaties verspreid over de aarde, inclusief hun faseverschillen, zodat uit deze signalen een totaalbeeld kan worden gereconstrueerd, net zoals de verschillende lichtstralen die invallen op een optische lens. Is dit de grens van ons vermogen? Kunnen we een telescoop maken die nog groter is dan de aarde? Absoluut, door extra ontvangers te plaatsen in satellieten of op de maan. Er is in principe geen belemmering een virtuele lens te maken zo groot als ons zonnestelsel.

De mens heeft de hele geschiedenis geleefd in een gespannen relatie met de natuur. Zij brengt ons voeding, warmte en een plek om te leven, tegelijkertijd zijn we ook overgeleverd aan haar onbeheersbare krachten. De natuur roept een combinatie van emoties op: schoonheid, ontzag, fascinatie en angst. De wetenschap heeft ons begrip van de natuur dramatisch verlengd, letterlijk tot de grenzen van het zichtbare heelal en het binnenste van de materie waaruit alles, inclusief wijzelf, zijn opgebouwd. Maar, anders dan bij een bergmassief, een onweersbui of een sterrenhemel, is het moeilijk het sublieme van een higgsdeeltje of zwart gat direct te ervaren. Vreemd genoeg zijn de meest dramatische natuurverschijnselen het verst weg verstopt, diep in de materie of in de uithoeken van de kosmos. Het landschap dat de wetenschap schildert is zo veel imposanter dan een dramatisch berggezicht. En de menselijke figuur is zo veel nietiger dan de wandelaars in die romantische landschappen.

De Egyptische farao’s en de Middeleeuwse bisschoppen bouwden hun piramides en kathedralen om dichterbij hun goden te komen. Vanuit het

moderne kosmische perspectief is die extra honderd meter hoogte niet zo indrukwekkend. Maar het effect op de tijdgenoten moet enorm zijn geweest. De constructies riepen een beeld op van de grootsheid van de wereld waarin men leefde. Het was een manier om contact te maken met het bovenaardse, het uitspannel waarin onze levens plaatsvinden.

Een van mijn favoriete beelden is een tekening van natuurkundige John Archibald Wheeler. Het is een grote hoofdletter U van universum. Op het ene pootje staat een oog dat naar het andere pootje kijkt. Het heelt dat zichzelf observeert. Dat kosmische oog dat zijn wij, de mens, de wetenschap. Dat beeld drukt voor mij twee gevoelens uit. Ten eerste, het grote voorrecht dat wij hebben om zo veel van dat universum te kunnen bekijken, juist dankzij de enorme technische vooruitgang in de wetenschap. Ten tweede, hoe belangrijk onze rol als toeschouwer is. Want het is niet duidelijk dat er op andere plekken dan planeet aarde naar die voorstelling wordt gekeken.

Big science is een poging om dichterbij dat wonder van de natuur te komen, een nog beter oog te bouwen dat nog verder kijkt. In die zin zou *grand science*, grootse wetenschap, een betere benaming zijn. Is het niet treffend dat de drie natuurkundige doorbraken die de afgelopen tien jaar het meest de verbeelding van de hele wereld hebben geraakt – het higgsdeeltje, de foto van het zwarte gat en de ontdekking van zwaartekrachtgolven – alle drie grootschalige experimenten waren?

Om het sublieme van de natuur te ervaren, je klein te voelen ten opzichte van de grandeur van de werkelijkheid, kun je nog steeds naar de Zwitserse Alpen reizen. Je moet er nu alleen honderd meter voor onder de grond gaan.

REFERENTIES

- 1 A.M. Weinberg, *Impact of Large-Scale Science on the United States*, *Science* **134** (3473) 161-4 (1961).
- 2 G. Aad et al. (ATLAS Collaboration, CMS Collaboration), *Combined Measurement of the Higgs Boson Mass in pp Collisions at $\sqrt{s}=7$ and 8 TeV with the ATLAS and CMS Experiments*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 191803 (2015).

Honderd jaar natuurkunde

Honderd jaar geleden gold Nederland als een grootmacht op het gebied van de natuurkunde. Van die positie was na de oorlog weinig meer over, maar inmiddels bloeit de Nederlandse natuurkunde weer. Hieronder tien markante momenten uit de afgelopen honderd jaar.



1921

HET QUANTUM IN NEDERLAND

Bij de oprichting van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging in 1921 was er nog geen sluitende theoretische beschrijving van de atomen en het licht dat ze uitzenden. Een aantal van haar leden zou echter de natuurkunde goed op weg helpen om daar verandering in aan te brengen: de Leidse hoogleraar Paul Ehrenfest liet door socratische (kritische) vragen te stellen zien hoe kleinste hoeveelheden draaiing en energie ('quanta') in de wereld van het atoom ingevoerd zouden moeten worden; zijn promovendus Hans Kramers – tegelijk tovenaarsleerling en assistent van Niels Bohr – bedacht hoe lichtfrequenties zich tot elkaar verhielden die door dat soort atomen uitgezonden worden en zijn coauteur, de Duitser Werner Heisenberg, gebruikte dat weer om een eerste versie van de quantummechanica te produceren; en Ehrenfests Leidse leerlingen Sam Goudsmit en George Uhlenbeck stelden voor om een magisch nieuw soort ongreepbare, slechts twee waarden aannemende draaiing aan het elektron toe te kennen: de spin.

George Uhlenbeck, Hans Kramers en Sam Goudsmit. Foto: AIP Emilio Segrè Visual Archives, Goudsmit Collection.

1928

DE TWEDE GOUDEN EEUW VOORBIJ: DE BEGRAFENIS VAN LORENTZ

In 1919 schreef Paul Ehrenfest aan zijn vriend Albert Einstein, in een poging deze over te halen naar Leiden over te steken vanuit zijn mooie positie in Berlijn: "Bedenk welk een menselijk-wetenschappelijk milieu je hier zult aantreffen: Lorentz, De Sitter, Onnes [...], Kuenen, mij en mijn vrouw, Droste, De Haas en zijn vrouw, Burgers, Zeeman, steeds weer uitstekende jonge mensen, zoals Burgers en Kramers." Einstein ging op het aanbod in en verbond zich als deeltijdhogleraar aan de Leidse universiteit. Ehrenfests opsomming bevatte niet minder dan drie Nobelprijswinnaars en illustreert daarmee de Tweede Gouden Eeuw die de Nederlandse wetenschap en de Nederlandse natuurkunde in het bijzonder doormaakte. Hendrik Antoon Lorentz, Einsteins grote voorbeeld, begonnen als hoogleraar in 1878, belichaamde deze periode ten voeten uit. Zijn overlijden in 1928 mag het einde van dit hoogtij markeren. Op zijn begrafenis kwamen duizenden mensen af.

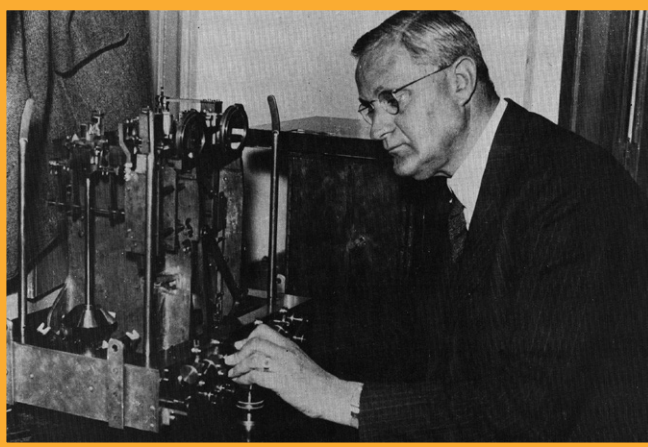


Uitvaart van Hendrik Lorentz in Haarlem. Foto: N.V. Verenigde Fotobureaux / Fotocollectie Elsevier.

1935

FELIX VENING MEINESZ AAN BOORD VAN HR.MS. K XVIII

Het is weinig wetenschappers gegeven om een glansrol te spelen op het filmdoek in de Nederlandse bioscopen. Het overkwam de Nederlandse geofysicus Felix Vening Meinesz in 1935. De bewuste documentaire volgde de reis naar Batavia (nu Jakarta) van een onderzeeër van de Nederlandse marine, de K XVIII. Aan boord bevond zich de Utrechtse hoogleraar Vening Meinesz, tevens lid van de Rijkscommissie voor Graadmeting en Waterpassing, die onderweg een aantal van zijn beroemd geworden metingen aan het zwaartekrachtveld van de aarde verrichtte. De film maakte hem tot een nationale held. De zwaartekrachtexperimenten werden uitgevoerd met een uiterst gevoelige samengestelde slinger, op zijn aanwijzingen gebouwd door het KNMI. De bewegingen werden door middel van lichtstralen en spiegeltjes fotografisch vastgelegd. De gevoeligheid van het apparaat maakte het ongeschikt voor metingen aan boord van gewone zeeschepen. Duikboten hadden geen last van de golfslag. Anderzijds maakten de krappe ruimtes aan boord een langdurig verblijf tot een beproeving, zeker voor de rijzige Vening Meinesz. Zijn experimenten resulteerden in de ontdekking van zwaartekrachtafwijkingen boven de oceaanbodem in de nabijheid van troggen. Het was een van de vele puzzelstukjes die uiteindelijk hun verklaring zouden vinden in de nieuwe theorie van de plaattektoniek. Na de oorlog zou Vening Meinesz zijn carrière eindigen als hoofd-directeur van het KNMI.

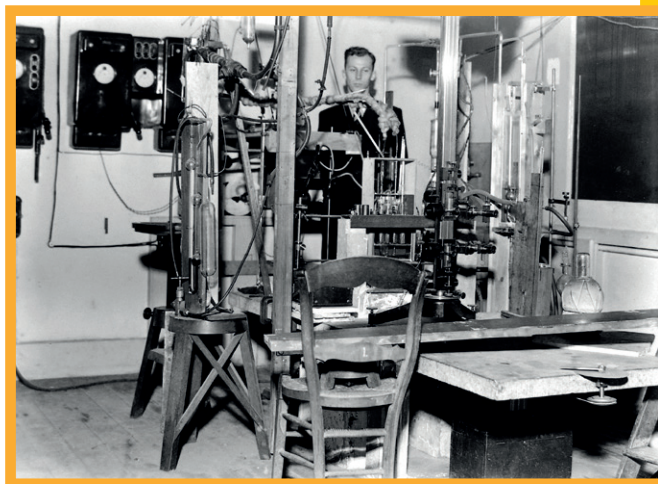


Felix Vening Meinesz met zijn meetapparatuur. Foto: Universiteitsmuseum Utrecht.

