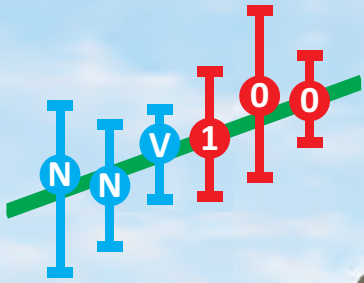


N NEDERLANDS TIJDSCHRIFT VOOR NATUURKUNDE

NUMMER 1 | JAARGANG 87 | JANUARI 2021

WWW.NTVN.NL



DE NOBELPRIJZEN

SPINTRONICA MET
ROOSTERTRILLINGEN

HET MODELLEREN VAN
INFECTIEZIEKTEN

HONDERD JAAR
NNV: FEEST!!

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 veelelvuldigd 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-Marije Zwerfer (TUD)

STUDENTENREDACTIE

Gianluca de Bruin (TUD), Rick ten Eikelder (Saxion), June Groothuizen (UvA), Joost de Kleuver (RU), Romaine Kunst (UT), Frank Rensen (UL), Iris Rommens (Fontys), Frank de Veld (TUE)

VORMGEVING

Studio Aschwin

DRUKWERK

Wilco Meppel

OPLAGE

4500, gedrukt op FSC-papier



UITGELICHT

Homogenea physica



07

ONDERZOEK

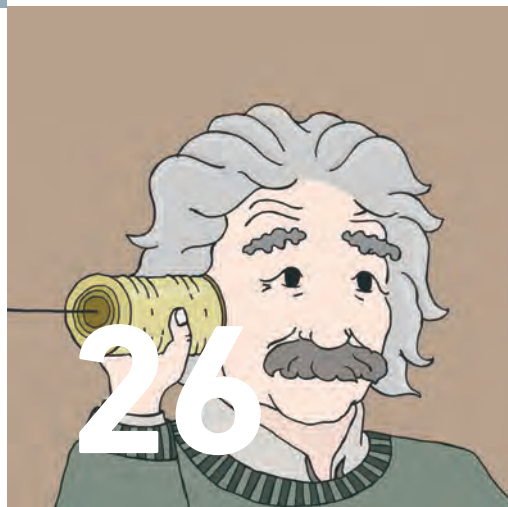
Het modelleren van infectie- ziekten vanuit het perspectief van statistische fysica



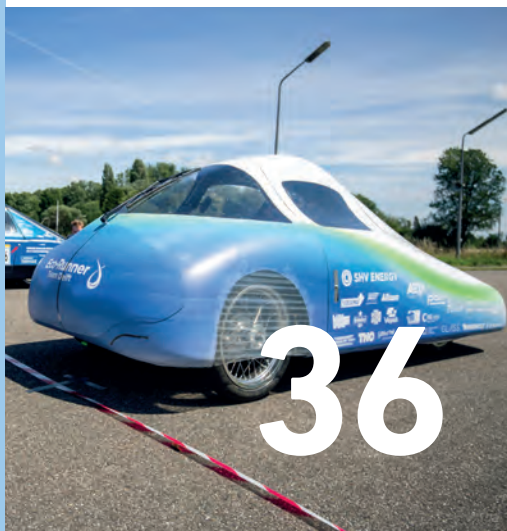
18

ONDERZOEK

Spintronica met roostertrillingen



26



36

STUDENT

Eco-Runner X

INHOUD

2021: een bijzonder jaar REDACTIONEEL Anneke de Leeuw en Els de Wolf	05
Stralende leegte UITGELICHT Jeroen Akkermans	06
Homogenea physica UITGELICHT Wim Reimert	07
Verkiezing nieuwe NNV-voorzitter UITGELICHT Noortje de Graaf	08
Kosmisch kegelen Vincent Icke	10
De wrok van Arrhenius Frans van Lunteren	14
Het modelleren van infectieziekten vanuit het perspectief van statistische fysica ONDERZOEK Debabrata Panja en Mark M. Dekker	18
1902 - 1907 - 1905 COLUMN Frans Kingma	23
Honderd jaar NNV: feest!! Sijbrand de Jong en Noortje de Graaf	24
Spintronica met roostertrillingen ONDERZOEK Rembert Duine en Gerrit Bauer	26
Een eeuw fysica - deel 1 TERUG IN DE TIJD Herman de Lang	30
Golven, geluid en gehoor BIJ DE LES Hans van Bommel	34
Eco-Runner X STUDENT Gianluca de Bruin	36
NNV-Nieuws Noortje de Graaf	39



DE NOBELPRIJZEN

In dit nummer van het *NTvN* staan de Nobelprijzen centraal. Uiteraard is er een uitgebreid artikel over de winnaars van afgelopen jaar, maar we besteden ook aandacht aan de eerste winnaars, ruim honderd jaar geleden.

10 Nobelprijs voor de Natuurkunde 2020

Vincent Icke vertelt over het theoretische van Roger Penrose en het experimentele werk van Reinhard Genzel en Andrea Ghez in het onderzoek naar zwarte gaten, waarvoor ze afgelopen jaar de Nobelprijs ontvingen.

14 De beginjaren

In 1976 besloot de Nobelstichting haar archieven open te stellen voor het eerste deel van de vorige eeuw. Dat maakte het mogelijk een kijkje te nemen achter de schermen. Frans van Lunteren vertelt onder andere hoe de eerste Nederlandse fysici aan hun Nobelprijzen kwamen.

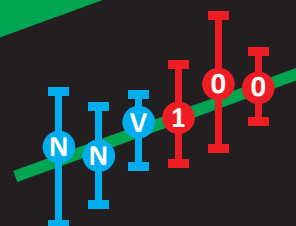
Omdat de NNV in 2021 haar 100-jarig bestaan viert, bieden we een gratis set van 6 nieuwe posters aan voor in het natuurkundelokaal. Ze zijn niet alleen aantrekkelijk qua uiterlijk, maar ze zijn ook informatief. Perfect voor in je lokaal!

Gratis posters!



Elke poster heeft een QR-code die leidt naar een bijbehorend filmpje. Bestellen kan eenvoudig door een mailtje te sturen naar bureau@nnv.nl. Geef dan ajb aan welk formaat je wilt ontvangen (A1 of A2).

Nederlandse Natuurkundige Vereniging (NNV)
www.nnv.nl
bureau@nnv.nl



2021: EEN BIJZONDER JAAR

Het zal u niet zijn ontgaan: de NNV bestaat dit jaar honderd jaar. Dankzij een speciale feestcommissie wordt het een jaar vol van activiteiten om dat jubileum te vieren. En uiteraard doet het NTvN daar van harte aan mee. In 2021 zal de voorkant van elk nummer opgesierd worden door het logo van 100 jaar NNV. In alle uitgaven gaan we aandacht besteden aan de jarige. Daarbij blikken we terug en kijken we vooruit.

In maart brengt het NTvN een speciaal jubileumnummer uit. De titel *De Robbert* verwijst naar de gastredacteur, Robbert Dijkgraaf, directeur van het Institute for Advanced Study in Princeton en erelid van de NNV. Een speciale deelredactie heeft in overleg met Robbert de inhoud van dit nummer samengesteld. Alle NNV-leden krijgen een extra exemplaar om weg te geven aan familie, in de vriendenkring of aan collega's die nog niet lid zijn van de NNV.

Traditiegetrouw besteden we in het januarinumnummer aandacht aan de Nobelprijs voor de Natuurkunde. In 2020 werd die toegekend voor baanbrekend werk aan de theorie van zwarte gaten en voor de experimentele ontdekking en waarneming van een zwart gat in het centrum van de Melkweg. Ook is er aandacht voor de selectieprocedure van de Nobelcommissie. Zo kon Albert Einstein de Nobelprijs voor de Natuurkunde 1921, het geboortjaar van de NNV, pas in 1922 in ontvangst nemen. Voor vrouwen lijkt er een einde gekomen aan de geringe waardering voor hun werk in de natuurkunde. Zowel in 2018 als in 2020 was één van de laureaten een vrouw. Een hoopvol teken dat wereldwijd natuurkundigen meer oog

krijgen voor de diversiteit onder de meest getalenteerde natuurkundigen.

Met ingang van dit nummer gaan we iedere maand een selectie van drie artikelen vrij toegankelijk op de NTvN-website zetten. De hoop is dat we hiermee, ondersteund met gerichte reclame op sociale media, meer geïnteresseerden zullen bereiken. We roepen onze lezers op om aan de promotie van het NTvN bij te dragen door de link naar de artikelen te delen. Meer verkeer naar de website zou die aantrekkelijker maken voor sponsors, maar vooral hopen we op deze manier nog meer natuurkundigen over te halen om lid te worden van de NNV. Dat zou een mooi verjaardagscadeau zijn.

Het jaar 2021 belooft een spannend jaar te worden, waarin hopelijk de COVID 19-pandemie tot staan kan worden gebracht. Ook natuurkundigen snakken naar echt menselijk contact met familie, vrienden en collega's. Als dat weer mogelijk is, wordt 2021 een nog mooier begin van een nieuwe eeuw voor de NNV.

Wij wensen onze lezers en de redactie een gelukkig en gezond 2021 en feliciteren de NNV van harte met haar honderdjarig bestaan.

De 87^{ste} editie van het NTvN is begonnen!

Anneke de Leeuw en Els de Wolf

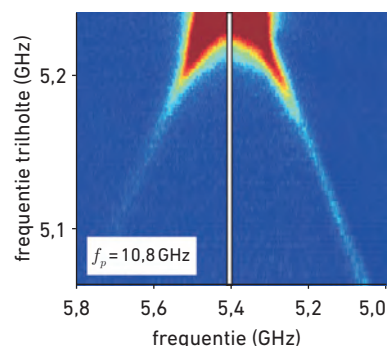
STRALENDE LEEGTE

Het vacuüm is niet leeg maar een chaos van deeltjes die kort opduiken en weer verdwijnen. Elektromagnetische ruis noemt de Utrechtse fysicus Henk Stoof het. “Er kan in principe van alles tevoorschijn komen, maar meestal kijken we alleen naar het verschijnen van fotonen.” De ruis kan zichtbaar worden gemaakt met een experiment dat Hendrik Casimir eind jaren veertig van de vorige eeuw bedacht [1]: door twee geleidende plaatjes heel dicht bij elkaar te brengen. “Hij voorspelde dat ze elkaar zouden aantrekken. Omdat het elektrisch veld op het plaatoppervlak nul is, moet de golflengte van de fotonen identiek zijn aan de plaatafstand. Buiten de platen is elke golflengte mogelijk, waardoor er daar een (fotonen-)overdruk ontstaat. Eind jaren negentig is dit Casimireffect bevestigd. Je moet overigens bedenken dat virtuele deeltjes in paren tevoorschijn komen en verstrengeld zijn. Bij een plots opduikend fotonpaar bewegen de twee deeltjes in tegengestelde richting.” Dat je de ruis ook letterlijk zichtbaar kunt maken, voorspelt het zogeheten dynamische Casimireffect (DCE), dat voor het eerst is beschreven door Gerald Moore. Heel simpel gezegd doe je dat door de virtuele deeltjes een flinke trap te geven, zegt Stoof. “Je moet het vacuüm verstoren door een spiegeletje extreem te versnellen of te laten oscilleren. Op die manier wordt er energie geleverd aan de leegte, zodat virtuele deeltjes werkelijke deeltjes worden en blijven bestaan.” Dat het DCE niet alleen maar een theoretisch verzinsel is, werd in 2013 aangetoond door een experiment aan de Aalto-universiteit in Finland [2]. Omdat het niet mogelijk is om een spiegel voldoende te versnellen, gebruikten de Finnen een trilholte die is afgesloten door een materiaal waarvan de brekings-

index razendsnel varieert. “Dat is het equivalent van een trillend spiegeletje, voor de fotonen lijkt het alsof de lengte van de trilholte varieert. Op het ene moment past een fotonpaar wel in de trilholte en kort daarna niet.”

De Finnen lieten zien dat de optelsom van de frequenties van de in het leven geroepen fotonen precies gelijk is aan de frequentie waarmee de brekingsindex varieert. Bijvoorbeeld: bij de door de Finnen gebruikte trilfrequentie van 10,8 GHz, kan het eerste foton een frequentie hebben van 5 GHz en het tweede 5,8 GHz. De gecorreleerde fotonen zijn geconcentreerd rond 5,4 GHz en vormen een soort zwaluwstaartpatroon rondom deze frequentie, te zien in figuur 1.

Er is ook een ander perspectief mogelijk op deze resultaten, zo stellen Gheorghe Sorin Paraoanu van de Aalto-universiteit en Göran Johansson van de Zweedse Chalmers Universiteit recentelijk [3]: dat van een versnellende waarnemer die een stuk vacuüm ziet. Onder meer Paul Davies en Bill Unruh redeneerden in de jaren zeventig van de vorige eeuw



Figuur 1. Spectrale intensiteit van in de trilholte waargenomen fotonen. De verticale balk markeert de helft van de pompfrequentie. Langs de verticale as staat de (manipuleerbare) resonantiefrequentie van de trilholte. Figuur uit [3].

dat waarnemers die ten opzichte van elkaar versnellen het niet eens zijn over de energietoestand van het vacuüm. Voor de versnellende waarnemer krijgt de leegte een temperatuur en bevindt hij zich daarom niet meer in de grondtoestand. De ruimte is daardoor niet meer leeg, maar gevuld met fotonen waarvan de energieën verdeeld zijn als bij een zwarte straler. Die temperatuur is volgens Unruh gekoppeld aan onder andere de versnelling en de constante van Planck. Paraoanu en Johansson bepaalden de temperatuur van de trilholte op basis van de effectieve versnelling van de brekingsindex en rekenden vervolgens het uitgestraalde vermogen uit via de wet van Stefan-Boltzmann. Volgens Paraoanu is dat vermogen een redelijke benadering van het totale fotonvermogen dat is gemeten in het Finse experiment uit 2013. “Dat er een link is tussen het DCE en het Unruheffect werd al langer vermoed. We hebben hiermee dat verband wat sterker gemaakt. Het werpt ook wat licht op een andere realisatie van het Unruheffect, de straling van een zwart gat. Volgens het equivalentieprincipe is er immers geen verschil tussen een versnelling en een zwaartekrachtsveld. Bij deze Hawkingstraling wordt een van de leden van een fotonpaar geabsorbeerd en door het zwarte gat krijgt het andere een bestaan. Hier grijpen quantummechanica en relativiteitstheorie in elkaar.”

REFERENTIES

- 1 H.B.G. Casimir, On the attraction between two perfectly conducting plates, *Proceedings KNAW* **51-7**, 793-795 (1948).
- 2 P. Lähteenmäki, G.S. Paraoanu, J. Hassel en P.J. Hakonen, Dynamical Casimir effect in a Josephson metamaterial, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110**, 4234 (2013).
- 3 G.S. Paraoanu en G. Johansson, Listening to the quantum vacuum: a perspective on the dynamical Casimir effect, *Europhysics News* **51-4**, 18-20 (2020).



HOMOGENEA PHYSICA

Daartoe uitgenodigd door een wetenschapshistoricus voor wie ik al eerder een tweetal schilderijen had gemaakt (over Planck en over Van der Waals) heb ik mij verdiept in de voor mij vrijwel onbekende wetenschapper Isaac Beekman (1588-1637). Behalve een dissertatie in 1618 over de derdedagskoorts heeft Beekman nooit iets gepubliceerd maar hij hield wel zijn leven lang een *Journal* bij, een soort van dagboek over alles wat hem bezighield. En dat was heel veel: filosofie, fysica, wiskunde, astronomie, theologie enzovoort. Delen van dat dagboek zijn in 1644 door Isaacs broer Abraham uitgegeven maar het *Journal* zelf leek verdwenen. Totdat het in 1905 werd teruggevonden in het stads-

archief van Middelburg, de geboorteplaats van Beekman en de plaats waar hij een aantal jaren werkzaam was in de kaarsenmakerij van zijn vader. Op 14 september 1620 beschreef Beekman in zijn dagboek wat hij noemde *homogenea physica*, combinaties van vier soorten atomen, corresponderend met de vier elementen water, aarde, vuur en lucht. Dergelijke combinaties van atomen die samen de deeltjes vormen waaruit alles is opgebouwd noemen we nu moleculen en je zou dus kunnen zeggen dat Beekman de eerste is geweest die dat concept heeft bedacht, in 2020 vierhonderd jaar geleden. Een prachtige aanleiding voor een schilderij. Van Beekman is geen portret bekend

en we zien hem dus op de rug, in gesprek met een jonge René Descartes, vlak bij zijn geboortehuis aan de Varkensmarkt in Middelburg. Links van de berk zijn een aantal inspiratiebronnen van Beekman afgebeeld: Euclides, Epicurus en *De Rerum Natura* van Lucretius. De grafiek (over de valwet) en de notenbalk zijn afkomstig uit het *Journal*. De banier met (een vrije interpretatie van) *homogenea physica* onttrekken de aloude Platonische veelvlakken bijna aan het zicht. De zwerm spreuwen daarboven vormen de letters L en C van Leiden en Caen waar Isaac heeft gestudeerd. Het plaveisel ten slotte is opgebouwd uit vier verschillende elementen en vormt zo een fraaie corpusculaire grondslag.

VERKIEZING NIEUWE NNV-VOORZITTER

In 2022 draagt Diederik Jekel de NNV-voorzittershamer over aan een nieuwe voorzitter; in dat jaar loopt namelijk zijn tweede voorzitterstermijn af en een voorzitter kan maximaal eenmaal worden herkozen.

Het is aan de NNV-leden om in februari 2021 de nieuwe voorzitter te kiezen, die overigens eerst een jaar lang als vicevoorzitter mee zal draaien in het bestuur. De stemming verloopt via de website www.nnv.nl. Het kiesproces wordt gecoördineerd door de kiescommissie, bestaande uit Gerard van der Steenhoven (voorzitter), Barbera Droste,

Guus Harms, Iwan Holleman, Piet Mulders en Noortje de Graaf.

Op 1 april 2021 wordt de winnaar van de verkiezing bekendgemaakt op de algemene ledenvergadering (alv) die ook dit jaar online plaats gaat vinden. De winnaar zal dan direct in functie treden als vicevoorzitter.

De kiescommissie is bijzonder verheugd om een prachtige kieslijst te kunnen presenteren. Drie NNV-leden hebben zich bereid verklaard om het voorzitterschap op zich te nemen, een ware luxe voor de vereniging! De kieslijst bestaat (in alfabetische volgorde) uit:

1. Christa Hooijer;
2. Petra Rudolf;
3. Sylvia Barlag.

Omdat de drie kandidaten elk een heel ander profiel hebben, is er dit jaar echt wat te kiezen.

Het volgende nummer van het NTvN bevat interviews met elk van de kandidaten waarin zij hun visie op de NNV uiteen zullen zetten. Ter introductie worden de drie kandidaatvoorzitters nu al kort voorgesteld.

De kandidaten

Christa Hooijer

Christa Hooijer startte in 2000, al tijdens haar promotie, als programmacoördinator bij Stichting FOM. In de jaren daarna groeide ze uit tot directeur van Stichting FOM, waarbij ze de dagelijkse leiding had over het geheel van de FOM-organisatie (circa 1100 personeelsleden). Ze was toentertijd onder meer eindverantwoordelijk voor de integratie van de FOM-organisatie in de nieuwe NWO-organisatie. Na enkele jaren directeur te zijn geweest van de institutenorganisatie van NWO, is Christa nu wetenschappelijk directeur bij de Unit Industry van TNO.

Petra Rudolf

Petra Rudolf is sinds 2003 hoogleeraar experimentele vastestoffysica aan de RUG. Daarvoor studeerde ze in Italië, promoveerde ze in België en deed ze onderzoek in de Verenigde Staten. Petra is hoofd van de groep Surfaces and Thin Films van het Groninger Zernike Institute for Advanced Materials. Hiernaast bekleedt zij ook diverse bestuursta-ken. In het verleden was Petra al



Christa Hooijer. Foto: Lucrees van Groningen.

voorzitter van de Belgian Physical Society en momenteel is zij voorzitter van de European Physical Society (tot april 2021).

Sylvia Barlag

Sylvia Barlag promoveerde in de experimentele deeltjesfysica. Tijdens haar studie deed Sylvia ook van zich spreken als topatlete en deelneemster aan de Olympische Spelen van 1980. Ze werkte achtereenvolgens bij CERN, het KNMI en bij Thales en heeft zodoende ervaring op velerlei gebied: fundamentele en toegepaste wetenschap en in het bedrijfsleven. Daarnaast is Sylvia bestuurder in de atletiekwereld, zowel op nationaal als internationaal niveau. Ze is aangewezen als technisch gedelegeerde voor het atletiekdeel bij de Olympische Spelen in Tokio.

De verkiezingsprocedure

Gedurende februari 2021 kunt u als NNV-lid via www.nnv.nl uw stem uitbrengen op een van de drie kandidaat-voorzitters; u ontvangt hiervoor een uitnodiging per e-mail. Om te stemmen dient u in te loggen op de NNV-site. U komt dan op het dashboard terecht, dat alleen toegankelijk is voor NNV-leden. Op dit dashboard kunt u uw eigen gegevens inzien zoals deze bij ons bekend zijn en ook kunt u stemmen voor de nieuwe voorzitter.

Voor het inloggen is het NNV-lidnummer plus een wachtwoord nodig. Het lidnummer staat altijd vermeld op de omslag van het NTvN, u kunt het echter ook opvragen via bureau@nnv.nl. Mocht u uw wachtwoord vergeten zijn, dan kunt u het opvragen via de site. Het is wel belangrijk dat wij uw juiste e-mailadres hebben, anders lukt het opnieuw aanvragen van uw wachtwoord niet. Check nu al eens of het inloggen op www.nnv.nl lukt, mocht u problemen ondervinden, kunt u contact opnemen met het NNV-bureau. En indien u ontdekt dat uw gegevens niet actueel zijn, horen wij dat ook graag via bureau@nnv.nl.



Petra Rudolf. Foto: Sylvia Germes.



Sylvia Barlag.

Kosmisch kegelen

Nobelprijs voor de Natuurkunde 2020

Je kunt het je nu nauwelijks meer voorstellen, maar er was ooit een tijd dat de algemene relativiteitstheorie (ART) niet helemaal serieus genomen werd. En dat 'ooit' is nog maar een ruime halve eeuw geleden. Vele natuurkundigen – en merkwaardig genoeg was Einstein een van hen – vonden het destijds problematisch dat de Einsteinvergelijkingen van de algemene relativiteitstheorie oplossingen hebben die singulariteiten in ruimte en tijd bevatten. De wiskunde zei dat die oplossingen bestaan, maar daaruit volgt niet noodzakelijk dat de beschreven ruimtetijdconstructies ook werkelijk voorkomen in ons heelal. Dat soort problemen was al lang bekend: bijvoorbeeld in de mechanica, waar de bewegingsvergelijkingen toestaan dat een slinger stil rechtop staat, wat in werkelijkheid nooit gebeurt. De eerste singuliere oplossing was het heelalmodel van Lemaître: een heelal met een eindige leeftijd, miljarden jaren geleden begonnen als een enkel punt van ruimte en tijd. Hoe weinig serieus sommigen dat namen, blijkt

onder andere uit de sarcastische benaming 'big bang' die Fred Hoyle verzong om te onderstrepen dat hij er helemaal niets van geloofde. Maar Stephen Hawking bewees in het beroemde vierde hoofdstuk van zijn proefschrift dat zo'n 'oerknal'-beginpunt generiek is: ieder ART-heelalmodel dat materie bevat heeft een beginsingulariteit.

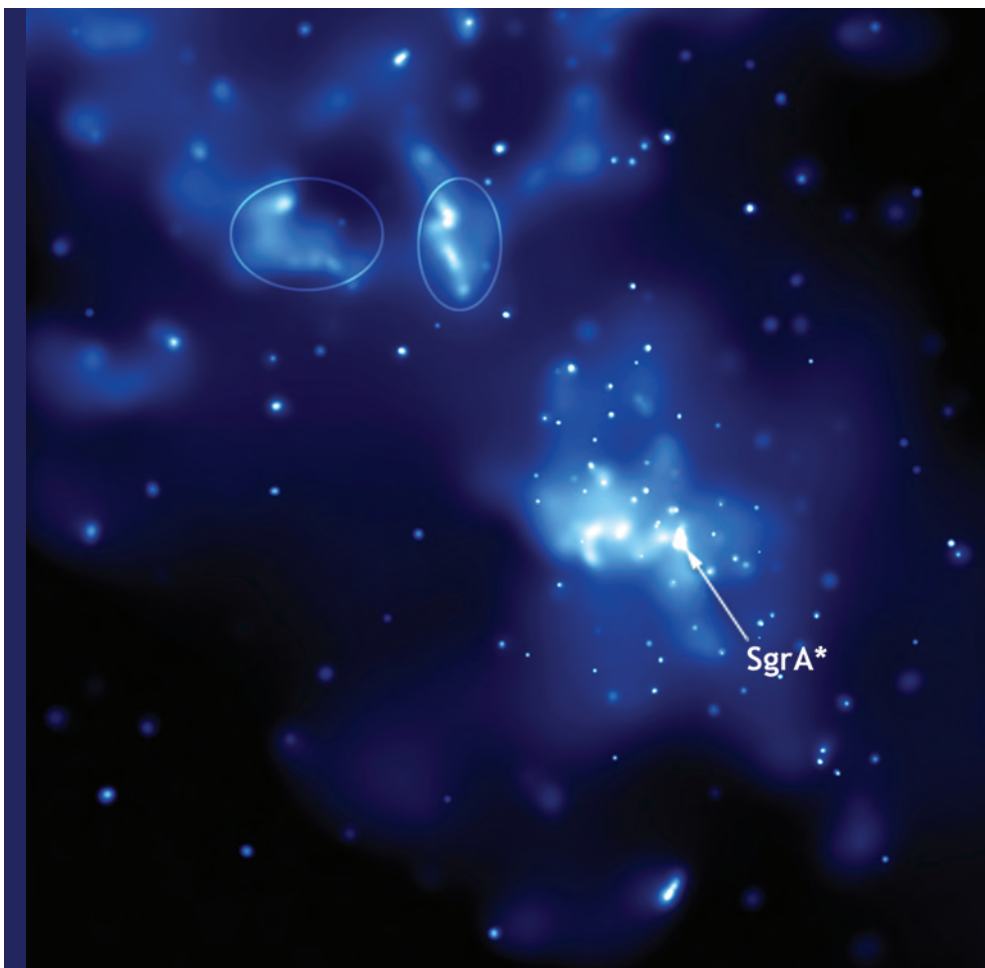
De tweede singuliere oplossing was de Schwarzschildmetriek, een stationaire bolsymmetrische oplossing van de algemene relativiteitstheorie met een singulariteit in het middelpunt, omringd door een bolvormige 'horizon': een oppervlak waarvoor materie en licht wel naar binnen kunnen, maar niet naar buiten. Spoedig daarna volgden soortgelijke oplossingen: eenje die elektrisch geladen is (de Reissner-Nordströmmetriek) en een cilindersymmetrische ruimtetijd (de Kerr-Newmanmetriek).