1940-1945

DE NATUURKUNDE IN NEDERLAND BEZET EN BEVRIJD

In het septembernummer van 1945 van het *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* presenteerde de voorzitter van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging, Hendrik Dorgelo van de TH Eindhoven, de resultaten van een enquête over de stand van zaken na de Tweede Wereldoorlog. Die leek niet eens zo slecht: de NNV was gegroeid en meer fysici hadden werk gevonden in het wetenschappelijk onderzoek dan ooit tevoren. Toch was er veel geleden: laboratoria, zoals het Leidse, waren gesloten geweest en onderzoeksmaterialen, zoals een indrukwekkende voorraad uranium, waren niet beschikbaar geweest. Sommige studenten, zoals de Joodse deeltjesfysicus Abraham Pais, hadden ondergedoken hun studie voort moeten zetten. Pais vertrok na zijn Utrechtse promotie en de Duitse bezetting naar Niels Bohr in Denemarken en daarna naar de Verenigde Staten. Hij was niet de enige: de achteruitgang van de Nederlandse natuurkunde was versneld in de oorlogsjaren.



Jaap Kistemaker in het Kamerlingh Onnes Laboratorium in Leiden in 1944. Na de oorlog zou hij pionierswerk verrichten op het gebied van uraniumverrijking met behulp van ultracentrifuges. Foto: Leiden Institute of Physics, met dank aan Dirk van Delft.

1953

ZERNIKE, BLEEKER EN DE FASECONTRASTMICROSCOOP

In 1953 ontving de Groningse hoogleraar Frits Zernike de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor de uitvinding van de fasecontrastmicroscop. Deze maakte het mogelijk om details in doorzichtige voorwerpen, zoals levende cellen, waar te nemen. Het idee van het instrument gaat terug op een ontdekking van Zernike tijdens zijn onderzoek aan tralies (een reeks evenwijdige spleten). Net als een prisma scheidt een tralie verschillend gekleurde lichtstralen. Bij een tralie ontstaan echter ook zwakke lichtstralen, waarvan de oorspronkelijke kleur iets veranderd is. Zernike kon aantonen dat het golflengteverschil een kwart van de oorspronkelijke golflengte is. Hij realiseerde zich al spoedig dat dit 'faseverschil' gebruikt kan worden om details zichtbaar te maken die bij een gewone microscoop onzichtbaar blijven. Aangezien er in Nederland nog geen optische industrie bestond, klopte hij aanvankelijk aan bij de Duitse firma Zeiss. Omdat Zeiss, ondanks een verkregen patent, treuzelde met de productie van de microscopen, benaderde hij omstreeks 1937 de in Utrecht gepromoveerde natuurkundige Caroline Bleeker. Deze oude kennis van Zernike had enkele jaren daarvoor een eigen bedrijf opgericht. Zernike moedigde haar nu aan om ook optische instrumenten te produceren. Na de oorlog ontwikkelden zij een sterk verbeterde versie van de fasecontrastmicroscop. Na Bleekers patentaanvraag van 1947 werden deze microscopen in Bleekers fabriek in Zeist gefabriceerd.



Links: Caroline Emilie Bleeker achter een draaibank, omstreeks 1930. Foto: Wikipedia - Universiteitsmuseum Utrecht. Rechts: Frits Zernike kijkt door een fasecontrastmicroscop. AIP Emilio Segrè Visual Archives, W. F. Meggers Gallery of Nobel Laureates Collection.

1972

DE RENORMALISATIE-PROCEDURE VOOR YANG-MILLSVELDEN

The Renormalization procedure for Yang-Mills Fields is de titel van het proefschrift van Gerard 't Hooft, voorgedragen voor promotie op 1 maart 1972 om 14:00 uur (precies) te Utrecht, door promotor Martinus Veltman. Het behandelt hoe de theoretische beschrijving van atomaire kernkrachten van vervelende oneindigheden te ontdoen, opdat er ook normale antwoorden uit haar sommetjes komen. Die sommetjes blijken nu te kloppen met meetresultaten die bij botsingen van kerndeeltjes als quarks worden waargenomen en 't Hooft en Veltman mochten in 1999 de Nobelprijs voor de Natuurkunde in Zweden in ontvangst gaan nemen. Het succes markeert de bloei die de Nederlandse theoretische natuurkunde doormaakte en die tot op de dag van vandaag voortduurt: nazaten van de Utrechtse loot zijn onder meer de bekende snaartheoretici Robbert Dijkgraaf en de broers Erik en Herman Verlinde, die rouleren tussen Princeton in de Verenigde Staten en de Universiteit van Amsterdam. De rekentruc van 't Hooft en Veltman – 'renormalisatie' – werkt niet voor de zwaartekracht: Dijkgraaf en de Verlindes proberen nu met hypothetische snaren in de plaats van deeltjes de oneindigheden uit de quantummechanische beschrijving van de zwaartekracht weg te poetsen.



Martin Veltman (l) en Gerard 't Hooft. Foto: Wikimedia Commons - Wammes Waggel.

Een luchtfoto van het NatLab van Philips, midden op de foto.
Foto: Stichting Eindhoven in Beeld.



1979

HET PHILIPS NATLAB ALS EEN BRON VAN INNOVATIE

In 1979 werd in Eindhoven 's werelds eerste cd geproduceerd. Het was een van de talloze innovaties die stamden uit het Philips Natuurkundig Laboratorium (NatLab). Het laboratorium was opgericht in 1914 met het oog op de verbetering van de gloeilampentechnologie. Onder leiding van Gilles Holst groeide het laboratorium uit tot een vermaard wetenschappelijk instituut. Zijn bloeitijd bereikte het NatLab in de naoorlogse jaren onder leiding van Hendrik Casimir. Er was toen opmerkelijk veel ruimte voor fundamenteel onderzoek. Zelf ontdekte Casimir in zijn directeursstijf het zogenoemde Casimireffect, de aantrekkende kracht tussen twee metalen plaatjes op zeer kleine afstand van elkaar in een lege ruimte. Ook in een lege ruimte kunnen spantoon paren deeltjes en antideeltjes ontstaan, zogeheten quantumfluctuaties. Door de beperkte ruimte tussen de plaatjes vinden die fluctuaties vooral daarbuiten plaats met als gevolg dat de platen naar elkaar toe worden geduwd. De verslechterende financiële situatie van het concern in de jaren zeventig van de vorige eeuw leidde uiteindelijk tot een verregerende inkrumping van het laboratorium en een grotere nadruk op productgericht onderzoek. Tegenwoordig richt het afgeslankte Philips zich hoofdzakelijk nog op medische technologie.

1984

CERN EN DE ONTDEKKING VAN DE 'ZWAKKE DEELTJES'

In 1984 ontving de natuurkundige en ingenieur Simon van der Meer de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor zijn bijdrage aan de ontdekking van nieuwe elementaire deeltjes (W- en Z-bosonen, de overbrengers van de zwakke kernkracht). De nieuwe deeltjes waren gecreëerd door de versnelde protonen en antiprotonen op elkaar te laten botsen in de grote ringvormige versneller van CERN op de Frans-Zwitserse grens bij Genève. Van der Meer had een ingenieuze methode ontwikkeld (stochastische koeling) om ervoor te zorgen dat de bundel antiprotonen voldoende geconcentreerd bleef om een groot aantal botsingen te garanderen. De nieuwe deeltjes leverden een belangrijke ondersteuning voor het Standaardmodel, de theorie die drie fundamentele wisselwerkingen – de elektromagnetische, de zwakke en de sterke kracht – met elkaar wist te verbinden. Middels de ontdekking van deze bosonen slaagde Europa erin de leidende rol in het deeltjesonderzoek over te nemen van de Amerikanen. Nederland behoorde tot de oorspronkelijke lidstaten van het in 1954 opgerichte CERN. Van 1955 tot 1960 was de voormalige Amsterdamse natuurkundehoogleraar Cornelis Bakker algemeen directeur van CERN. Veel Nederlandse natuurkundigen hebben op enig moment in hun carrière bij CERN onderzoek verricht.

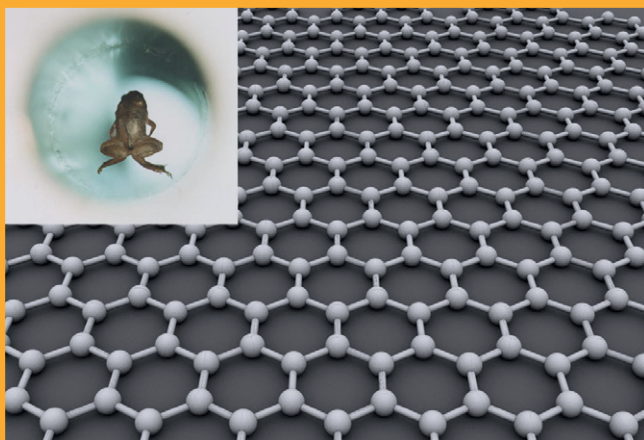


De deeltjesversneller van CERN, de Large Hadron Collider.
Foto: CERN - Brice, Maximilien.

1997

ANDRE GEIM, EEN EIGENZINNIG FYSICUS

De uit Rusland afkomstige Nederlands-Britse natuurkundige Andre Geim werd in 1997 wereldnieuws door een kikker te laten zweven in het Nijmeegse High Field Magnet Laboratory. Al meer dan anderhalve eeuw lang achtten natuurkundigen het onmogelijk om middels een combinatie van zwaartekracht en elektromagnetische krachten een stabiel krachtenevenwicht te bewerkstelligen. Naar nu bleek geldt dat niet voor diamagnetische substanties zoals het water in de kikker. Het hierin opgewekte magnetisme is, anders dan bij magnetische materialen als ijzer, tegengesteld aan dat van het externe veld. Het leverde Geim de Ig Nobelprijs op. Zijn wat tegendraadse houding bleek ook uit een latere publicatie met zijn favoriete hamster als coauteur én uit zijn vertrek naar Manchester uit onvrede met de Nederlandse universiteiten, waar alle stafleden onder het gezag van de hoogleraar vallen en een goede kennis van de Nederlandse taal op prijs werd gesteld. In Manchester ontdekte hij samen met Konstantin Novoselov, eveneens afkomstig uit Nijmegen, het materiaal grafeen, bestaand uit een enkele laag koolstofatomen met een honingraatstructuur. Zij verkregen dit tweedimensionale materiaal door met een plakbandje laagjes koolstof te verwijderen van een blokje grafiet. Vervolgens toonden zij aan dat grafeen over zeer uitzonderlijke eigenschappen beschikt. Deze experimenten leverden beide fysici in 2010 de Nobelprijs voor de Natuurkunde op, dit keer de echte.