Tal van onderzoekers veronderstelden dat de centrale singulariteiten van zulke metrieken 'pathologisch' waren, en in werkelijkheid niet konden voorkomen, zoals genoemde slinger-op-z'n-kop. Maar Roger Penrose bewees, met

gebruik van Hawkings geometrische aanpak, dat singulariteiten onvermijdelijk ontstaan, en in die zin dus 'normaal' zijn. Zoals Hawking liet zien dat een ART-heelal een singulariteit heeft in het verleden, zo toonde Penrose aan dat elk gebied van verhoogde ruimtekromming een singulariteit heeft in de toekomst. Je kunt je daarbij afvragen: als Hawking niet was overleden, zou hij dan ook voor een Nobelprijs in aanmerking zijn gekomen? Het antwoord is niet eenvoudig, want er waren in de jaren rondom 1960 veel meer fysici die pionierden met deze meetkundige methoden.

Lokale Lorentzsymmetrie

De sfeer over die merkwaardige oplossingen van de algemene relativiteitstheorie was in de jaren 1950-1960 duidelijk aan het omslaan. De term big bang, oftewel oerknal, werd een geuzennaam voor de beschrijving van het heelal op grote schaal. John Archibald Wheeler bedacht de naam *black hole* (zwart gat) voor de singuliere oplossingen met een horizon waarvoor materie en licht wel naar binnen



Een door de Chandra-telescoop gemaakte röntgenfoto van de Melkweg met daarin het zwarte gat Sagittarius A* (Sgr A*). Foto: NASA/CXC/Caltech/M.Muno et al.

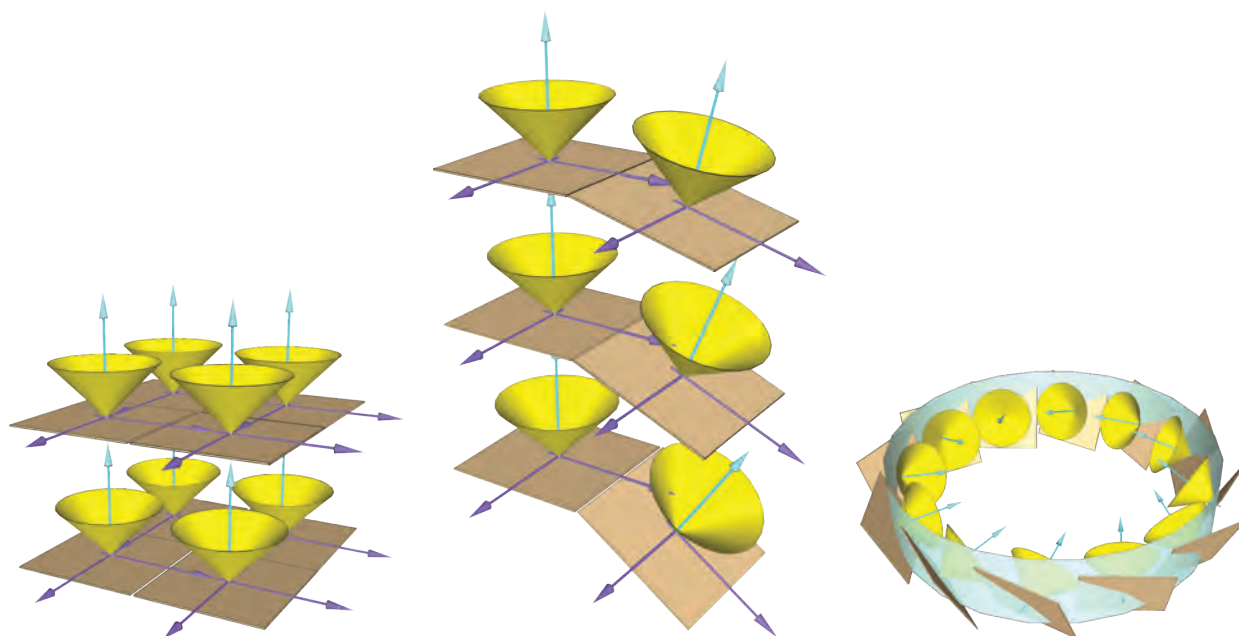
kunnen maar niet naar buiten. Penrose was een van de hoofdrolspelers op het ART-toneel. Zijn briljante wiskundige inzicht – buiten de sterrenkunde en kosmologie vooral bekend door zijn verbluffende niet-periodieke Penrose-tegelpatronen – maakte diepgaand gebruik van het meetkundige karakter van de algemene relativiteitstheorie. Om te zien hoe dat werkt gaan we even terug naar de speciale relativiteitstheorie. Dat is een vorm van mechanica waarin alle snelheden relatief zijn, behalve die van het licht, dat altijd met dezelfde snelheid c beweegt. Welke verandering je in ons heelal ook aanbrengt, die c is altijd dezelfde. De lichtsnelheid is invariant, wat wil zeggen dat het heelal symmetrisch is onder een grote klasse transformaties die c onveranderd laten. Die opmerkelijke eigenschap heet Lorentzsymmetrie. Dankzij de invariantie van de lichtsnelheid kan de meetkunde van ruimte en tijd worden opgebouwd uit een enkel element: de 'lichtkegel'. Kies een punt in de ruimte op een bepaalde tijd. Laat daar een lichtflits los. In de loop van

de tijd breidt dat licht zich uit als een bol rondom dat punt. Daarmee ontstaat een $3+1$ -dimensionale vorm die altijd en overal dezelfde is, omdat de lichtsnelheid onveranderlijk is. Dat die vorm een kegel is kun je je makkelijker voorstellen in een tweedimensionale ruimte. Denk bijvoorbeeld aan de rimpeling van water waarin een steen geworpen wordt: die breidt zich uit als een cirkel in de loop van de tijd. Stapel je die tweedimensionale cirkels op in de richting van de tijd, dan krijg je een $2+1$ -dimensionale kegel. Het volledige beeld bestaat uit een oneindig veld van lichtkegeltjes die allemaal met hun symmetrie-as (dat is de richting van de plaatselijke tijd) in dezelfde richting staan. Lichtstralen bewegen overal langs de oppervlakken van de lichtkegel. De 'vrije beweging' van een waarnemer wordt gegeven door een lijn die langs de assen van de opeenvolgende lichtkegels loopt (figuur 1, links). De opstelling van de lichtkegels legt dus een netwerk over tijd en ruimte. Daardoor is de relativiteitstheorie een meetkundige theorie, zoals Hermann

Minkowski als eerste benadrukte. Het recept voor de structuur van tijd en ruimte is: neem een lichtkegel en zet die ergens neer. Zet de volgende daarnaast en ga zo door totdat de lichtkegels de ruimtetijd geheel vullen. De enige beperking is dat de richtingen van de assen niet abrupt mogen veranderen van punt tot punt. Dat is alles. Aan dit bouwvoorschrift is direct af te lezen dat er geen grens is aan het aantal bouwsels dat met lichtkegels kan worden gemaakt. Maar er zijn er slechts enkele die niet veranderen in de loop van de tijd. De meest voor de hand liggende is de vorm van ruimtetijd die ontstaat door alle lichtkegels keurig in het gelid te zetten, zoals in figuur 1 links. Er zit in deze constructie geen enkele variatie: waar je ook bent in tijd en ruimte ziet het er overal hetzelfde uit. Deze vorm heet dan ook een platte ruimtetijd.

De platte ruimtetijd is uniek, alle andere hebben meer structuur en zijn dus gekromd. Immers, de vorm van die lichtkegel is wel overal dezelfde, maar aan de oriëntatie is geen enkele beperking opgelegd, behalve dan dat die niet plotseling van punttjdstip tot punttjdstip mag veranderen. De vorm van de lichtkegel wordt bepaald door de invariantie van de lichtsnelheid, zoals vastgelegd in de Lorentzsymmetrie. De oriëntatie kan van alles zijn (figuur 1 midden).

Het patroon van de lichtkegels wordt strikt voorgeschreven door de Einsteinvergelijkingen, een bruto pakket partiële differentiaalvergelijkingen die zo weerbarstig zijn dat betrouwbare numerieke oplossingen pas sinds een tiental jaren berekend kunnen worden. Wie de algemene relativiteitstheorie 'elegant' vindt, zoals de fysicamode voorschrijft, moet voor straf deze formules in zo veel detail uitschrijven dat je er echt mee kunt rekenen. Des te knapper van Hawking en Penrose dat zij de meetkundige essentie eruit wisten te destilleren. Het boek *The large scale structure of space-time*



Figuur 1. Links: schikking van lichtkegels zoals gezien door een waarnemer op zeer grote afstand. De ruimtetijd is geheel gevuld met lichtkegels, die in dit geval netjes in het gelid staan. Dit noemen we een 'platte ruimte', die ontstaat door een globale Lorentzsymmetrie. Midden: de oriëntatie van de lichtkegels verschilt in dit geval van punt-tijdstip tot punt-tijdstip. De lijnen van tijd en ruimte moeten overal plaatselijk steeds loodrecht op elkaar staan. Maar als ze over grotere afstanden met elkaar verbonden worden krijgen we een gebogen netwerk: deze ruimtetijd is gekromd. We hebben hier te maken met een lokale Lorentzsymmetrie. Rechts: lichtkegels en horizon (lichtblauw) van een draaiend zwart gat.

dat Hawking en George Ellis daarover schreven was een wetenschappelijke sensatie. Daarin werd de dynamica van ruimtetijd neergezet met uitleg en illustraties zoals in bovenstaande figuren, die de onderliggende differentiaalmeetkunde van de algemene relativiteitstheorie bijna tastbaar maakten.

Het baanbrekende werk van Penrose en zijn navolgers kwam ruwweg hierop neer: als de lichtkegels ten opzichte van elkaar gekanteld zijn, en je zet die kanteling voort volgens het ART-recept, dan vormt zich in de toekomst vanzelf een gesloten oppervlak dat de lichtkegels geheel omvat. Dat is een horizon (figuur 1 rechts). Ook bleek dat het oppervlak van zo'n horizon niet kan afnemen. Kortom: zwarte gaten zijn onvermijdelijk.