De structuur van grafeen. Illustratie: Wikipedia - AlexanderALUS. Inzet: de zwevende kikker van André Geim. Foto: Wikipedia - Lijnis Nelemans.

2015

RONALD HANSON, QUTECH EN QUANTUMVERSTRENGELING OP LANGE AFSTAND

De Delftse natuurkundige Ronald Hanson veroorzaakte in augustus 2015 internationale beroering met de aankondiging dat zijn team erin geslaagd was om twee elektronen op een onderlinge afstand van meer dan een kilometer met elkaar te 'verstrengelen'. De quantumtoestand van elk van de elektronen is onbepaald, maar er bestaat wel een nauwe samenhang tussen de twee toestanden. Bij meting aan één van de elektronen wordt ook de onbepaaldheid van de toestand van het andere elektron onmiddellijk opgeheven, zonder dat er sprake kan zijn van enige fysische wisselwerking tussen beide ver van elkaar verwijderde systemen. Welkom in de wondere wereld van de quantumverschijnselen! Het was een eerste stap op weg naar het einddoel: een quantuminternet. Een tweede stap volgde een kleine drie jaar later toen zijn team erin slaagde een langdurige verstrengeling tussen twee quantumchips te bewerkstelligen. Hanson is een van de oprichters van het Delftse instituut QuTech. Dit instituut streeft tevens naar een andere heilige graal: de ontwikkeling van een quantumcomputer.



Het lab van Ronald Hanson (tweede van rechts). Foto: Hanson Lab@TU Delft - Marieke de Lorijn.

Beleef natuurkunde met Newton

Neem contact op via
[thiememeulenhoff.nl/
contact](http://thiememeulenhoff.nl/contact)
voor een presentatie
aan jouw vaksectie!



Newton is de contextrijke natuurkundemethode van ThiemeMeulenhoff, waarmee je je leerlingen meeneemt in de fascinerende wereld van natuurkunde, vanuit hun eigen belevingswereld. Herkenbare context en concrete voorbeelden uit de dagelijkse praktijk brengen het vak tot leven en laten je leerlingen een verschijnsel eerst begrijpen en doorgronden, voordat ze gaan rekenen.

NIEUW: Newton voor onderbouw

Lesmethode Newton is completer dan ooit met het verschijnen van Newton NaSk voor onderbouw havo en vwo! Met dezelfde ijzersterke didactische opbouw en met een grote diversiteit aan experimenten. Voor een volledig doorlopende leerlijn.

Ontwikkeld door onze ervaren auteurs: Hans van Bommel, Hans Betlem, Kees Hooyman, Michel Philippons en Bas Blok.

- **Eerst begrijpen, dan berekenen**
- **Contextrijk en vanuit leerlingperspectief**
- **Doorlopende leerlijn leerjaar 1 t/m 6**

ThiemeMeulenhoff

thiememeulenhoff.nl/natuurkunde

An artistic illustration depicting quantum entanglement between two diamonds. Two large, faceted diamonds are positioned vertically, one above the other, against a dark background. A vibrant, ethereal energy field connects them, featuring swirling patterns of blue and red. Within this field, four small, glowing spheres are visible: two blue spheres with white internal patterns are located near the top diamond, and two red spheres with white internal patterns are near the bottom diamond. The overall effect is one of mystical, high-tech energy.

Een echt quantumland

Artistieke impressie van
quantumverband tussen twee diamanten.

Geen natuurkunde gekker dan de quantumfysica. Maar toepassingen worden steeds concreter en Nederland is daarbij een hoofdrolspeler.

Op 21 februari 2019 zoeft een kleine stoet zwarte limousines de campus van de TU Delft op en houdt halt voor de entree van de faculteit Technische Natuurkunde. Uit het openzwaaiend portier stapt Koning Willem-Alexander die deze kille mistige ochtend arriveert voor de officiële opening van een nieuw onderzoekslaboratorium op de universiteit. De directeur van dat lab, fysicus Leo Kouwenhoven, schudt strak in het pak de huiverende vorst de hand en troont hem mee naar binnen. Recht de duizelingwekkende wereld van de quantumfysica in. Het koninklijke bezoek onderstreept dat er iets bijzonders gaande is aan de Mekelweg in Delft. Het lab dat de Koning deze ochtend met een swipe op een aanraakscherm opent, is het Microsoft Quantum Lab Delft. Dat juist de Amerikaanse techgigant Microsoft een heel lab op een Nederlandse universiteit laat bouwen, zegt veel over in dit geval de status van Nederland als ambitieus quantumland. Ook Intel, Fujitsu en andere grote namen weten er inmiddels de weg. Kennelijk is hier op het vlak van de quantumtechnologie iets gaande dat internationaal de aandacht trekt. Maar wat?

Quantumdelta

Een halfjaar later wordt dat haarfijn samengevat bij de lancering in Den Haag van de Nationale Agenda Quantumtechnologie, gemaakt in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken. Nederland heeft, zoals in dat document staat, een aantal toonaangevende onderzoekscentra in Delft, Amsterdam en Eindhoven. Plus een pool aan goede researchers en studenten bij andere universiteiten en ook bedrijven die brood zien in de opkomende quantumtechnologie. Bovendien is er

een overheid die quantum als sleuteltechnologie ziet die de wereld kan veranderen.

Nu is het zaak om al die puzzelstukjes aan elkaar te leggen. Nederland moet Quantum Delta Nederland worden, is het voorstel. Een internationaal centrum en knooppunt voor een cruciale nieuwe technologie, die baanbrekende nieuwe computers, sensoren en netwerken gaat betekenen. Met een internationale miljardenmarkt, dat ook. Wat Silicon Valley is voor de informatietechnologie, kan Nederland voor quantumtechnologie worden. Dat zijn grote en meeslepende woorden en ideeën. Maar Nederlandse onderzoekers en technici spelen inderdaad een prominente rol in de voorhoede van de wereldwijde quantumrevolutie. Hun artikelen worden internationaal bovengemiddeld veel geciteerd door collega's, hun netwerken en werkwijze worden elders gretig gekopieerd. Zoiets trekt koningen aan, talent en bedrijfskapitaal uit de hele wereld.

Qubits

Fysicus Leo Kouwenhoven is op dat moment een van de boegbeelden van de revolutie in Nederland. Hij studeerde technische natuurkunde in Delft en werd al in zijn promotietijd in Delft gegrepen door de fysica op de kleinste schaal. Nu zet hij met zijn medewerkers in op een nieuw soort rekeneenheid voor de computer van de toekomst, de qubit. Gewone computers werken met bits, de enen en nullen waarmee informatie kan worden gecodeerd.

Qubits zijn anders. Die zijn niet een of nul, zoals klassieke bits, maar tegelijk 1 en 0. Iets wat natuurkundigen een superpositie van toestanden noemen, waarmee ondanks de onbepaaldheid wel gerekend kan worden. En veel effectiever: in plaats van stap voor stap kunnen door slimme algoritmes alle mogelijke combinaties tegelijkertijd worden doorgerekend.

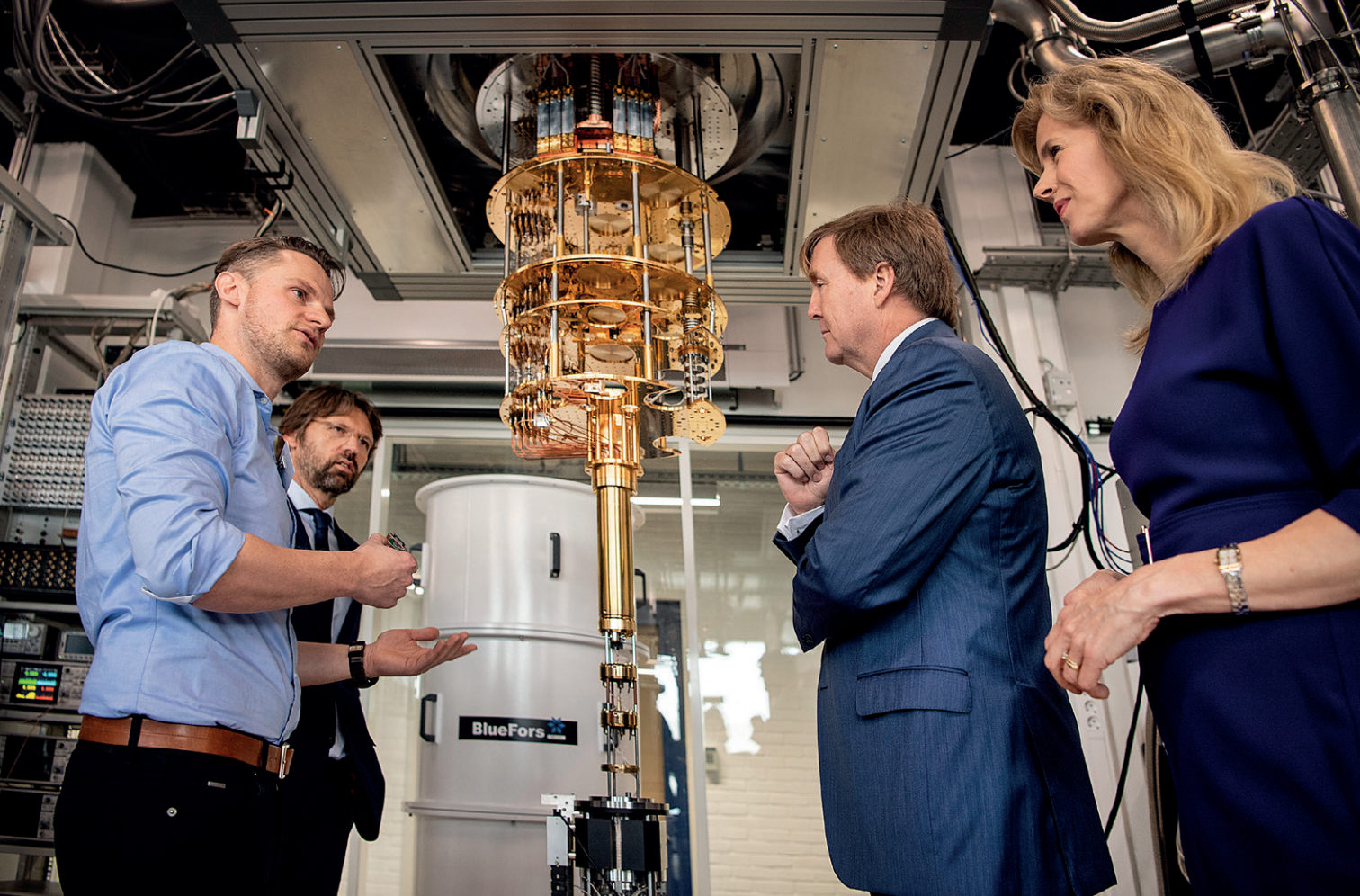
Dat maakt berekeningen denkbaar waar zelfs de huidige supercomputers de tanden op stukbijten. Een klassiek terrein van toepassing is de cryptografie, waar informatie gecodeerd wordt

en ontcijferd. Quantumcomputers zullen codes kraken die onkraakbaar leken. Maar ook op andere terreinen zou het quantumrekenen een doorbraak kunnen betekenen, bijvoorbeeld in het voorspellen van eiwitstructuren, of de werkzaamheid van geneesmiddelen. En oh ironie: quantumcomputers zullen ook quantumvraagstukken kunnen oplossen die nu nog te hoog gegrepen lijken, is de verwachting.