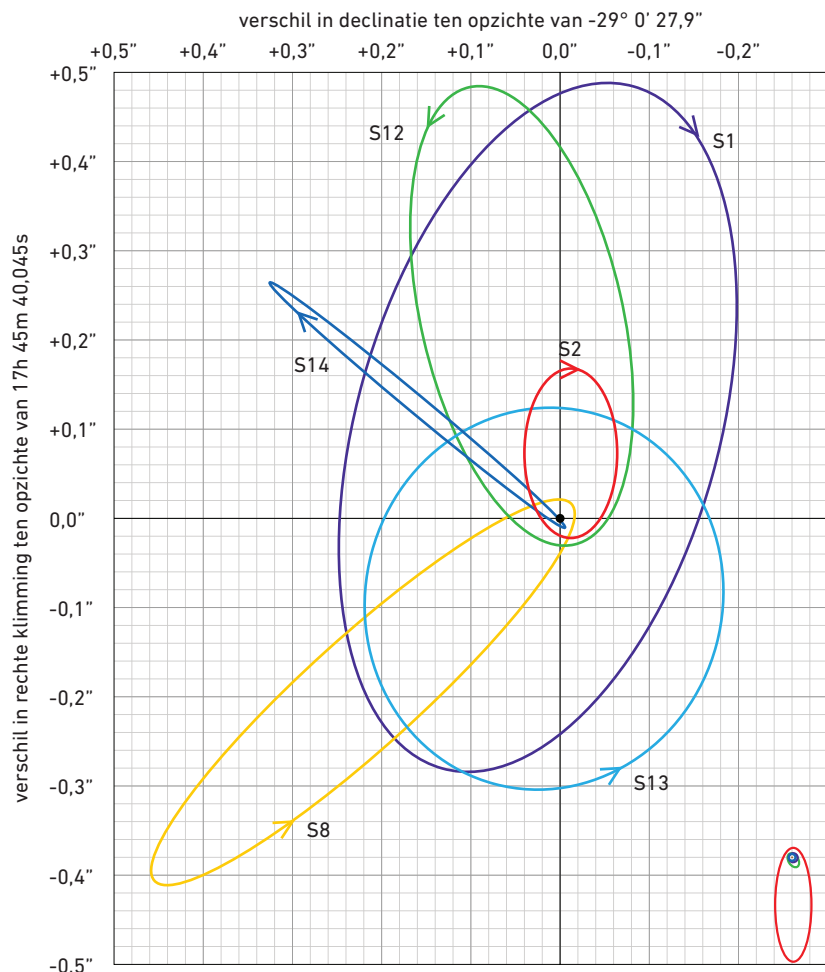
Midden in de Melkweg

Tot zover de wiskunde, maar toch bleef de vraag: bestaan die zwarte gaten wel echt? Omdat ze uit de aard der zaak onzichtbaar zijn, kunnen zwarte gaten alleen worden opgespoord door

wisselwerking met hun omgeving. Omstreeks dezelfde tijd dat Penrose en zijn collega's de consequenties van de algemene relativiteitstheorie in kaart brachten, begonnen sterrenkundigen steeds grotere en betere telescopen en instrumenten te ontwikkelen. Dankzij geweldig verbeterde waarneemtechnieken ontdekten zij bronnen van energie die zo klein en zo krachtig zijn, dat kernfusie – zoals die optreedt in sterren – bij lange na niet voldoende is om die verschijnselen te verklaren. Actieve kernen van sterrenstelsels en bronnen van röntgenstraling in dubbelsterren bleken uitstekende kandidaten te zijn voor zwarte gaten. Materie die door een zwart gat wordt opgeslokt beweegt, gezien van grote afstand, met de lichtsnelheid zodra de horizon wordt gepasseerd. Dat accretieproces is zo heftig dat een deel van de materie wordt omgezet in energie, die waarneembaar is net buiten de horizon. De aanwijzingen voor het bestaan van zwarte gaten waren talrijk, maar toch waren ze nogal indirect. Sterrenkundigen hadden de radiobron in

het centrum van de Melkweg, bekend als Sagittarius A* (Sgr A*), boven aan hun lijstje staan van zwartgatkandidaten. Reinhard Genzel en Andrea Ghez, zowel als vele anderen, zetten een campagne op touw om Sgr A* zo scherp mogelijk in beeld te krijgen. De instrumentele technieken die zij gebruikten en deels ontwikkelden zijn nog complexer om uit te leggen dan de theorie (dat zie je wel vaker). Kortweg komt het hierop neer. Het gas en stof tussen de sterren van de Melkweg – de 'interstellaire materie' – verstrooit en absorbeert het licht dat door de ruimte reist. De afstand van de zon tot Sgr A* is 24.000 lichtjaar en omdat de zon in het vlak van de Melkweg beweegt (waar zich de meeste interstellaire materie bevindt), is de zichtlijn naar Sgr A* uiterst ongunstig. Kijken naar het centrum van de Melkweg lijkt dus op het bestuderen van het leven op de bodem van een troebele sloot. De stralengang van het licht wordt verstoord door de rimpelingen van het wateroppervlak en onderscheept door de drab in het

water. Vanaf de wallenkant ziet het beeld van een piepklein lampje op de slootbodem eruit als een dansend stel lichtvlekjes. Maar omdat je weet dat de bron een punt was, kun je – mits je bliksemsnel kunt rekenen en reageren – het beeld corrigeren. De invloed van de drab kun je proberen te omzeilen door te kijken bij een golfengte die zo min mogelijk last heeft van de modder. Genzel en Ghez slaagden erin om het twinkelen van de sterren, dat ontstaat door de atmosfeer van de aarde, weg te poetsen. Dat lukte door hun telescopen en detectoren razendsnel zodanig aan te passen dat de vervormingen van de golffronten van het inkomende licht werden rechtgetrokken. Een van de technieken die de European Southern Observatory (ESO, een samenwerking van zestien landen) daarvoor gebruikt is een kunstmatige ster, een laserbundel die vanaf de telescoop omhoog is gericht en een puntje aan de hemel vormt, zoals het lampje op de bodem van de sloot. Dankzij ultramoderne detectoren konden zij nabij-infrarode golfengten gebruiken, die enigszins door het interstellair stof heen kunnen dringen. Daarbij natuurlijk veel tijd, veel geduld en ook nog flink wat geluk (bijvoorbeeld met financiering en waarnemingsperiode). Achter deze Nobelprijs staan uiteraard talloze ongelauwerde ingenieurs en andere wetenschappers, net als meestal gebeurt bij de Nobelprijzen voor CERN-wetenschappers (behalve dan bij Simon van der Meer). Vanaf 1992, en in de loop van de volgende decennia stug doorwerkend, brachten zij de baanbewegingen in kaart van een dozijn sterren rondom Sgr A*. Uit de posities en de dopplerverschuivingen werden de driedimensionale banen gereconstrueerd (figuur 2). Snelheden tot 7000 km/s (2,5% van de lichtsnelheid) werden gemeten op een afstand tot het centrale object die slechts driemaal groter is dan de afstand tussen de zon en Pluto. Dat object moet dus een zwart gat zijn, met een massa van vier miljoen zonsmassa's, waarvan de horizon tienmaal kleiner is dan de baan van de aarde. Op internet zijn verbluffende filmpjes van die sterbanen te vinden [1].



Figuur 2. De banen van zes van de snelste sterren rondom het zwarte gat in Sagittarius A*. De horizontale as meet 0,8 boogseconden, dat is 2400 maal kleiner dan de baan van Pluto (uiterst rechtsonder in de figuur, paars) past losjes in het kleinste vierkantje van het grafiekenpapier. Bron: Wikimedia Commons - cmglee.

Een helft van de Nobelprijs voor de Natuurkunde 2020 gaat naar Roger Penrose voor zijn bewijs dat het ontstaan van zwarte gaten een normaal verschijnsel is in de algemene relativiteitstheorie. De andere helft wordt gedeeld door Reinhard Genzel en Andrea Ghez voor het aantonen van een superzwaar zwart gat in het centrum van de Melkweg. De Nobelprijs kun je opvatten als lof voor lef, naast uiteraard erkenning voor een uitzonderlijke prestatie in theorie en/of experiment. De prijs in 2020 is een duidelijk voorbeeld van alle drie: theorie voor Penrose, experiment voor Genzel en Ghez en lef voor alle drie plus al hun medewerkers.

Een van de herderlijke vermaningen die ik mijn studenten en promovendi meegeef, is: denk niet te snel dat iets onmogelijk is. De laureaten hebben zwarte gaten niet plompverloren buiten de orde verklaard, maar de consequenties van de algemene relativiteitstheorie serieus genomen. Reeds Galilei zei: “Zoals in de wiskunde, zo ook in de natuur”. Dat is niet altijd waar, maar vooral dankzij het werk van Penrose, Genzel en Ghez is in dit geval gebleken dat zwarte gaten echt bestaan.

NOOT
 1 Bijvoorbeeld https://en.wikipedia.org/wiki/Sagittarius_A*.

De wrok van Arrhenius

De beginjaren van de Nobelprijzen voor de Natuur- en Scheikunde

De Nobelprijs bezit al meer dan een eeuw een ondefinieerbare magie. De toekenning transformeert eenvoudige stervelingen in bovenmenselijke genieën. De levens van de laureaten veranderen ingrijpend, mede doordat zij op slag publieke figuren worden. De enorme zichtbaarheid van de bekroning contrasteert met de waas van geheimzinnigheid rond de besluitvorming in de Nobelcomités en de Zweedse Academie van Wetenschappen. In 1976 besloot de Nobelstichting haar archieven open te stellen voor onderzoekers, althans voor het eerste

deel van de vorige eeuw. Dat maakte het mogelijk een kijkje te nemen achter de schermen. Daaruit kunnen we bijvoorbeeld leren hoe Nederlandse fysici aan hun Nobelprijs kwamen.

Svante Arrhenius

Alfred Nobels testament bestemde de natuur- en scheikundeprijzen voor die “ontdekkingen” of “uitvindingen” gedurende het “voorafgaande jaar” met het meeste “profijt voor de mensheid”, ongeacht de nationaliteit van de persoon in kwestie. De prijzen dienden te worden uitgereikt door de Zweedse Koninklijke Academie van Wetenschappen. De daar later aan toegevoegde statuten legden de procedure vast. Het permanente recht op nominatie werd voorbehouden aan alle leden van de Academie (dus niet alleen natuur- en scheikundigen),

aan leden van de Nobelcomités, aan eerdere prijswinnaars en aan alle hoogleraren verbonden aan de toenmalige Scandinavische universiteiten. Bij deze laatste drie categorieën gaat het enkel om vertegenwoordigers van het te bekronen vakgebied. Daarnaast werden ieder jaar op een ad-hocbasis buitenlandse hoogleraren in elk van beide vakgebieden uitgenodigd om kandidaten te nomineren. De evaluatie van de nominaties werd uitbesteed aan de twee vijfhoofdige Nobelcomités, een voor de natuurkunde en een voor de scheikunde, waarvan de leden werden gekozen door de Academie. Hun voordracht werd van commentaar voorzien door de natuur- en scheikundesecties van de Academie, die zelf in voltallige zitting het uiteindelijke besluit nam. Het is gezien de wijze waarop deze machinerie was opgetuigd weinig verrassend dat de Zweden van begin af aan een sterk stempel drukten op de bekroningen. Veelal werden de nominaties georkestreerd door de leden



Het laboratorium van Svante Arrhenius in Stockholm. Foto: Wikipedia - Staffan Bergwik.

van de comités of van de Academie. Die hadden zo hun eigen opvattingen over goede en slechte wetenschap en sommigen hadden moeite hun eigen voorkeuren terzijde te schuiven. Daarbij was de Zweedse academische wereld een slangenkuil, geregeerd door onderlinge haat en nijd. Die animositeit gold niet alleen voor de verhouding tussen de eerbiedwaardige en wat stoffige Universiteit van Uppsala en de modernere Hogeschool van Stockholm, ook binnen die instellingen kon het flink knetteren. Een van de invloedrijkste Zweedse wetenschappers was de prominente chemicus Svante Arrhenius, lid van het natuurkundecomité, maar daardoor niet minder betrokken bij de scheikundeprijzen. Die gingen opmerkelijk vaak naar vertegenwoordigers van het nieuwe onderzoeksveld van de fysische chemie, Arrhenius' eigen specialisme. En wie het ooit gewaagd had enige vorm van kritiek te uiten op het werk van Arrhenius kon een Nobelprijs gevoeglijk vergeten, ongeacht

het aantal nominaties. De Rus Dmitri Mendeleev kon er over meepraten. Mogelijk speelde de krachtige samenwerking die Arrhenius zelf in het begin van zijn carrière ondervonden had daarbij een rol. In Uppsala moesten zijn leermeesters weinig hebben van zijn pogingen om een dieper fysisch inzicht te verwerven in chemische processen. Het onderzoek moest hij noodgedwongen elders verrichten en de negatieve beoordeling van zijn proefschrift leek een academische carrière in de weg te staan. Hij werd gered door de fysisch-chemicus Wilhelm Ostwald die hem naar Leipzig haalde, waar zij, tezamen met de Nederlander Jacobus Henricus Van 't Hoff, het nieuwe vakgebied op de kaart wisten te zetten. Zijn groeiende reputatie leverde Arrhenius een bescheiden aanstelling in de natuurkunde op aan de Hogeschool van Stockholm, maar het kostte hem de nodige strijd en de nodige jaren om er een leerstoel te verwerven en nog veel meer tijd en strijd om een plek in de Academie te veroveren. Zijn

lidmaatschap van zowel het Nobelcomité als de Academie én zijn formidabele internationale netwerk boden hem veelal de kans de procedure naar zijn hand te zetten en daarbij wat oude rekeningen te vereffenen. Zelf kreeg Arrhenius al in 1903 de Nobelprijs voor de Scheikunde, hoewel hij had laten doorschemeren een prijs voor de natuurkunde te prefereren. Dat zijn voormalige wapenbroeder Van 't Hoff in 1901 de eerste Nobelprijs voor de Scheikunde kreeg was nauwelijks verrassend, hoewel de vele nominaties voor de onlangs naar Berlijn uitgeweken Nederlander de zaak ongetwijfeld vergemakkelijkten. Andere grote namen in de scheikunde hadden hun doorbraken al te ver achter zich liggen. Nobels "voorafgaande jaar" werd weliswaar van begin af aan geïnterpreteerd als 'recent', maar het duurde even voordat men het begrip recent tot enkele decennia durfde op te rekken. Dat 'even' was precies een jaar, want in 1902 maakte organisch chemicus Oskar Widman zich met succes

sterk voor zijn held Emil Fischer, een oude coryfee uit de organische chemie. In 1905 had Widman wederom succes met zijn lobby voor Adolf von Baeyer, wiens synthese van indigo zelfs terugging naar de jaren 1860. Arrhenius' oude bondgenoot Ostwald kreeg de prijs in 1909, ondanks een gering aantal nominaties en pas na zijn bekering tot het atomisme én een succesvolle lobby van Arrhenius.

Nederlandse natuurkundigen

Interessanter voor ons is de achtergrond van de bekroning van Hendrik Antoon Lorentz in 1902, direct na de onvermijdelijke Wilhelm Conrad Röntgen. Dat Lorentz de prijs zo snel kreeg was een wonder in het licht van de afkeer van de Zweedse fysici van puur theoretisch werk. De aanstichter was Zwedens toonaangevende wiskundige Gösta Mittag-Leffler, iemand met een groot gezag binnen de Academie, maar eveneens een notoire ruzieschopper. Mittag-Leffler wenste zich niet neer te leggen bij de uitsluiting van wiskundigen. Hij beoogde een prijs voor zijn goede vriend Henri Poincaré. Nu had de wiskundige Poincaré bijdragen geleverd op het gebied van de mathematische fysica, dus daar lagen mogelijkheden. Er moest evenwel behoedzaam gemanoeuvereerd worden. Het was beter eerst een precedent te creëren door middel van de bekroning van een voltijds theoretisch fysicus. De keuze viel op Lorentz. Poincaré werkte graag mee aan het opzetje. Hij schreef een krachtige aanbeveling voor Lorentz en verzekerde zich van de steun van de voltallige Franse natuurkundige gemeenschap. Dat Lorentz als theoreticus geen empirische ontdekkingen had gedaan was weliswaar een handicap, maar niet onoverkomelijk. Had hij immers geen belangrijke bijdrage geleverd aan de recente ontdekking van Pieter Zeeman? En zo zag de nog jonge Zeeman zijn ontdekking bekroond met de Nobelprijs. Aldus won Mittag-Leffler de eerste slag, maar voor het winnen van de oorlog was meer nodig. Zijn voornaamste vijand was niemand anders dan Arrhenius. Mittag-Leffler had eerder

stelling voor Arrhenius in Stockholm te blokkeren, waarbij hij zelfs de hulp van Poincaré had ingeroepen. Zijn bemoeienis met de fysicaprijs had mede als doel een bekroning van Arrhenius zelf of van diens favorieten te voorkomen. In 1908 had Arrhenius zich in het natuurkundecomité sterk gemaakt voor Max Planck. In diens theoretische werk aan de straling van een zwart lichaam zag hij een welkome ondersteuning voor de atoomhypothese. Mittag-Leffler vergat op slag zijn warme gevoelens voor de theoretische fysica en informeerde de Academie dat Plancks werk berustte op de dubieuze aanname van 'energiequanta'. In de voordracht waren die wijselijk verzwegen. De geschikte Academie wees de voordracht af en bekroonde Gabriel Lippmans werk aan kleurenfotografie. In 1910 achtte Mittag-Leffler na eerdere halfslachtige pogingen de tijd rijp voor Poincaré. Een krachtige campagne resulteerde in een stortvloed van nominaties voor de Franse wiskundige, waaronder die van Lorentz en Zeeman. Ook wist Mittag-Leffler zich te verzekeren van de steun van een lid van het Nobelcomité in de persoon van de astrofysicus Bernhard Hasselberg, een uitgesproken tegenstander van theoretisch werk, maar meer nog van Arrhenius. Hasselberg zag nu plotseling het licht en redeneerde dat wiskundige vergelijkingen ook een instrument tot ontdekkingen konden zijn. Als het zou lukken om de voorzitter van het natuurkundecomité Knut Ångström, de zoon van de vermaarde Anders Ångström, mee te krijgen, zou Arrhenius volgens Hasselberg geïsoleerd raken. Het zou echter anders lopen. De zieke Ångström had voor het eerst zelf een nominatie gekregen en zijn twee Uppsala-collega's in het comité meenden zijn voordracht te moeten steunen. Nu vergat Arrhenius plotsklaps zijn grondige afkeer van Uppsala en schaarde zich volmondig achter Ångström, waardoor die een meerderheid in het comité vergaarde. Helaas voor Arrhenius overleed Ångström plotseling en omdat men in het Nobelcomité vermoedde dat de Academie weinig voor een postume prijs zou voelen, besloot men een

nieuwe kandidaat naar voren te schuiven, een taak waarmee Arrhenius zich maar al te graag belastte.

Uit de prullenbak van reeds verworpen kandidaten viste Arrhenius de aloude Johannes Diderik Van der Waals, die eveneens maar één enkele nominatie had gekregen. Eerder hadden de fysici, in dit opzicht kritischer dan de chemici, zijn baanbrekende werk te gedateerd gevonden. In zijn evaluatierapport wees Arrhenius er nu echter op dat zijn toestandsvergelijking ten grondslag lag aan de recente triomfen van Heike Kamerlingh Onnes. Goed beschouwd had Van der Waals' werk nu pas een daadwerkelijke experimentele bevestiging gevonden. Dat dat werk al lang volledig geaccepteerd was, negeerde hij gemakshalve. In zijn eindrapport benadrukte Arrhenius dat Poincaré's verdiensten primair op het gebied van de wiskunde lagen. Geen enkele fysische bijdrage sprong er voldoende uit voor een bekroning. Ondanks 34 nominaties, een opmerkelijk record, had Poincaré het nakijken. De prijs ging naar Van der Waals; Poincaré zou hem niet meer krijgen.

Gezien deze voorgeschiedenis lag een snelle bekroning van Kamerlingh Onnes voor de hand, zeker na de Leidse ontdekking van supergeleiding in 1911. Inderdaad waren er het jaar daarop tal van nominaties voor Kamerlingh Onnes en het natuurkundecomité had het dat jaar dan ook betrekkelijk gemakkelijk. Kamerlingh Onnes werd voorzichtigheidshalve voorgedragen voor de vloeibaarmaking van helium in 1908. Het leek, kortom, een inkopertje, maar dat was buiten de Zweedse ingenieurs gerekend. Meer nog dan de wiskundigen voelden zij zich miskend en genegeerd door hun fysische en chemische collega's. Dat sentiment leefde ook buiten Zweden. Thomas Edison had al aangekondigd een eventuele bekroning te zullen weigeren vanwege de structurele miskening van de toegepaste wetenschap. Ging het Nobel niet juist om profijt voor de mensheid? Na het nodige lobbywerk door de ingenieurs in de Academie werd de voordracht van de fysici afgewezen. Het moest een ingenieur worden en liefst een Zweedse. De

gelukkige was Gustaf Dalén, genomineerd door één Zweedse collega voor zijn geautomatiseerde vuurtoren, een ongetwijfeld vernuftige, maar nauwelijks wetenschappelijke bijdrage. Kamerlingh Onnes moest nog maar een jaartje wachten.

Albert Einstein

Na de Eerste Wereldoorlog was er van het internationale karakter van de wetenschap maar weinig over. Dat geleerden tijdens de oorlog elkaar wederzijds verketterd hadden en Duitse wetenschappers na de oorlog nog acht jaar lang werden uitgesloten van internationale congressen en verenigingen, sprak wat dat betreft boekdelen. De 'neutrale' Zweden gooiden olie op het vuur door de Scheikundeprijs voor 1919 uit te reiken aan Fritz Haber, de man wiens gifgas tijdens de oorlog dood en verderf hadden gezaaid. Opvallend genoeg leed het prestige van de Nobelprijzen hier nauwelijks onder. De Zweedse fysici worstelden vooral met de recente ontwikkelingen in de fysica. Hadden ze al grote moeite met het werk van de jaar in jaar uit genomineerde Planck, het bleek nog veel onorthodoxer te kunnen. De nieuwe hoofdpijndossiers waren de atoomtheorieën van Bohr en Sommerfeld en de relativiteitstheorieën van Einstein. Die laatste werd in 1919 voorpaginanieuws na de opzienbarende verificatie van de door zijn theorie voorspelde afbuiging van het licht door de zon. De dreiging van de nieuwe quantumtheorieën kon voorlopig nog even worden afgewend door in 1919 dan toch maar Planck te bekronen. Maar wat moest men aan met Einstein? In het verleden had men het handjevol nominaties voor Einstein simpelweg genegeerd. In 1920 regende het echter nominaties en leek wegstijgen niet langer een optie. Maar ook deze keer bleek een groot aantal nominaties niet afdoende. Arrhenius slaagde er wederom in de ogenschijnlijke favoriet doeltreffend uit te schakelen. In een afzonderlijk rapport wees hij op de onzekerheden rond Einsteins theorie. De Britse metingen tijdens de zonsverduistering konden niet als bevestiging gelden, gezien de resterende vragen over hun

exactheid. De door de theorie voorspelde gravitationele roodverschuiving in het sterrenlicht was vooral nog niet waargenomen. Bleef over de anomale precessie van het perihelium van Mercurius, maar dat was volgens Arrhenius te weinig, zeker in het licht van de steeds luider klinkende kritiek van Duitse anti-relativisten als Philipp Lenard, die hij aan het eind van zijn rapport citeerde. De prijs ging uiteindelijk naar Charles Édouard Guillaume, de Zwitserse directeur van het in Parijs gevestigde Internationale Bureau van Maten en Gewichten, genomineerd door welgeteld één persoon, een landgenoot. Het was een geste aan de oude en zieke Hasselberg, die als Zweeds metroloog nauw met Guillaume had samengewerkt. De Zwitsers en Fransen waren verrukt, de rest van de wereld met stomheid geslagen. Het jaar daarop was het aantal nominaties voor Einstein nog verder toegenomen. Dit keer mocht de Zweedse medicus Alvar Gullstrand het beulswerk verrichten. Deze oogheekundige had in 1911 de Nobelprijs voor de Geneeskunde gekregen, maar zag zichzelf tevens als natuurkundige. De gewenste uitbreiding van zijn leeropdracht bracht hem in het natuurkundecomité. Anders dan Arrhenius had hij geen twijfels over Einsteins theorie: die was onmiskenbaar fout. Zijn requisitoir telde vijftig pagina's en was gebaseerd op elke kritische kanttekening die hij om het even waar had kunnen vinden. De conclusie was helder. Verwijder alle fouten en onbewezen speculaties uit Einsteins theorieën en wat resteert is simpelweg de vertrouwde klassieke mechanica. De 'echte' fysici in het comité boden hem weinig weerstand. De Academie was minder snel overtuigd. Men kwam er uiteindelijk niet uit waarop besloten werd dat jaar dan maar geen prijs uit te reiken, zoals men dat ook tijdens de voorafgaande oorlogsjaren had gedaan. Pas het jaar daarop vond het nieuwe comitélid Carl Wilhelm Oseen, hoogleraar theoretische fysica in Uppsala, een uitweg uit de impasse, met steun van de inmiddels bekeerde Arrhenius. Einstein kon met terugwerkende kracht worden bekroond voor

de voorspelling van het in 1916 door Robert Millikan bevestigde verband tussen de frequentie van op een metaal vallend licht en de energie van de daardoor vrijgemaakte elektronen. En zo geschiedde.

Conclusie

Achteraf gezien is het gemakkelijk schamper te doen over de eigenwijze, kibbelende en zo nu en dan mistastende Zweden. Wetenschappelijke verdiensten evalueren is een minder exacte wetenschap dan het met geavanceerde middelen onderzoeken van de natuur. Onze waardering voor andermans werk wordt nu eenmaal onvermijdelijk gekleurd door eigen overtuigingen, sympathieën, achtergrond en kennis, en zeker ook belangen, hoe graag we dat ook willen ontkennen. Hoewel de toekenningen van de laatste decennia minder excentriek lijken dan die uit de beginjaren, is de procedure niet wezenlijk veranderd. Nog steeds beslist een relatief klein aantal wetenschappers over de uitverkiezing. De afwegingen en discussies die daaraan voorafgaan onttrekken zich volledig aan ons zicht. Pas als de archieven over enkele decennia opengaan, kunnen we een beter beeld krijgen, zoals we dat nu ook hebben van de beginjaren. Opvallend is wel de voorkeur voor een betrekkelijk klein aantal specialismen binnen de natuur- en scheikunde, zoals atoomfysica, deeltjesfysica en moleculaire scheikunde. Wellicht waren die deelgebieden vruchtbaarder, interessanter of eenvoudiger zichtbaarder dan de meeste anderen, maar het kan ook een weerspiegeling zijn van de samenstelling van de comités of een uitvloeisel van het beruchte Mattheusprincipe. Hoe dit ook zij, de glans van de prijzen lijkt er niet onder te lijden.

BRONNEN

- 1 Robert Marc Friedman, *The Politics of Excellence. Behind the Nobel Prize in Science*, New York (2001).
- 2 Frits Berends en Dirk van Delft, Lorentz: Gevierd fysicus, geboren verzoener, Amsterdam (2019).
- 3 Pietro Nastasi, *A Nobel Prize for Poincaré?*, *Lettera Matematica International* 1: 79-82 (2013).
- 4 John Ioannidis, *Work honored by Nobel prizes clusters heavily in a few scientific fields*, *PLoS ONE* 15(7): e0234612 (2020).