Op papier is de quantumrevolutie haast onvermijdelijk. Maar de praktijk is een heel ander verhaal. Gewone bits zijn beproefde technologie, vooral in halfgeleiders. Qubits zijn een stuk fragieler. Er zijn diverse manieren denkbaar om een qubit te realiseren, maar allemaal berusten die op delicate natuurkundige verschijnselen. In materialen en structuren die zich ingewikkelder gedragen dan verwacht. Een instituut als QuTech, het quantum onderzoeksinstituut in Delft van de universiteit en TNO, besteedt bijvoorbeeld veel tijd aan de beheersing en correctie van rekenfouten in quantumsystemen. Een ander speerpunt is de fysieke opbouw van quantumbits, waar posities en verbindingen een wezenlijke rol blijken te spelen. Binnen QuTech werken fysici innig samen met elektrotechnici en informatici. Bijvoorbeeld van de faculteit Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica, aan de overkant van de Mekelweg, en met de Amerikaanse chipbouwer Intel. De ontwikkelingen gaan letterlijk razendsnel, zegt Lieven Vandersypen, wetenschappelijk directeur van QuTech.

Majorana

Sinds 2019 is Microsoft de buur van onderzoekscentrum QuTech. Basis voor de inspanningen van het Amerikaanse Microsoft zijn metingen van Kouwenhoven en zijn team uit 2012. Op een chip met een structuur van supergeleiders en ragfijne, aan de TU Eindhoven ontworpen draden van halfgeleiders zagen zij een effect waar fysici al zeventig jaar naar op zoek waren. Onder bepaalde omstandigheden leek een zogeheten majoranatoestand te ontstaan, een soort synthetisch deeltje dat op papier ideaal is als qubit. Gewone qubits zijn ongemak-



Opening van het Microsoft Quantum Lab door de Koning, met Leo Kouwenhoven (tweede van links). Foto: QuTech - Photo Republic.

kelijk gevoelig voor verstoringen van buiten. Majoranaparen hebben vooral oog voor elkaar en negeren van nature de roerige omgeving. Kouwenhoven haalde er destijds het omslag van het topblad *Science* mee.

Bijna tien jaar later, eerlijk is eerlijk, worstelen onderzoekers nog steeds met de praktische toepasbaarheid van de waarnemingen. Sterker, een nieuw bewijs uit 2018 voor majoranatoestanden in de Delftse nanodraadjes bleek onlangs toch niet hard genoeg, ook volgens het team van Kouwenhoven zelf. In een recente publicatie lieten zij weten hun artikel uit 2018 terug te trekken. (Meer is op het moment van schrijven niet bekend – red.) Een tegenslag voor de technische toepassingen, maar tegelijk niet heel ongewoon in grensverleggend onderzoek. Een vleugel verder zegt wetenschappelijk QuTech-directeur Lieven Vandersypen in het natuurkundegebouw in Delft: “Het onderzoek

beweegt zich op de grens van wat we weten, en tegelijk is er de belofte van de geweldige toepassing.” Bij QuTech werken zo’n 250 onderzoekers en studenten aan de basistechnieken voor quantumcomputers en ook het quantuminternet. De focus ligt hier vooral op quantumtoepassingen in chiptechnologie.

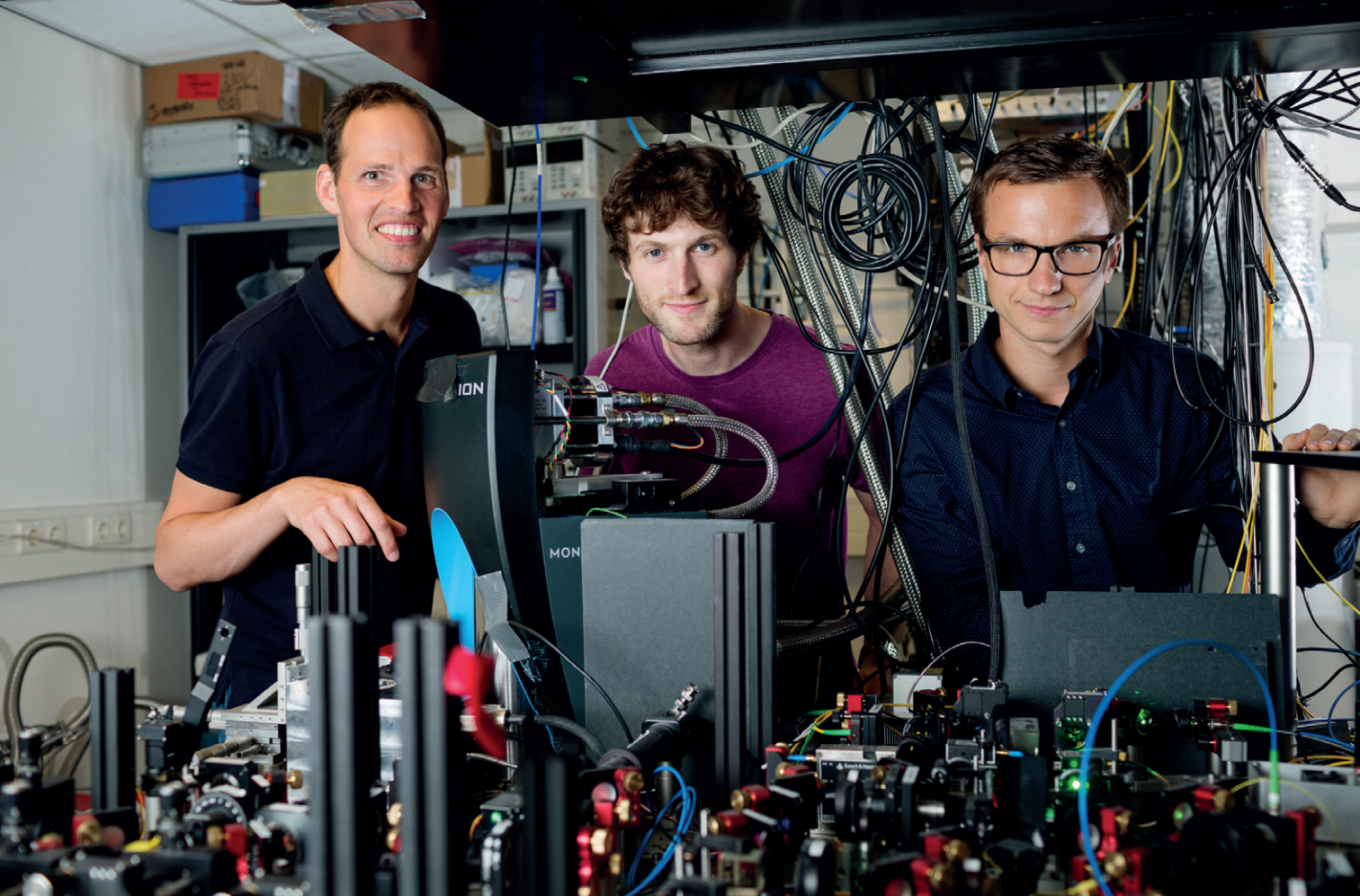
Spookachtig

Het QuTech-lab staat vol ultramoderne meetopstellingen, optische laserbanken en manshoge koelsystemen. Het is de plek waar naar de optimale qubit wordt gezocht, maar ook waar een paar jaar geleden hoogleraar Ronald Hanson voor wereldnieuws zorgde. Hij bracht een quantumverband tot stand tussen twee diamanten op meer dan een kilometer onderlinge afstand, die aantoonbaar weten van en reageren op elkaars toestand. Spookachtig noemde Einstein die mogelijkheid al. Maar een realiteit,

toonde Delft aan. En misschien ook een goede basis voor een internetachtig netwerk dat principieel niet is af te luisteren. QuTech werkt hard aan zo’n quantuminternet in de groep van natuurkundige en computerwetenschapper Stefanie Wehner, zelf ooit een van de eerste professionele hackers in de wereld. In de Randstad wordt de komende jaren aan een prototype gewerkt tussen Delft, Amsterdam en Utrecht.

Samenspel

Ook opende onlangs het Finse bedrijf Bluefors, dat koelsystemen levert voor quantumtechnologie, een eigen lab in Delft, vlak bij hun meest geavanceerde gebruikers. En eerder sloot QuTech om dezelfde reden een deal met de Amerikaanse chipmaker Intel. Een win-winsituatie, noemt Vandersypen dat soort samenwerking. De opkomst van de quantumtechnologie is te danken aan een nauw samen-



Ronald Hanson (links) met collega's in zijn lab. Foto: Marieke de Lorijn/Marsprine.

spel van fundamentele natuurkunde enerzijds en technologie anderzijds. De quantumtheorie zelf stamt in de basis al uit het begin van de vorige eeuw. Die theorie leidde halverwege die eeuw tot de uitvinding van de transistor en andere microtechnologie. Maar diezelfde technologie maakte het omgekeerd mogelijk om het gedrag van superkleine materiestructuren in detail te bestuderen, waardoor de quantumwereld verder kon worden doorgrond.

In Nederland is daarbij één naam onontkoombaar: Hans Mooij. In de jaren negentig van de vorige eeuw was hij hoogleraar technische natuurkunde in Delft. Mooij zette met jonge collega's als Leo Kouwenhoven en anderen een onderzoeksprogramma op naar het quantumgedrag van steeds kleinere bouwsels van halfgeleiders, supergeleiders en andere materialen. Dat leverde een reeks intrigerende ontdekkingen en inzichten op, maar legde ook de ba-

sis voor de Nederlandse quantumfaam wereldwijd. Zijn promovendi zitten van Delft, Eindhoven en Groningen tot verre buitenland. Mooijs voortdurende combinatie van techniek en fundamentele natuurkunde bleek een gouden greep, oordeelde de jury van de oeuvreprijs die hij als nestor van het vak onlangs van de Koninklijke Hollandse Maatschappij der Wetenschappen in Haarlem ontving. En begin dit jaar werd de belangrijkste collegezaal van de afdeling Technische Natuurkunde op de TU Delft omgedoopt tot de Mooijzaal.

Titanengevecht

Inmiddels is de race naar de quantumcomputer een titanengevecht tussen de grootste techbedrijven ter wereld geworden. Google, IBM en andere proberen als eerste een werkende machine te realiseren, vaak nadrukkelijk de publieciteit zoekend. Kan Nederland in dat geweld eigenlijk wel iets klaarmaken?

Vandersypen ziet een wezenlijke rol voor de publieke onderzoeksinstituten. "Anders dan de industriële labs kunnen wij ons laten leiden door wat we ontdekken en door de vragen die dat opwerpt. Hier, en bij andere universitaire groepen in bijvoorbeeld Leiden, Amsterdam en Twente, krijgt de wetenschappelijke nieuwsgierigheid alle ruimte", zegt hij. "Zelfs giganten als Google of IBM kunnen nooit alle ideeën gaan genereren die nodig zijn om quantumcomputing te realiseren." Tegelijk noemt hij samenwerking met industriële partners en bijvoorbeeld ook TNO wel cruciaal. Toepassing en fundament hebben elkaar voortdurend nodig. In Delft ontmoeten onderzoekers, start-ups en bedrijven elkaar ook letterlijk in een gezelschap dat Quantum Delft is genoemd. En op fundamenteel niveau is er nog een wereld te winnen. De quantumtechnologie staat nog in de kinderschoenen, is een veelgehoord oordeel.

GEKKER DAN QUANTUM WORDT HET NIET

De pioniers van de quantumfysica, in de jaren twintig van de vorige eeuw, mensen als Albert Einstein, Niels Bohr en Werner Heisenberg, zouden vermoedelijk onder de indruk zijn van alle baanbrekende technologie anno 2021 waarvoor hun theorie de basis is. In essentie zegt de quantumtheorie dat op de allerkleinste schaal materie en energie uit pakketjes bestaan: tegelijkertijd deeltjes en quanta. De wetten die in die wereld gelden, zijn anders dan die van de klassieke natuurkunde. Deeltjes kunnen op verschillende plaatsen tegelijk zijn, hun eigenschappen onbepaald en de uitkomsten van metingen aan deze deeltjes dus toeval, als een lot uit een loterij. Geen basis voor betrouwbare technologie, lijkt het. Pas in de tweede helft van de vorige eeuw, groeide het inzicht dat die quantumschimmigheid ook kansen biedt. Bijvoorbeeld in berekeningen die opeens simultaan kunnen worden uitgevoerd, in plaats van stap voor stap.

NEDERLANDSE QUANTUMPIONIEREN

Nederlandse natuurkundigen hebben van meet af aan een rol gespeeld bij de ontwikkeling van de quantumfysica. Een van de eerste concrete quantumverschijnselen, de supergeleiding, werd in 1913 in Leiden ontdekt door Heike Kamerlingh Onnes. In Leiden maakte Paul Ehrenfest met gemengde gevoelens de opkomst mee van de nieuwe theorie van grote namen als zijn vriend Albert Einstein, Werner Heisenberg, Arnold Sommerfeld, Max Born en Erwin Schrödinger. Een aantal van zijn leerlingen leverde wel grote bijdragen, zoals Sam Goudsmit en George Uhlenbeck, die in 1925 de quantumspin van het elektron begrepen. Hendrik Kramers en Hendrik Casimir waren in de jaren twintig van de vorige eeuw een tijdlang de secondant van quantumpionier Niels Bohr in Kopenhagen, en verantwoordelijk voor een aantal belangrijke inzichten. In de jaren negentig zette Hans Mooij in Delft de quantumtechnologie op de kaart, de kiem voor Quantum Delta Nederland. Tegenwoordig gelden ook Leo Kouwenhoven, Ronald Hanson en de Amerikaanse Nederlander Dirk Bouwmeester internationaal als grote namen.



Lieven Vandersypen. Foto: QuTech - New Media Centre.

Dat is vergelijkbaar met hoe in de jaren veertig van de vorige eeuw de transistor werd bedacht die tot de huidige digitale wereld heeft geleid. En niet alleen op technisch vlak is er nog reusachtig veel werk te verzetten.

In Amsterdam is bijvoorbeeld Harry Buhrman, hoogleraar informatica bij het Centrum voor Wiskunde en informatica, grondlegger van QuSoft. Dat is een collectief van tientallen onderzoekers dat zich concentreert op de software en protocollen die voor quantumrekenen nodig zullen zijn. Rekenen met concrete enen en nullen is een ding, rekenen met onbepaalde qubits iets heel anders en onderwerp van fundamenteel onderzoek. Volgens de Nationale Wetenschapsagenda vormt QuSoft samen met QuTech, Leiden en de QT/e-groep in Eindhoven de ruggengraat van de Nederlandse quantumdelta.

Nooit perfect

Resteert de vraag wanneer de eerste quantumcomputer een feit is, en of die Nederlands zal zijn. QuTech-directeur Lieven Vandersypen is er nuchter onder. Maar er is nog veel werk te doen, zegt hij.

“Het ligt er helemaal aan waar je de lat legt. Systemen met vijftig qubits zijn er al, en die kunnen rekenen. Maar wat je wilt is een machine die iets oplost wat een supercomputer niet kan oplossen. Dat vergt een paar honderd perfecte qubits. En omdat ze nooit perfect zijn in werkelijkheid honderdduizend of een miljoen qubits. Dat is nog ver weg. Maar er wordt aan gewerkt, en niet in de laatste plaats in Nederland.”

In het gevolg van de Koning wandelde op die februaridag in 2019 in Delft ook diens broer Prins Constantijn mee, zelf betrokken bij het opzetten van start-ups rond de TU Delft. De quantummagie, stelt hij vast, is uiteindelijk ook maar gewoon een gebouw met kantoren en werkplaatsen, waar hard en nuchter wordt gewerkt. “Het klinkt misschien als Jules Verne, maar het is toch ook heel gewoon. Niemand die het quantum helemaal begrijpt, ook de onderzoekers niet. Maar ze ontwerpen en bouwen een grote machine en zien hoe ver ze gaan komen. Dat is mooi.”

Do try this at home

Quantum



Proefje 1: gepolariseerd licht

Benodigheden

- Twee 3D-brillen of gepolariseerde zonnebrillen
- Een lcd-scherm van een telefoon, horloge of televisie. (iPhones en iMacs werken niet zo goed)

Werkwijze

Zet één van de 3D-brillen op en houd het scherm recht voor je. Sluit één van je ogen en kijk met je andere oog naar het scherm. Wissel dan van oog en kijk weer naar het scherm. Draai het scherm of je hoofd nu een kwartslag en kijk weer om de beurt met je ene en dan met je andere oog naar het scherm. Wat zie je? En als je het scherm of je hoofd diagonaal houdt? Als het goed is, zie je het scherm soms wel en soms niet, afhankelijk van met welk oog je kijkt en hoe je het scherm houdt.

Houd nu één oog gesloten en draai het scherm zo dat het licht door het glas voor je open oog geblokkeerd wordt, je ziet het scherm dus niet. Pak nu de tweede 3D-bril en houd een van de glazen van de bril diagonaal tussen het scherm en het glas van de bril die je op hebt. Wat gebeurt er?

Kijk voor de uitleg van de proefjes op www.ntvn.nl.

Proefje 2: de reflecterende cd en het tweespletenexperiment

Benodigheden

- Een cd waarvan ten minste één kant onbedrukt is
- Een zaklamp
- Een laser, bijvoorbeeld een laserpointer
- Een witte muur/tafel/scherm

Werkwijze

Let op! Een laserstraal kan blindheid veroorzaken wanneer deze in je ogen komt. Kijk dus nooit in een laser en schijn een laser niet in iemands ogen, ook niet via reflectie!

We gaan de reflecties van een lichtbundel (zaklamp) en van een laser bekijken als we deze laten reflecteren op de spiegelende kant van een cd. Houd de cd vast met de spiegelende kant richting de muur en schijn de zaklamp zo op de cd, dat de reflectie duidelijk op de muur te zien is. Wat zie je? Als het goed is, zie je de reflectie van de zaklamp als een bundel licht op de muur. Wat verwacht je te zien als je de laser op de muur reflecteert?

Pak nu de laserpointer en doe hetzelfde. Let op dat de reflectie niet in je ogen schijnt. Wat zie je nu, wat gebeurt er?



Sigi Weisenburger (links) en Thomas Cohen Stuart.

Natuurkundigen in het bedrijfsleven

Als natuurkundige kun je terecht bij grote bedrijven als Shell, Philips en ASML of een ingenieurbureau als Movares. Je kunt echter ook een eigen bedrijf oprichten om een nieuwe technologie waarop je bent afgestudeerd of gepromoveerd te verzilveren. “Je moet een houding hebben van: mooi, een nieuwe

technologie om een specifiek probleem op te lossen. Voor wie zou dit nog meer interessant kunnen zijn?”

LUMICKS

Sigi Weisenburger, gepromoveerd in de natuurkunde en gespecialiseerd in optica, wilde in eerste instantie leraar natuurkunde worden. Het lijkt hem nog steeds een leuk vak, maar tijdens zijn masterscriptie ontdekte hij de charme van werken in een lab.