Het modelleren van infectieziekten vanuit het perspectief van statistische fysica

Terwijl we dit schrijven, leven we midden in een pandemie veroorzaakt door het nieuwe coronavirus SARS-CoV-2 (die de ziekte COVID-19 veroorzaakt). Deze pandemie begon als een uitbraak in de Chinese stad Wuhan aan het einde van 2019 en verspreidde zich agressief in ongeveer vier maanden over alle continenten. Het is ondertussen duidelijk geworden dat het virus zich verspreidt via lucht, direct contact en indirect contact via objecten. Momenteel is de tweede golf infecties in heel Europa een feit en er zijn geen indicaties dat het virus spoedig zal uitdoven. Meer dan ooit wordt er daarom wereldwijd veel onderzoek gedaan naar de verspreiding van infectieziekten en het voorspellen van uitbraken, opdat lokale gezondheidsinstanties ze in de toekomst snel kunnen indammen. Dit brengt ons bij een wetenschapsveld dat al enkele maanden centraal staat in het nieuws: epidemiologie. In dit artikel laten we zien dat, misschien minder bekend, dit veld vrij veel connecties heeft met de statistische fysica.

Laten we eerst een paar epidemiologische termen introduceren. Veel infectieziekten komen op een normaal, stabiel niveau voor in een populatie. Cholera, bijvoorbeeld, wordt nul tot negen keer per jaar in Nederland gerapporteerd, en veel soa's zijn in Nederland ook voorbeelden van relatief stabiel voorkomende ziekten. Dit normale niveau noemen we het endemische niveau van de ziekte. Een epidemie gaat om een sterke, vaak plotselinge, verhoging van het aantal geïnfecteerden. De nog hevigere pandemie is door de WHO kwalitatief gedefinieerd als "een epidemie verspreid over de hele wereld, of in een wijdverspreid gebied, die veelal een groot aantal mensen raakt." Etymologisch gezien komt het woord epidemiologie van het Griekse *epi* (aan, over), *demos* (bevolking) en *logos* (het woord of de studie): 'de wetenschap over datgene onder de bevolking', waar de studie van infectieziekten onder valt. Vóór COVID-19 heeft de wereld in de afgelopen eeuw al enkele andere pandemieën doorstaan, met als bekendste de Spaanse Griep in 1918, hiv in de jaren negentig van de vorige eeuw en SARS in 2003, waarvan vooral de laatste uitvoerig bestudeerd is door epidemiologen. Maar de geschiedenis van de epidemiologie gaat nog veel verder terug. Het idee dat kleine deeltjes (zoals virussen) een rol spelen bij besmettingen is in die geschiedenis niet altijd voor de hand liggend geweest. In de Middeleeuwen, bijvoorbeeld, was de consensus (de miasmatheorie) dat veelvoorkomende ziekten als cholera, chlamydia en de builenpest veroorzaakt werden door miasma, een sterk riekende lucht. Als vader van de moderne epidemiologie wordt gewezen naar John Snow. Hij was halverwege de negentiende eeuw lid van het Koninklijke College van Artsen in Engeland en herleidde de cholerauitbraak van 1854 in Londen tot een lokale besmette waterput [1]. Sinds de tijd van Snow is het veld van de epidemiologie uitgebreid en is de rol van data-analyse en modelleren sterk toegenomen. Ruwweg bevat het modelleren van infectieziekten twee hoofdelementen: (a) de pathogene transmissie van het ene individu naar het andere, en (b) de ontwikkeling van een ziekte binnen een besmet individu. Beide elementen zijn in principe gebaseerd op onze kennis

van de fysiologie van de mens. Hoewel elk menselijk lichaam uniek is, proberen wetenschappers bijvoorbeeld de relevante transmissieaspecten te identificeren, zoals de hoeveelheid virusdeeltjes, het menselijk gedrag, het klimaat (zaken waarvan de anderhalvemeterregel voor COVID-19 zijn afgeleid) en de rol van de vatbaarheid van de ontvanger. Ook voor de ziekteontwikkeling binnen het individu is veel biologische kennis nodig, in verband met het berekenen van de kans op herstel en op sterfte. Deze biologische aspecten zijn over het algemeen behoorlijk onzeker en afhankelijk van veel factoren. Om recht te doen aan deze onzekerheden, gebruiken wetenschappers methoden die erg lijken op concepten uit de statistische fysica. Bij de bespreking hiervan zullen we zo veel mogelijk de natuurkundige terminologie gebruiken.

De klassieke benadering om de ontwikkeling van een infectieziekte te modelleren is geïntroduceerd door Kermack en McKendrick in 1927 [2]. Geïnspireerd door dit onderzoek werd het onderzoeklandschap in de twintigste eeuw sterk gedomineerd door ziektecompartimentmodellen, waarin de bevolking werd opgedeeld in compartimenten van ziektestadia. Een bekende versie van dit model is het SIR-model, dat de compartimenten 'vatbaren' (*S* van *susceptibles*), 'geïnfecteerden' (*I* van *infected*) en 'herstelden' (*R* van *recovered*) bevat. Bij besmetting zou een individu worden verplaatst van de groep vatbaren (*S*) naar de groep geïnfecteerden (*I*), en bij een herstel zou een individu van de groep geïnfecteerden (*I*) naar de groep herstelden (*R*) overgaan. In geval van sterfte wordt een individu verwijderd uit zowel de groep geïnfecteerden als uit de populatie. Veel moderne, en ook geavanceerdere, modellen zijn op dit SIR-model gebaseerd. Wiskundig gezien worden deze drie groepen beschreven door een systeem van differentiaalvergelijkingen. In het SIR-model hebben deze vergelijkingen twee constante parameters β (besmetting) en μ (herstel), en is de aanname dat de bevolking homogeen met elkaar mengt: er is noch enige notie van ruimte (waar de individuen zich bevinden), noch onderscheid tussen individuen anders dan op basis van hun compartiment. Vanuit een statistisch-fysisch perspectief kunnen we de onzekerheden in de patho-

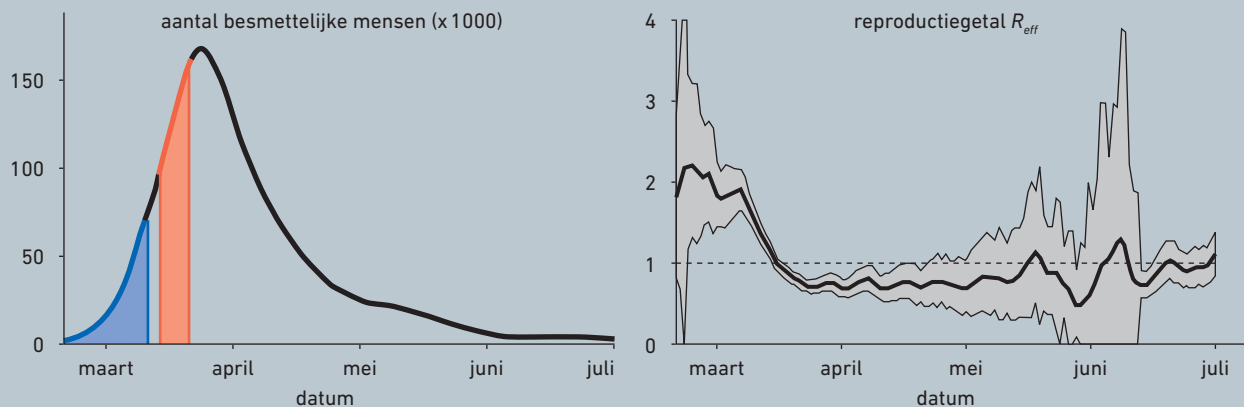


Debabrata Panja is universitair docent en medeoprichter en vice-directeur van het Centre for Complex Studies aan de Universiteit Utrecht. Hij doet onderzoek naar statistische fysica, materialen en complexe systemen. D.Panja@uu.nl



Mark M. Dekker is promovendus Informatica aan de Universiteit Utrecht, met specialisatie netwerktheorie. Samen met organisaties als NS, ProRail en CBS doet hij onderzoek naar mobiliteit.

ONDERZOEK



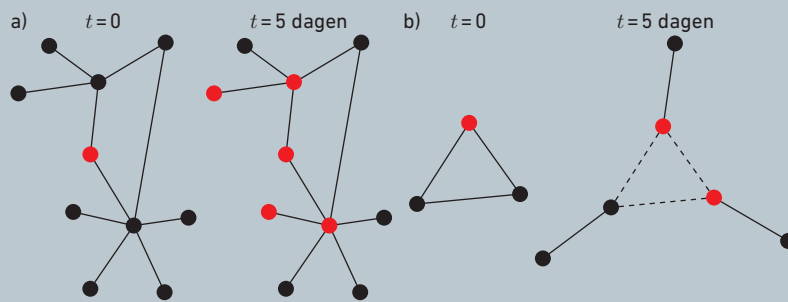
Figuur 1. Illustratie van berekeningen van R_0 en $R_{\text{eff}}(t)$ (zie tekst voor definities). Links: aantal besmettelijke mensen van COVID-19 tussen maart en juli 2020 in Nederland (bron: RIVM), R_0 kan alleen worden berekend over het eerste (blauwe) gedeelte, en is dus constant, terwijl $R_{\text{eff}}(t)$ over elk ander gedeelte (bijvoorbeeld het rode) kan worden berekend. Rechts: $R_{\text{eff}}(t)$ in Nederland in 2020, inclusief onzekerheidsmarge (bron: RIVM). Uit deze curve kunnen we afleiden dat $R_0 \approx 2$ voor deze ziekte in Nederland.

gene transmissie van het ene individu naar het andere en in de ontwikkeling van een ziekte binnen een besmet individu (de eerder genoemde elementen a en b) meenemen door besmetting (van S naar I) en herstel (van I naar R) te zien als stochastische processen. De aanname van homogene menging en de geassocieerde parameters komen neer op de aanname dat deze als Poissonprocessen verlopen, waardoor we de intercompartimentale dynamica kunnen beschrijven met deterministische snelheidsdifferentiaalvergelijkingen (*rate equations* in het Engels). Deze vergelijkingen zijn herkenbaar voor een statistisch fysicus; ze hebben dezelfde vorm als reactievergelijkingen voor een chemisch proces. Bijvoorbeeld, waar in het reactiesysteem $B + A \rightarrow 2A$, een B-molecuul, bij contact met een A-molecuul, verandert in een A-molecuul, herkennen we eigenlijk precies dezelfde vergelijking in de $S \rightarrow I$ verandering, wanneer een vatbaar individu bij contact met een besmet individu, besmet raakt ($S + I \rightarrow 2I$). Merk op dat de oplossing voor deze vergelijking een exponentiële groei voor het aantal A-moleculen in de tijd inhoudt, als men een oneindige aanvoer van B-moleculen aanneemt – met een constante parameter (zie het kader). In compartimentsmodellen zoals hierboven beschreven, kunnen de snelheden van het transport van indi-

viduen van het ene compartiment naar het andere alleen a posteriori worden bepaald door het analyseren van de aantallen individuen per compartiment als functie van tijd in echte data van een epidemie. Dit is op zichzelf al een uitdaging, die nog versterkt wordt doordat mensen hun gedrag aanpassen en gezondheidsorganisaties interventies uitoefenen, zodat de ‘natuurlijke gang’ van de besmetting wordt aangepast (zie volgende paragraaf). Deze corrigerende factoren zijn afwezig in het begin van een epidemie, als alle compartimenten praktisch leeg zijn (behalve de groep vatbaren), zodat men in deze vroege fase inderdaad de exponentiële groei van het aantal geïnfecteerden over de tijd kan zien, zoals de oplossing van de differentiaalvergelijkingen voor de compartimentmodellen voorschrijft.