Weisenburger houdt zich nu bezig met de hardware achter nieuwe optische pincetten bij LUMICKS in Amsterdam. “Hiermee kun je zeer kleine objecten als DNA-strengen, eiwitten en moleculaire motoren manipuleren en de krachten die ze ondervinden meten.” De lasertechniek die hierachter schuilgaat, grijpt terug op het werk van Nobelprijswinnaar Arthur Ashkin. Die slaagde er in 1987 voor het eerst in om kleine deeltjes op hun plek te houden in een laserstraal: dat fungeert dan kort door de bocht als pincet. LUMICKS maakt dergelijke pincetten



Lisanne Coenen.

voor onderzoeksgroepen en bedrijven over de hele wereld, vertelt Weisenburger. “We maken ze op maat, stemmen ze af op de behoefte van de klant. Daar zit een deel van het werk in. Daarbij streven we voortdurend naar een hogere resolutie, gevoeligheid en snelheid. Verder besteden we veel aandacht aan de gebruiksvriendelijkheid. Zelf doe ik veel onderzoek op het gebied van de microscopie en diverse optische componenten, zoals lenzen en andere optische elementen.” Volgens Weisenburger hoeft je niet per se een natuurkundige achtergrond te hebben om dit werk te kunnen doen, maar is het wel handig omdat je overal wel wat vanaf weet.

Zijn LUMICKS-collega Thomas Cohen Stuart beschikt als geen ander over die brede blik, want hij studeerde af in de scheikunde en promoveerde in de biofysica op bacteriële fotosynthese. Cohen Stuart is systeemarchitect en houdt in de gaten of alle onderdelen tot een bruikbaar pincet leiden.

Als systeemarchitect waakt hij in zekere zin over het geheel. “Hoewel er overleg is tussen verschillende onderzoeksgroepen, is het altijd de vraag hoe het samengestelde product uitpakt. Het kan bijvoorbeeld zijn dat het doet wat het moet doen, maar niet gebruiksvriendelijk is of moeilijk vervoerbaar. Of er treden misschien onverwachte trillingen op als je de delen samenvoegt, iets wat je op voorhand niet of moeilijk kan voorzien. Dan trek ik aan de bel.”

Door zijn promotieonderzoek kwam Cohen Stuart erachter dat scheikundigen en natuurkundigen vaak een andere manier van procesanalyse hebben. Scheikundigen kijken meer vanuit het geheel, of, zoals hij het noemt: het ensemble. “Het collectieve gedrag van moleculen is voor een scheikundige vaak het startpunt van een analyse. Natuurkundigen willen eigenlijk het gedrag verklaren vanuit de moleculen: ze willen onder de motorkap kijken. Dat is niet altijd vruchtbaar. Je zou

kunnen zeggen: beide manieren om processen te analyseren, hebben hun voors en tegens.”

ASML

Lisanne Coenen studeerde natuurkunde aan de TU Delft en deed haar afstudeerwerk in het quantumlab QuTech. Daar verrichtte ze onderzoek naar qubits, een onderdeel van quantumcomputers. “Ik probeerde de kans op verstrengeling tussen de bits te vergroten. Tamelijk abstract werk dus.” Na haar studie wilde ze door in de techniek, maar géén specialist worden: iemand die heel veel weet van een klein beetje. “Ik vind het prettig om de grote lijnen te zien.” Nu werkt ze al vier jaar bij ASML, bij Customer Support (klantenservice), waar ze een brug vormt tussen de mensen van Onderzoek en Ontwikkeling (Research & Development, R&D) en klanten die met vragen komen over de chipmachines. In de machines van ASML, die tot wel 800 kuub groot en 150 ton zwaar



Willem Kesteloo.

kunnen zijn, worden plakken silicium belicht. Voor belichting wordt een lichtgevoelige laag op de schijf aangebracht. Na belichting wordt de laag plaatselijk verwijderd en de rest uitgehard in een oven. Dan is de plak klaar voor de volgende bewerking, bijvoorbeeld het etsen van verbindingkanalen of het lokaal opdampen van een nieuwe laag. De onderste laagjes zijn soms maar een paar atomen dik. De lagen erboven worden geleidelijk grover en kunnen dan met zeer dunne

koperdraadjes aan de buitenwereld worden gekoppeld. Uiteindelijk resulteert een siliciumschijf met honderden chips. Coenen helpt klanten als er problemen zijn in de productie van chips. “Die kunnen op allerlei plaatsen in het productieproces zijn ontstaan. Dan is het puzzelen om samen met de klant de correcte instellingen te vinden, zodat onze machine de afwijkingen corrigeert en toch goede chips aflevert. Er zijn behoorlijk wat variabelen. Het

is vrij belangrijk om hier goed zicht op te hebben: de hulp van R&D wordt pas ingeroepen als we zeker weten dat we niets gemist hebben en het beste uit de machine halen.”

Volgens Coenen heb je een breed en vrij diep inzicht nodig in de techniek van het maken van chips. “Een deel van je werk is ook dat je bevindingen van klanten terugkoppelt naar R&D. Daarmee verbeteren we de volgende generatie machines. En uiteraard moet je adviezen van R&D kunnen vertalen voor klanten.” Coenen is sinds kort teamleider. “Het coachen van mensen is ook erg leuk, ik denk dat ik de komende jaren dat aspect van het werk wil uitbouwen.”

Physee

Afstuderen op een ‘revolutionaire’ coating voor ramen waarmee zonlicht omgezet wordt in stroom – waarmee het raam automatisch gedimd wordt. Daarmee de boer op gaan om de vondst te verzilveren. En het dan – voorlopig – over een andere boeg gooien omdat de wereld er nog niet helemaal aan toe is. “Je moet als ondernemer een beetje naïef-optimistisch zijn, en bij onverwachte problemen denken: komt goed”, zegt natuurkundige Willem Kesteloo. Enkele jaren geleden richtte hij samen met zijn studiegenoot Ferdinand Grapperhaus de Delftse scale-up Physee op. Het bedrijf, dat inmiddels vijftig werknemers telt, heeft met vallen en opstaan een soort totaalconcept ontwikkeld voor ‘groene’ ramen in een gebouw. Voor wie nog niet helemaal toe is aan de slimme coating, geen probleem: er zijn ook dubbelglasramen te bestellen met zonnecellen, gemonteerd in de afstandhouders. Daarin kunnen, in een geavanceerdere variant, ook sensoren zitten die de temperatuur, luchtvochtigheid, lichtinval en luchtkwaliteit meten. Afhankelijk van de gemeten waarden, gaan bijvoorbeeld zonweringen omhoog of omlaag en ventilatieroosters open of dicht. “Inmiddels zijn zes grote gebouwen met dit soort technieken uitgerust, in het ene geval wat geavanceerder dan in het andere. Begin 2022 komt ons raam met coating op de



Mark Beker.

markt. Hiermee kun je zonlicht dimmen door er stroom van te maken.” Kesteloo is tegenwoordig de hoofd-technicus (CTO) en houdt het overzicht over alle onderzoeksprojecten binnen het bedrijf. “We doen veel onderzoek naar de opbrengst van de coatings en verschillende materialen. En naar de sensoren, algoritmen en het design.” Had hij dit ook kunnen doen zonder natuurkundige achtergrond? “Misschien wel, maar het algemene van natuurkunde maakt het gemakkelijker om je in verschillende takken van sport te verdiepen. Het mooie is dat je breed bent opgeleid, met voldoende diepgang om je snel iets nieuws eigen te maken.”

Innoseis

Als je als natuurkundige wilt ondernemen, moet je ook een beetje geluk hebben. Maar een flink deel heb je in eigen hand, zegt Mark Beker, directeur van Innoseis, een bedrijfje op Amsterdam Science Park dat seismi-

sche sensoren ontwikkelt. “Je moet een houding hebben van: mooi, een nieuwe technologie om een specifiek probleem op te lossen. Voor wie zou dit nog meer interessant kunnen zijn? En als je cursussen ondernemen kunt volgen: doen!”

Tijdens zijn promotiewerk bij Nikhef rond de gevoeligheid van zwaartekrachtgolfdetectoren, kwam hij erachter dat verstorende seismische trillingen niet goed gemeten kunnen worden. “Correctie daarvoor was nauwelijks mogelijk; de technologie stamde uit de jaren tachtig van de vorige eeuw.” Samen met zijn promotor Jo van den Brand ontwikkelde hij relatief kleine en gevoelige seismische sensoren. Toen hij in 2013 promoveerde, was het nog een concept. “Maar wij hadden al in een vroeg stadium het idee: dit is misschien iets wat voor meer partijen interessant is. En dat bleek te kloppen. Nog tijdens mijn promotie kwam ik via via in aanraking met Shell. Zij hadden veel interesse in

dit type sensoren, onder meer om er geofysische modellen mee te corrigeren.”

Beker richtte na zijn promotie samen met Van den Brand Innoseis op om van de concept-sensor een industrieel product te maken. Inmiddels zijn er bijna honderdduizend sensoren over de toonbank gegaan en is Innoseis bezig met een generatie sensoren die een stuk kleiner en gevoeliger is. “Ze zijn ontwikkeld binnen de groep van Van den Brand, ook weer met het oog op zwaartekrachtgolfdetectie, en heel klein: één bij één centimeter. Ter vergelijking: de sensoren waarmee we in 2013 de markt opgingen hadden de grootte van een koffiekopje. Die detectoren hebben we verleden jaar verkocht aan een concurrent.” Toepassingen voor de nieuwe sensoren liggen volgens Beker voor het oprapen. “Denk aan satellieten, drones en zelfrijdende auto’s. Kortom alles waarbij je nauwkeurig bewegingen wilt meten.”



SIMULATIE CASE STUDY

Het leven van een berggletsjer...

Hoog boven de vallei van Chamonix in de Franse Alpen ligt een gletsjer genaamd de Mer de Glace (of "Zee van Ijs"). Hoewel hij bekend staat om zijn uitgestrekte omvang, verliest de gletsjer elk jaar ongeveer 5 meter aan dikte en 30 meter aan lengte. Met behulp van CFD-simulatie kan de dynamiek van ijs- en gletsjerstroming worden geanalyseerd om dit natuurlijke fenomeen beter te begrijpen.

LEER MEER comsol.blog/glacier-dynamics



De COMSOL Multiphysics® software wordt gebruikt voor het simuleren van ontwerpen, apparaten en processen op alle gebieden van engineering, productie en wetenschappelijk onderzoek.

Do try this at home

Kaars doven



Proefje 1

Benodigdheden

- Een kaarsje (of waxinelichtje)
- Een bord
- Een glas, het liefst met een smalle opening
- Azijn (ongeveer 50 ml)
- Een theelepel bakpoeder

Werkwijze

Steek het kaarsje aan en zet het op een bord. Giet dan de azijn in het glas. Voeg een theelepel bakpoeder aan de azijn toe. Het geheel gaat nu een beetje schuimen. Kantel het glas vlak boven de vlam, alsof je de inhoud over de kaars zou gieten, maar zorg dat de vloeistof in het glas blijft. Wat gebeurt er?