Vanuit het perspectief van de publieke gezondheidszorg, echter – zoals pijnlijk duidelijk is voor COVID-19 – zijn we voornamelijk geïnteresseerd in het aantal geïnfecteerde mensen N_I , aangezien dit getal de hoeveelheid ziekenhuisopnames en druk op de zorgsystemen bepaalt. Alhoewel N_I in eerste instantie sterk groeit, verwacht men dat dit getal uiteindelijk weer daalt. In een SIR-model wordt N_I gemodelleerd aan de hand van twee factoren. Ten eerste groeit N_I door nieuwe besmettingen ($S \rightarrow I$), die

afhankelijk zijn van S en I . Dat betekent onder meer dat zodra het aantal vatbare mensen (S) afneemt, de groei van N_I ook afneemt. Ten tweede wordt N_I verminderd door het herstellen van mensen ($I \rightarrow R$). Als in het begin van de epidemie het aantal vatbare mensen nog niet zo sterk is afgenomen, kun je de oplossing van dit model benaderen met een exponentiële groei van N_I in de tijd. Hierbij is de exponent $\mu(\beta/\mu - 1)t$, waarbij $\beta - \mu = \mu(\beta/\mu - 1)$ aangeeft hoe snel de ziekte zich verspreidt. De dimensieloze constante β/μ is het beroemde reproductiegetal R_0 , zodat de groei van n_I is beschreven door $N_I(t) = N_I(0) \exp[(R_0 - 1)\mu t]$. De waarde R_0 kan worden geïnterpreteerd als het gemiddelde aantal nieuwe besmettingen dat veroorzaakt wordt door één besmet individu per eenheid van hersteltijd en kan a posteriori dus worden bepaald door het eerste gedeelte (blauw in figuur 1 links) te fitten met de genoemde exponentiële functie. Analoog hieraan kan men een dergelijke functie in het verdere verloop van de epidemie ook fitten (zoals over het rode gedeelte), waarbij men de niet-constante $R_{\text{eff}}(t)$ verkrijgt. Dit resulteert in de beroemde curve van het reproductiegetal (figuur 1 rechts), die de Nederlandse overheid presenteert op het dashboard coronavirus. Echter, er geldt: elk model is zo goed als de aannames waarop het is



Figuur 2. Netwerken van individuen (knooppunten of *nodes*) en hun contacten (takken of *links*) op verschillende momenten in de tijd. Rood betekent geïnfecteerd, zwart betekent vatbaar. In a zien we een statisch netwerk, dat niet verandert in de tijd. In b zien we een netwerk dat wel verandert in de tijd. Bijvoorbeeld, drie mensen die samen in een vliegtuig zitten op $t=0$ en bij aankomst allemaal hun eigen weg gaan op $t=5$.

gebaseerd. Hoewel compartimentmodellen het modelleren van infectieziekten in de twintigste eeuw hebben gedomineerd, realiseert iemand met enige kennis van statistische fysica zich al snel dat het modelleren van de overgang tussen compartimenten als Poissonprocessen impliciet homogeniteit aanneemt in (i) individuele eigenschappen (dat wil zeggen: iedereen en al het gedrag is hetzelfde) en (ii) in fysieke ruimte en tijd (oftewel de bevolking is te allen tijde volledig gemengd). Daar stopt natuurlijk de analogie met chemische reacties: de interactie tussen en de aard van moleculen is veel homogener dan mensen en hun interacties zijn – met verschillende mobiliteitspatronen, sociale netwerken en fysiologie. De compartimentmodellen zijn daarom in de laatste decennia van de twintigste eeuw uitgebreid met extra compartimenten om rekening te houden met leeftijdsgroepen of geografische verschillen. En om de stap te nemen naar de state-of-the-artmodellen voor infectieziekten, zetten we hieronder eerst een stap in de richting van de sterk opkomende wetenschap van netwerken. Alhoewel netwerkanalyse (of grafentheorie in de wiskunde) al lang bestond, werd aan het einde van de jaren negentig netwerktheorie vrijwel een nieuw veld op zich. Waar in eerste instantie de focus was gericht op topo-

logische aspecten als knopen en taken (statistische fysici die bekend zijn met percolatie en *force chains* in granulaire materie zullen veel netwerkconcepten herkennen), ontwikkelde het veld zich snel richting dynamische aspecten van zowel dynamiek op netwerken (waar het netwerk zelf constant is) en dynamiek van netwerken (waarin de netwerktopologie verandert). Al snel kwamen deze concepten ook in de epidemiologie terug [4], wat leidde tot de studie van netwerkepidemiologie als een samenvoeging van netwerktheorie en epidemiologie. Hierin werd ziekte-trans-

missie gemodelleerd als een dynamisch proces op een vaststaand netwerk met de individuen als knopen en hun respectievelijke contacten als links. Er is een grote verscheidenheid aan dergelijke modellen, maar we zullen er hier enkele bespreken die de aanname over homogeniteit van individuen (aanname i) loslaten en de aanname over homogeniteit in fysieke ruimte en tijd (aanname ii) nog vasthouden. Met inachtneming van verschillen in contactnetwerkgraad van een individu (*contact network degree* oftewel het aantal verbindingen in het netwerk per individu), vormen ze in wezen een klasse van hybride modellen: compartimentmodellen maar dan op een tijdsinvariant netwerk met gespecificeerde personen (figuur 2a). In het begin van de eenentwintigste eeuw leidden deze hybride modellen tot nieuwe formules van epidemiologische variabelen als de R_0 . Dankzij deze modellen is de rol van *superspreaders* als belangrijke drijfveer achter epidemieën onder de aandacht gebracht: mensen die in het contactnetwerk een abnormaal hoge contactgraad hebben. Anekdotisch zien we ook bij COVID-19 signalen van evenementen die leidden tot een veel hogere contactgraad van de deelnemers dan normaal, zoals feesten, sportevenementen, kerkdiensten, bruiloften en begrafenis en specifiek het Brabantse carnaval in Nederland in het voorjaar van 2020. Er is ook wetenschappelijk

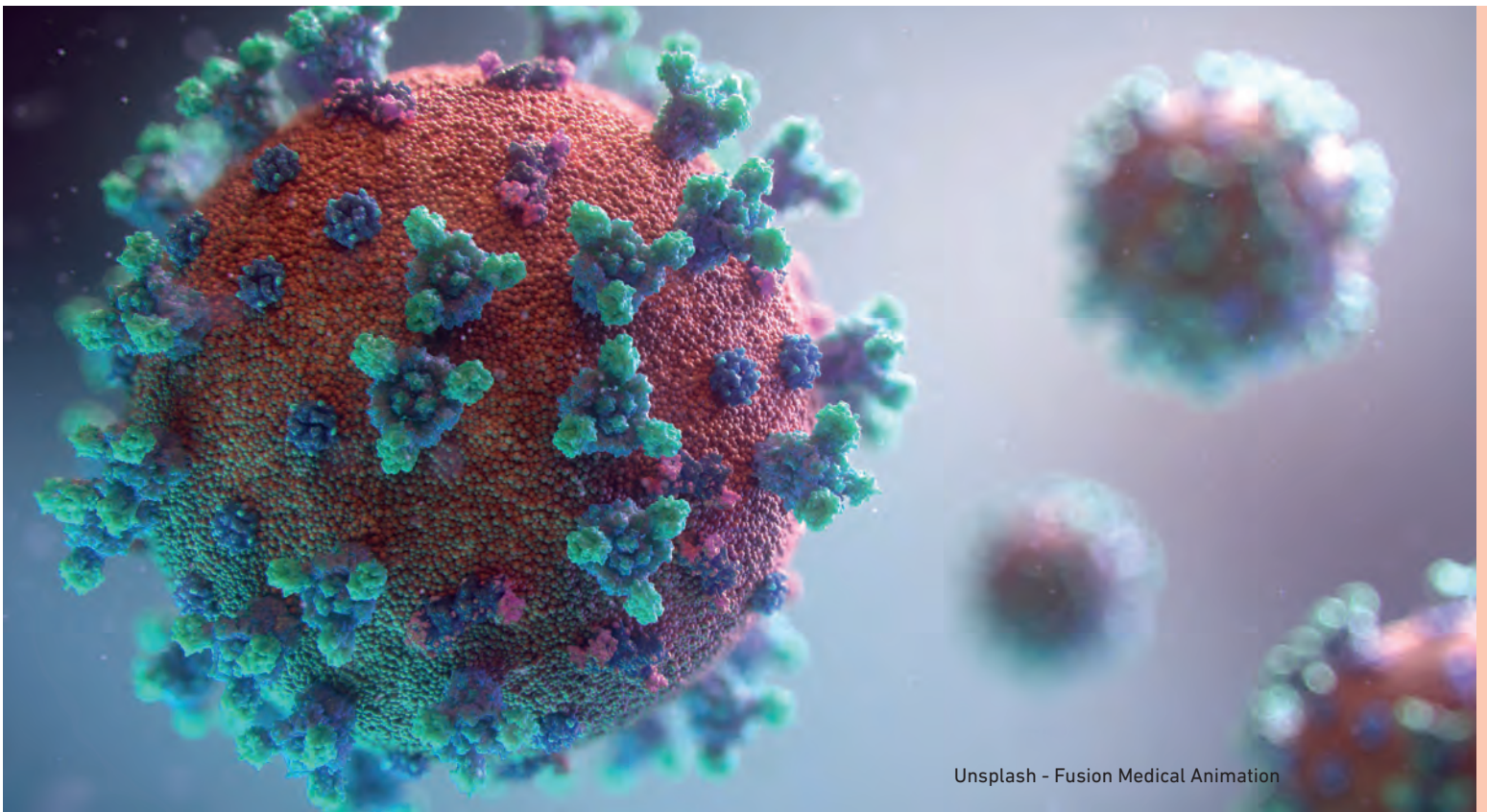
EXPONENTIËLE GROEI VAN HET AANTAL GEÏNFECTEERDE PERSONEN VOOR HET POISSONPROCES BESCHREVEN DOOR $S+I \rightarrow 2I$

Noem het aantal vatbare en geïnfecteerde personen op tijd t respectievelijk $N_I(t)$ en $N_S(t)$. Op dezelfde wijze refereren we naar de verandering in $N_I(t)$ tussen tijdstappen t en $t+dt$ met het symbool $dN_I(t)$. Voor de totale populatiegrootte gebruiken we N . Omdat we het beschrijven als een Poissonproces, vinden de contacten tussen individuen plaats met een vaste snelheid β per tijdseenheid. Merk op dat voor de reactie $S+I \rightarrow 2I$ het contact moet plaatsvinden tussen een vatbaar en een besmettelijk persoon. Dat een besmettelijk persoon een vatbaar iemand tegenkomt, is proportioneel aan $N_S(t)/N$. Met die redenering komen we aan bij de differentiaalvergelijking:

$$dN_I(t) = (\beta dt) N_I(t) \frac{N_S(t)}{N}$$

Aan het begin van een epidemie geldt: $N_S \approx N$. Deze benadering geeft ons de oplossing van de differentiaalvergelijking hierboven:

$$N_I(t) = N_I(0) \exp(\beta t).$$



Unsplash - Fusion Medical Animation

bewijs voor de rol van superspreaders in het beïnvloeden van de verspreiding van infectieziekten, zoals in hiv-uitbraken [5]. Echter, het is lastig de contactgraad van een grote groep mensen nauwkeurig in te schatten.

In de laatste tien jaar is een trend in netwerkepidemiologie gaande om meer nadruk te leggen op modellen op individueel niveau die ook de aanname van homogeniteit in ruimte en tijd laten vallen (aanname ii). Dat komt omdat epidemiologen zich steeds meer realiseren dat mens-tot-menscontact erg heterogeen is in ruimte en tijd: het contactnetwerk zoals geïllustreerd in figuur 2a moet eigenlijk dynamisch zijn, omdat de volgorde van wie elkaar wanneer, waar en hoe lang ontmoet van belang is. Het resultaat is een nieuw paradigma dat wordt gebouwd op temporale netwerken in plaats van statische netwerken [6], waarin contacten tussen individuen zich vormen en breken in een bepaald tijdsbestek. (In termen van de statistische fysica zijn temporale netwerken nauw verwant met dynamische percolatie.) Dit paradigma verbindt netwerkepidemiologie met dynamiek van netwerken in plaats van dynamiek op netwerken (figuur 2b). Alhoewel modellen in dit nieuwe paradigma meer ontwikkeld zijn dan de compartiment-

modellen of hybride modellen, eisen ze ook veel meer en nauwkeurigere data en meer rekenkracht van computers. Ondanks alle nieuwe ontwikkelingen zullen modelvoorspellingen in epidemiologie nooit perfect zijn: ze zullen nooit precies de tijd, locatie en betrokkenen van een epidemie en diens ontwikkeling kunnen voorspellen, als gevolg van het belang van kansen en toevalligheden op alle niveaus van verspreiding. Wetenschappers worden geconfronteerd met nog complexere uitdagingen, namelijk het modelleren van individuele contacten in de geografische ruimte. Dit ruimtelijk modelleren zou het mogelijk maken menselijke mobiliteit te koppelen aan temporale contactnetwerken. Daarbij moet bij het ontwerp van de modellen ook nog rekening worden gehouden met (1) het adaptief gedrag van mensen tijdens een epidemie/pandemie, (2) de bruikbaarheid van de output voor beleidsmakers ten behoeve van strategiebeoordeling en controle en (3) de mogelijkheid om met behoud van accuratesse op te schalen naar lands- of wereldschaal. Al deze uitdagingen zijn afhankelijk van de nauwkeurigheid en beschikbaarheid van data, en (computer)rekenkracht, en zullen nog veel werk vergen van de wetenschap. Gedetailleerde data zijn

helaas niet makkelijk verkrijgbaar. Ook al worden grote hoeveelheden data geproduceerd, bijvoorbeeld via mobiele telefoonnetwerken en gps, is slechts weinig hiervan toegankelijk voor onderzoek. De belangrijkste reden hiervan is natuurlijk privacy en de gerelateerde Algemene verordening gegevensbescherming (AVG). Internationaal gezien worden hier verschillende keuzes in gemaakt. Waar de één tijdens deze pandemie genoeg reden ziet om zijn of haar data te delen, is de ander daar voorzichtiger in. En zelfs als de wetenschap zeer gedetailleerde data zou kunnen bemachtigen, zullen veel onzekerheden in epidemiologische studies blijven, omdat de onderliggende processen stochastisch zijn.