Kijk voor de uitleg van de proefjes op www.ntvn.nl.

Proefje 2

Benodigdheden

- Een waxinelichtje
- Een diep bord
- Een glas limonade (of andere gekleurde vloeistof)
- Een schoon glas

Werkwijze

Zet het waxinelichtje in het midden van het bord en giet voorzichtig de limonade om het waxinelichtje heen. Zorg dat het waxinelichtje niet nat wordt. Steek dan het waxinelichtje aan. Houd het glas even op zijn kop boven het waxinelichtje en zet het glas vervolgens over het waxinelichtje heen. Wat gebeurt er? Wacht een tijdje. Wat gebeurt er nu?

De weg van de minste weerstand



Renners van LottoNL-Jumbo (nu: Team Jumbo-Visma) in de windtunnel van de TU Eindhoven (november 2017).

Als je gaat hardlopen of fietsen, heb je voortdurend te maken met natuurkundige verschijnselen die je vooruithelpen of juist belemmeren. Niet iedereen heeft dat goed door: dit zijn drie veelgehoorde misverstanden en hoe je die als loper of renner kunt aangrijpen om je prestaties (enigszins) te verbeteren.

Misverstand 1: Je hebt net zo veel voordeel van wind mee als nadeel van wind tegen

Ga je weleens een rondje fietsen of hardlopen bij harde wind? Misschien merk je dan dat je gemiddelde snelheid een stuk lager ligt dan normaal. En dat terwijl je net zo veel kilometers wind mee had als wind tegen. Heft dat elkaar niet op?

Nee, is het antwoord. Niet alleen is het lichamelijk en geestelijk zwaar om het ene stuk veel meer weerstand te hebben dan het andere stuk, ook natuurkundig gezien heb je er nadeel van.

Stel dat je tien kilometer heen en tien kilometer terug fietst. Heen heb je wind mee en vlieg je met veertig kilometer per uur over de weg. Terug rijd je tegen de wind in slechts twintig kilometer per uur. Wat is je gemiddelde snelheid over het hele stuk dan? Intuïtief denk je misschien: dertig kilometer per uur. Maar dat is niet zo. Over de heenweg deed je een kwartier, over de terugweg een halfuur. Je hebt dus een kwartier met veertig kilometer per uur gefietst en een halfuur met twintig kilometer per uur. Je gemiddelde snelheid is dan $(15 \times 40 + 30 \times 20) / 45 = 26,7$ kilometer per uur. Omdat je langer doet over het stuk wind tegen dan over het stuk wind mee, gaat je gemiddelde bij harde wind omlaag.

Wil je je gemiddelde snelheid op peil houden, dan loont het om je bij wind tegen net wat meer in te spannen dan

normaal. Het kost kracht om tegen de wind in te beuken, maar dan ben je er wel sneller weer vanaf.

Misverstand 2: Je hebt alleen voordeel van iemand voor je

Iedereen weet dat je als hardloper en met name als fietser veel profijt hebt van iemand voor je. De luchtweerstand is dan immers een stuk lager dan normaal. Zo haalde de Amerikaanse wielrenster Denise Mueller-Korenek achter een auto met een enorm windscherm de belachelijke snelheid van 296 kilometer per uur. Maar wist je dat je ook voordeel hebt van iemand achter je? In 2012 ontdekten natuurkundigen van de TU Eindhoven dat een topwielrenner 2,5 procent minder luchtweerstand ondervindt wanneer die een andere renner direct achter zich heeft.

Dat komt doordat er achter een solorijder een gebied ontstaat met lage luchtdruk. Door die onderdruk wordt de renner een beetje naar achteren gezogen. Een renner die 'in het wiel' zit, zorgt voor een verlaging van die onderdruk, zodat de voorste renner minder hard wordt teruggezoogen.

Ook als hardloper heb je een klein voordeel van iemand achter je. Dat werd duidelijk toen Eliud Kipchoge in 2019 als eerste de marathon onder de twee uur liep. De Keniaan werd bij zijn recordrace voortdurend omringd door zeven andere toplopers die hem uit de wind hielden. Onderzoekers van opnieuw de TU Eindhoven hebben via computermodellen bepaald wat de optimale formatie van deze 'hazen' was. De luchtweerstand bleek het laagst wanneer twee van de zeven helpers niet voor, maar achter Kipchoge liepen.

Alle beetjes helpen, zeker bij een lange inspanning. Ga daarom, als het even kan, samen met iemand anders lopen of fietsen; zelfs als jij dan het meeste kopwerk moet verrichten.

Misverstand 3: Je gewicht speelt geen rol in hoe hard je naar beneden gaat

Ruim vier eeuwen geleden gooide Simon Stevin twee loden bollen van

de toren van de Nieuwe Kerk in Delft. De ene bol was zwaarder dan de andere. Stevin constateerde dat beide bollen tegelijk beneden aankwamen. Daaruit concludeerde Stevin dat de valversnelling op aarde altijd even groot is, ongeacht de massa van het vallende voorwerp.

Als je van een helling naar beneden fietst, zou je denken dat het voor je snelheid dus niet uitmaakt hoe zwaar je bent of hoe zwaar je fiets is. Maar dat maakt wel wat uit. Een fietser die een berg afrijdt heeft namelijk te maken met de zwaartekracht en een tegenwerkende kracht: de luchtweerstand. Die luchtweerstand zorgt voor een vertraging. In tegenstelling tot de valversnelling hangt die vertraging wél af van de massa van het voorwerp. Hoe zwaarder fietser en fiets, des te minder ze door de luchtweerstand vertraagd worden. En des te harder ze dus naar beneden gaan.

Deze redenering geldt ook voor de bollen van Stevin. De zwaardere bol viel dus eigenlijk net iets sneller naar beneden. Het verschil was echter zo klein dat Stevin toch één klap hoorde toen de bollen op de grond kwamen. Om het experiment echt goed te doen moet je de voorwerpen in het vacuüm laten vallen; dan heeft de luchtweerstand geen invloed. Dat bleek bijvoorbeeld toen Apollo-astronaut David Scott op de maan een hamer en een veer tegelijk liet vallen.

In de praktijk zijn er naast de massa nog allerlei andere zaken die de snelheid van een dalende fietser beïnvloeden. Het postuur en de houding van de fietser zijn bepalend voor de grootte van de luchtweerstand. Verder kan een lichte fiets(er) meer snelheid verliezen doordat die door luchtstromen meer aan het wiebelen wordt gebracht. Anderzijds kan een zware fiets(er) meer rolweerstand ondervinden doordat de banden meer op de weg drukken. Maar in het algemeen kunnen een paar extra kilo's in een afdaling geen kwaad. Mocht je dus een lang stuk heuvelaf gaan fietsen – wederom: alle beetjes helpen – vul dan je bidons boven aan dat stuk.

“LAAT JE VERBAZEN”

Natuurkundestudenten
aan het woord

MARICKE FLIERMAN | UNIVERSITEIT VAN AMSTERDAM | NATUURKUNDE

Als je me op de middelbare school had verteld dat ik natuurkunde zou gaan studeren, had ik je keihard uitgelachen. De natuurkunde zoals die op de universiteit onderwezen en onderzocht wordt, is veel breder en interessanter dan wat op de middelbare school aan bod komt. Zo deed ik aan het einde van mijn bachelor een project over een kleine detector voor donkere materie. De zoektocht naar donkere materie en donkere energie houdt heel veel natuurkundigen bezig op dit moment; van 95% van de materie in het heelal weten we niet wat het is. Voor het aantonen van het donkeremateriedeeltje waar ik naar zocht maakten we gebruik van een groot vat gevuld met het edelgas xenon, weggestopt in een lab midden in het Italiaanse gebergte Gran Sasso. Als een donkeremateriedeeltje botst met een xenonkern, verschijnen er lichtflitsen die de aanwezigheid van het deeltje moeten aantonen. De eerste resultaten worden volgend jaar verwacht: superspannend!

In mijn master heb ik me verder gespecialiseerd in de deeltjesfysica en ben ik ook dieper de kosmologie in gedoken. Momenteel doe ik theoretisch onderzoek naar de rol van de deeltjesfysica in de (heel) vroege ontwikkeling van het heelal. Het leukste aan natuurkunde vind ik de tegenintuïtieve verschijnselen die we kennen binnen de natuurkunde, de extreme omstandigheden en de ordes van grootte die we in het dagelijks leven niet tegenkomen. Tegen middelbare scholieren zou ik willen zeggen: denk niet dat je het niet kan! De eerste vakken in de studie zijn zo ingericht dat je je wiskunde van de middelbare school goed opfrist en aanvult. Laat je verbazen; ik kan het iedereen aanraden!



IRIS ROMMENS | FONTYS | TECHNISCHE NATUURKUNDE

Ik ben technische natuurkunde gaan studeren omdat ik op zoek was naar een studie waarin ik zowel mijn enthousiasme voor natuurkunde en wiskunde als mijn creativiteit kwijt kon. Voor mij is natuurkunde namelijk echt een soort puzzel. Veel puzzelstukjes zijn al gevonden en op hun plek gelegd maar er is nog zo veel te ontdekken en te bewijzen.

Ik heb voor het hbo gekozen omdat dit de logische stap was na de havo. Een studie met veel practica en projecten past supergoed bij me, want dan kan ik mijn enthousiasme en creativiteit veel beter kwijt dan bij het leren uit een boek. Ik heb niet specifiek een favoriet vak, maar ik merk dat ik (bijna) alle onderwerpen leuk ga vinden als ik er iets praktisch mee kan doen. Zo vind ik misschien het rekenen aan de stroming van water in een buis niet interessant, maar het meten ervan wel. Zeker als ik in mijn achterhoofd houd dat ik dezelfde technieken zou kunnen toepassen om bijvoorbeeld de stroming van bloed in een ader te berekenen of te modelleren.

Mijn voornaamste interesse ligt bij de medische fysica. Ik heb voor een project tijdens mijn studie gewerkt aan het 3D-printen met behulp van gegevens van CT-scans om operaties voor te bereiden. Tijdens mijn stage heb ik in een ziekenhuis gewerkt en daar metingen gedaan aan de magnetische velden van apparatuur die gebruikt wordt voor breinstimulatie. Ik ben van plan na mijn studie verder te gaan in dit vakgebied en hoop dan te werken aan het meten en modelleren van natuurkundige processen in het menselijk lichaam.



GIANLUCA DE BRUIN | TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT | TECHNISCHE NATUURKUNDE

Iets in mij maakt me blij als ik een leuk stukje natuurkunde hoor. Dan bedoel ik dus niet droge, ingewikkelde formules maar hoe je met een klein beetje natuurkundekennis onwaarschijnlijk veel kunt verklaren. Het is toch ongelooflijk dat we dingen kunnen beschrijven die zo klein zijn dat ze nauwelijks te meten zijn. Of eigenschappen van sterren kunnen begrijpen die lichtjaren ver weg zijn. Maar ook voor de hand liggende praktische vragen zijn te beantwoorden. Zoals waarom je wel kunt balanceren op een rijdende, maar niet op een stilstaande fiets. Of hoe lang moet je blazen tot je een hap van een bitterbal kunt nemen zonder je gehemelte te branden. Natuurkunde beschrijft het!

In mijn tussenjaar na mijn bachelor en voor mijn master technische natuurkunde heb ik mijn kennis toegepast in een van de dreamteams van de TU Delft. Met een interdisciplinair studententeam probeerden we 's werelds efficiëntste waterstofauto te bouwen. Dit was een unieke en leerzame ervaring.

Voor de toekomst hoop ik dat natuurkunde kan helpen bij de overstap naar duurzame energie. Zoals bijvoorbeeld nieuwe, efficiëntere manieren om duurzame energie op te wekken of op te slaan. Ik denk dat dit steeds noodzakelijker wordt en dat daarvoor creatieve oplossingen nodig zijn. Een mooi voorbeeld hiervan is het gebruik van speciale vliegtuigen om elektriciteit op te wekken.

Tijdens een studie natuurkunde leer je een unieke manier van analytisch denken die breed toepasbaar is. Dit zorgt ervoor dat je zeker niet bang hoeft te zijn dat je alleen maar onderzoeker of wetenschapper kunt worden als je natuurkunde gaat studeren. Ik krijg eerder keuzestress als ik bedenk wat ik allemaal met mijn natuurkundekennis kan doen na mijn studie!

TIM DE WILD | RIJKSUNIVERSITEIT GRONINGEN | THEORETISCHE NATUURKUNDE

Op dit moment zit ik in het laatste jaar van mijn master theoretische natuurkunde in Groningen. In het onderzoek dat ik samen met mijn begeleiders doe voor mijn afstudeerscriptie, proberen we manieren te vinden om theorieën over het heel vroege heelal te toetsen aan de hand van observaties door sterrenkundigen. De meest gangbare theorie over het vroege heelal stelt dat er een periode van exponentiële uitdijning is geweest. We weten niet precies wat deze groeispurt veroorzaakte. Er zijn wel verschillende mogelijke verklaringen en wij proberen te achterhalen welke het meest overeenkomt met kosmische observaties.

Wat ik het leukste vind aan natuurkunde is dat je op een kwantitatieve manier dingen kunt beschrijven en vooral voorspellen. Een goed voorbeeld daarvan zijn zwaartekrachtgolven. Einstein voorspelde begin vorige eeuw, op basis van zijn algemene relativiteitstheorie, dat deze trillingen in de ruimte én de tijd moeten bestaan. De technologie was toentertijd echter nog niet ver genoeg om dat idee te toetsen. Sterker nog, Einstein zelf achtte de kans heel klein dat deze trillingen ooit gemeten zouden worden. Een eeuw later zijn ze toch waargenomen. Het feit dat je op basis van een wiskundige theorie een uitspraak kunt doen die vele jaren later pas wordt bevestigd, heeft iets magisch.

Ik weet eerlijk gezegd nog niet zo goed wat ik na mijn studie wil gaan doen. Het leuke van natuurkunde is dat je vele kanten op kunt. Ik wil misschien het bedrijfsleven in maar wetenschapscommunicatie of het onderwijs lijkt me ook wel wat.



Do try this at home

De zuil van Volta



Benodigheden

- Acht koperen muntjes (bijvoorbeeld muntjes van vijf cent)
- Een stuk keukenpapier
- Een stuk aluminiumfolie
- Een ledlampje
- Een schaar
- Azijn
- Zout
- Eventueel: een multimeter
- Eventueel: koperdraad

Werkwijze

Maak eerst de muntjes schoon door ze in een bakje met een deel van de azijn en het zout te leggen. Je zou de muntjes ook een nachtje in een glas cola kunnen laten weken.

Knip intussen acht rondjes uit het aluminiumfolie en acht rondjes uit het keukenpapier, allemaal ter grootte van de muntjes. Dompel de rondjes van keukenpapier in azijn. Dep de muntjes, als ze schoon zijn, goed droog. Begin dan met stapelen: leg een grote reep aluminiumfolie onderop. Leg hierop een muntje en dan een rondje nat keukenpapier. Plaats hierop weer een rondje aluminiumfolie, een muntje en keukenpapier. Ga daar mee door tot de acht muntjes gestapeld zijn in een nette toren. Eindig met een muntje. Verbind nu de pluskant van het lampje met het bovenste muntje en verbind het onderste laagje aluminiumfolie met de minpool van het lampje (gebruik eventueel wat koperdraad om de verbindingen te verlengen). Als je een multimeter hebt, kun je de spanning over de toren ook meten. Wat gebeurt er?

Kijk voor de uitleg van het proefje op www.ntvn.nl.

N AGENDA 2021

In dit jubileumjaar waarin de Nederlandse Natuurkundige Vereniging honderd jaar bestaat, organiseren we gedurende het hele jaar activiteiten om het feestjaar te vieren. De *Robbert*, dit speciale nummer van het *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* is er één van en ook hebben we in het kader van de International Day of Women and Girls in Science op 11 februari zo'n 1000 leerlingen en docenten uit het voortgezet onderwijs verbonden met een vrouwelijke fysicus voor een gastles. Een groot succes!

Activiteiten om nu meteen aan mee te doen:

Pad naar de Toekomst

Om in dit jubileumjaar een blik op de toekomst te werpen hebben we de website Pad naar de Toekomst gelanceerd. Iedereen kan hieraan mee doen. Wanneer is de eerste bemenste retourvlucht naar Mars? Wanneer is de eerst bankoverval met quantumcomputers? Wanneer wordt donkere materie verklaard? Zeg het maar! Op Pad naar de Toekomst kun je 25 stellingen over toekomstige (natuurkundige) doorbraken, ontwikkelingen en ontdekkingen aan een toekomstig jaartal koppelen. Dat zet je aan tot nadenken en het is nog leuk ook! Doe vooral mee, zodat we uiteindelijk een gezamenlijke visualisatie kunnen maken van hoe we de toekomst voor ons zien.

www.padnaardetoekomst.nl

Dichtwedstrijd 'Dicht een deeltje'

We willen een erfenis nalaten in de vorm van een poëtische beschrijving van de deeltjes van het standaardmodel. Daarom bij deze de oproep om de inspiratie los te laten op één of meer van de zeventien deeltjes van het standaardmodel. De dichtvorm is vrij, een gedicht bestaat uit maximaal achttien regels en de gebruikte taal is Nederlands. Wie dicht de mooiste omschrijving of beschrijving van een deeltje in haiku, elfje, limerick, rondeel, ollekebolleke, ...?

Indienen kan tot en met 2 april 2021, de dag waarop de NNV op de kop af honderd jaar bestaat.

Daarna gaat de jury, waaronder ook Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft, aan de slag om de winnende gedichten te selecteren.

www.nnv.nl/Dichtwedstrijd

FYSICA 2021

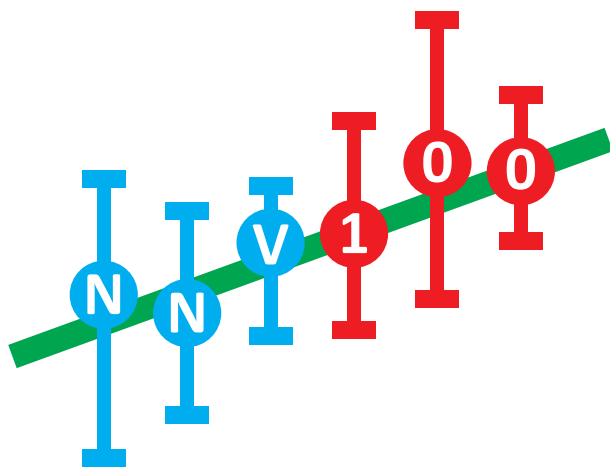
Wie jarig is trakteert, dus is deelname aan het NNV-congres dit jaar gratis. Op vrijdagmiddag 16 april organiseren we een online-editie van FYSICA. Ook dit jaar weer met een Nobelprijswinnaar als spreker (Reinhard Genzel, zwarte gaten) en met Daniel Bonn als winnaar van de Physicaprijs 2021. Het wordt een feest van de natuurkunde, dus schrijf in voor deze jubileumeditie van FYSICA. Iedereen is van harte welkom om onze verjaardag mee te vieren. De voertaal tijdens FYSICA is Engels.

www.fysica.nl

Gratis posters voor in de klas

We bieden zes gratis kleurrijke en educatieve posters aan voor in het natuurkundelokaal (in twee formaten). Elke poster heeft een QR-code die leidt naar een bijbehorend filmpje. Bij de posterset is een aanvullende brochure voor de docent gemaakt met extra informatie (een brochure van zestien pagina's).

www.nnv.nl/Gratis_posters_voor_het_vo



16 April

FYSICA 2021

Celebration Centennial NNV

online event

Daniel Bonn
(Physica Prize 2021)



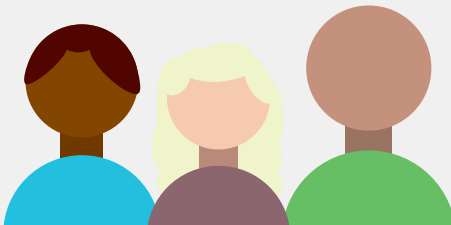
University of Amsterdam

Reinhard Genzel
(Nobel Prize 2020)

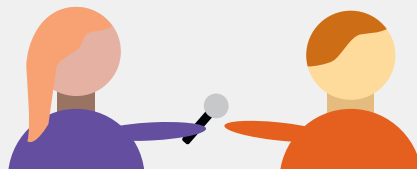


Max Planck Institute for
Extraterrestrial Physics

Young Speakers Contest



Dutch Physics Relay



www.fysica.nl



FYSICA is the annual physics conference of the
Netherlands' Physical Society (NNV).
In 2021, registration is free of charge.
You're all invited to attend this inspiring meeting.