REFERENTIES

- 1 J. Snow, *On the mode of communication of cholera*, tweede editie (1955).
- 2 W.O. Kermack en A.G. McKendrick, *A contribution to the theory of epidemics*, *Proc. R. Soc. Lond.*, **A 115**, 700-721 (1927).
- 3 N.G. van Kampen, *Stochastic processes in physics and chemistry*, derde editie (2007).
- 4 M.E.E. Kretzschmar en M. Morris, *Measures of concurrency in networks and the spread of infectious disease*, *Math. Biosci.* **133**, 165-195 (1996).
- 5 S. HELLERINGER en H.P. KOHLER, *Sexual network structure and the spread of HIV in Africa: Evidence from Likoma Island, Malawi*, *AIDS* **21**, 2323-2332 (2007).
- 6 P. Holme en J. Saramäki, *Temporal networks*, *Phys. Rep.* **519**, 97-125 (2012).

1902 - 1907 - 1905

Een hypothese is een veronderstelling met een uitdagend karakter. In *La Science et l'Hypothèse* (1902) behandelt Poincaré de waarde van aannames in de wetenschap en een beetje grimmig constateert hij dat in de natuurkunde geen gebrek is aan hypothesen, “les hypothèses, c'est le fonds qui manque le moins”. Waarin ligt de waarde van gissingen en vooronderstellingen?

Einstein hield van gedachtenexperimenten, kon aardig viool spelen en had bewondering voor Mozart. Maar zou Einstein ook goed kunnen zingen, dansen of schilderen? Een schilderij vervaardigd door Einstein... valt dat voor te stellen? Zeker, dat is helemaal niet zo vreemd. Omgekeerd, zou Picasso affiniteit hebben met een natuurkundige theorie? Kon hij daar belangstelling voor opbrengen? Zou hij er iets mee kunnen doen? Een aardige veronderstelling, maar een stuk minder gemakkelijk te beantwoorden dan de vorige. Een dergelijke interesse bij zo'n kunstenaar lijkt nogal onwaarschijnlijk...

Toch is dat onterecht. Picasso was niet onbekend met de ontwikkelingen in de toenmalige wis- en natuurkunde. Hij bevond zich in een kring van Parijse intellectuelen en dichters die discussieerden en gebruikmaakten van Poincarés gedachtegoed.

Zo heeft Poincaré een gedurfde beschrijving gegeven van de mogelijkheid om de vierdimensionale wereld ‘te zien’. Neurale netwerken (*sensations musculaires*) maken het mogelijk om objecten waar te nemen. Wanneer dat eenmalig gebeurt, vanuit één positie, is dat de alledaagse ervaring. Wanneer iemand in staat is de verschillende perspectieven van hetzelfde object in één keer direct vast te houden, overstijgt hij de driedimensionale beperking. Meervoudige beelden vormen nu een geheel. Het proces van verschillende observaties wordt in één moment vastgelegd.

Voor zijn metier had Picasso uitgesproken opvattingen over ruimte. Hij was een uitstekend geschoolde schilder en wist hoe hij structuren en vlakken op het doek moest indelen. Ongetwijfeld heeft hij geprofiteerd van de opvattingen van Poincaré over geometrie en waarneming om de werkelijkheid op een andere wijze te presenteren. Zijn kubistische periode is een voorbeeld van niet-euclidische meetkunde, resulterend in *Les Demoiselles d'Avignon* (1907).

Poincaré bestreed de veronderstellingen omtrent de ether, evenals de verdichtingen en gaten die erin zouden zitten... “notre éther, existe-t-il réellement?”. Daarnaast maakte hij kritische opmerkingen over het bestaan van massalozie positieve elektronen, beschreef hij de raadsels omtrent het foto-elektrisch effect en twijfelde hij aan de gebruikelijke beschrijvingen van de brownse beweging. Zoals de twintigjarige Picasso in zijn kennissenkring overlegde over de ideeën van Poincaré, zo deed zijn leeftijdsgenoot Einstein dat met zijn vrienden van het Bernse patentbureau. De jonge fysicus vond de ether overbodig, de opvattingen van Lorentz over elektromagnetisme onjuist en hij formuleerde de werkelijkheid op een heel andere manier. Zijn oplossingen vormden de basis voor het annus mirabilis 1905.

Hypothesen vormen de start van elke vorm van denken. Zij gaan voorbij aan de waarheid, negeren elk individueel belang, zij vormen de basis voor een vervolg, voor een toetsing. Ze wijzen de weg naar nieuwe en verre perspectieven en appelleren daarmee aan de creativiteit van de toekomstige Albert Picasso en Paloma Einstein.

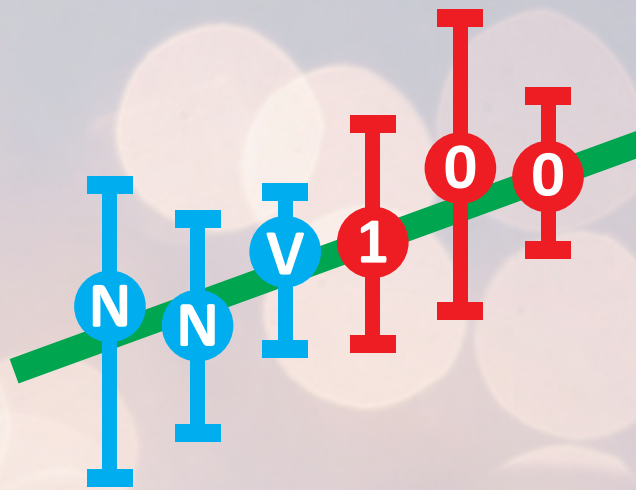
Frans Kingma (www.frans-kingma.com) maakte voor deze column gebruik van de biografische schetsen en ideeën van Arthur I. Miller over Einstein en Picasso.

Honderd jaar NNV: feest!!

In 2021, om precies te zijn op 2 april, is het honderd jaar geleden dat de NNV werd opgericht. Alle reden om in 2021 een mooi jubileumjaar te organiseren. De NNV is grote dank verschuldigd aan alle fysici die in de loop der jaren hun steentje bij hebben gedragen aan de vereniging. Om te beginnen aan de oprichters, waaronder drie Nederlandse winnaars van de Nobelprijs voor de Natuurkunde: Heike Kamerlingh Onnes, Pieter Zeeman en Hendrik Lorentz. Dankzij al die generaties natuurkundigen, zijn we honderd jaar later nog steeds een bloeiende vereniging van en voor fysici. Tijd om dit te vieren! Het organisatiecomité heeft tal van verschillende activiteiten opgezet. Het thema van deze activiteiten is om naar de nabije en verdere toekomst in de volgende honderd jaar van ons bestaan te kijken. Daarbij richten we ons behalve op de NNV-leden ook op de wereld om ons heen. NNV-leden en anderen kunnen actief deelnemen aan veel activiteiten, doe dus vooral mee om er samen een gedenkwaardig jaar van te maken. Het jaar is onlangs afgetrapt met de onthulling van de zes posters die zijn ontwikkeld voor het voortgezet onderwijs. Een prachtige poster met bijbehorende persoonlijke toelichting in filmpjes bedoeld om natuurkundelokalen in het hele land op te fleuren. De bestellingen stromen al binnen, zie de advertentie op pagina 4 in dit NTvN waarin staat hoe de posters te bestellen zijn.

Verder staan er in ieder geval op stapel:

- De uitreiking van de NNV-Diversiteitsprijs op 18 januari tijdens de programmaleidersbijeenkomst van Physics@Veldhoven. De jury is momenteel bezig met de beoordeling van de inzendingen. Goed om te zien wat er door diverse instituten wordt ondernomen om de diversiteit in het natuurkundeveld te vergroten.
- De NNV-sessie *Back to the Future* tijdens Physics@Veldhoven op 20 januari, zie voor meer informatie het NNV-nieuws aan het eind van dit NTvN.
- De viering van de International Day of Women and Girls in Science op 11 februari met vrouwelijke fysici als gastdocenten op scholen. Docenten kunnen aan ons doorgeven op welk vakgebied ze graag een gastdocent zouden willen ontvangen. Wij zorgen dan voor een koppeling tussen school en wetenschapper. Helaas moeten we dit festijn online houden, maar desondanks lijkt het ons een prachtkans om vrouwelijke wetenschappers en klassen uit het voortgezet onderwijs aan elkaar te koppelen. Voor iedere docent die graag een gastdocent in de klas wil ontvangen: e-mail ons via directeur@nnv.nl, dan zetten wij het proces in gang.
- Een dichtwedstrijd om de elementaire deeltjes op een voetstuk te zetten (zie de achterpagina van dit NTvN voor de details).
- Gezamenlijke toekomstvoorspelling *Pad naar de Toekomst*. In het volgende nummer van het NTvN komt meer informatie over dit project dat zich gedurende het jaar zal afspelen.
- Een essaywedstrijd waarin NNV-leden een blik op de komende jaren kunnen werpen. Mooi om te vergelijken met de essays die zijn geschreven in het jaar dat de NNV 75 jaar bestond.
- De algemene ledenvergadering op 1 april ('s avonds), waar we een feestelijk tintje aan hopen te geven op de vooravond van de honderdste verjaardag.
- FYSICA 2021 op 16 april met hoogtepunten uit de natuurkunde. Noteer de datum alvast in de agenda, het wordt een online-feest van de natuurkunde. Nobelprijswinnaar Reinhard Genzel heeft al toegezegd te zullen spreken.
- De onthulling van een EPS Historic Site. De European Physical Society benoemt in heel Europa EPS Historic Sites, zo ontstaat er een heel scala aan monumentale locaties. Nederland kent meerdere historische locaties op het gebied van de natuurkunde. Momenteel zijn er nog maar twee locaties in Nederland aangewezen als EPS Historic Site: het Kamerlingh Onneslab



- in Leiden en het Philips NatLab in Eindhoven. Gedurende 2021 komen er naar alle waarschijnlijkheid twee bij: het Zeemanlab in Amsterdam en de Sonnenborgh in Utrecht.
- Een muziekactiviteit in het najaar. Er wordt gewerkt aan de compositie van een muziekstuk met fysieke inspiratie.
 - Een zeer speciale editie van het *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* met een ongekende oplage van 32.000 exemplaren. Deze zal ook grootschalig naar scholen worden verstuurd. Ieder NNV-lid ontvangt twee (!) exemplaren, één voor zichzelf en één om weg te geven aan een geïnteresseerde collega, vriendin, studiegenoot, buurvrouw...
 - Het vorige NTvN bevatte het eerste artikel uit een serie van zes over vrouwen in de Nederlandse natuurkunde van de hand van Margriet van der Heijden. Zij verzorgt gedurende het feestjaar nog vijf artikelen waarin vergeten vrouwelijke Nederlandse natuurkundigen in het zonnetje worden gezet.
 - Installatie van bijzonder hoogleraren Wetenschapscommunicatie. Momenteel zijn we in gesprek met twee universiteiten die beide van plan zijn een NNV-hoogleraar op dit onderwerp te benoemen.
 - Door COVID-19 zijn diverse plannen in duigen gevallen of op zijn minst in de ijskast gezet. Het gaat hier bijvoorbeeld om activiteiten

die verbonden zouden zijn aan de NNV-reizen van leerlingen en docenten uit het voortgezet onderwijs (Quarktravel) en aan de studiereizen van studieverenigingen die door de NNV worden gesubsidieerd. Hopelijk kunnen we deze activiteiten later in 2021 alsnog in gang zetten.

Het feestjaar wordt georganiseerd door het jubileumcomité, op www.nnv.nl/NNV_100_jaar_in_2021 zijn alle namen te vinden. Naast een organisatiecomité kent het NNV-jubileumjaar ook ambassadeurs. Het zijn mensen die de NNV een warm hart toedragen en zich verbonden hebben aan het feestjaar; tezamen vormen zij het Comité van Aanbeveling, een diverse dwarsdoorsnede van het natuurkundige veld:

- Jos Benschop (senior VP ASML, UT)
- Miriam Blaauboer (universitair docent, TUD)
- Annette de Boer-Arts (docent Gymnasium Ceeleum, Zwolle)
- Eppo Bruins (Tweede Kamerlid)
- Julia Cramer (wetenschapscommunicatie, UL)
- Jennifer Herek (decaan TNW, UT)
- Gerard 't Hooft (Nobelprijswinnaar, UU)
- Henk van Houten (CTO en hoofd onderzoek Philips)
- Vincent Icke (emeritus hoogleraar, UL)

- Gideon Koekoek (universitair docent, UM)
- Kobus Kuipers (voorzitter Raad voor Natuurkunde, TUD)
- Ralf Mackenbach (promovendus TU/e)
- Rasa Muller (promovenda Nikhef, UvA)
- Jan van Riswick (docent Raaylandcollege Venraij, RU)
- Iris Rommens (student Fontys)
- Petra Rudolf (president EPS, RUG)
- Wim van Saarloos (voormalig voorzitter KNAW, UL)
- Jasper Somsen (student RUG, voorzitter Vereniging SPIN)
- Gerard van der Steenhoven (hoofd-directeur KNMI)
- Vinod Subramaniam (rector magnificus VU)

Het feestjaar is natuurlijk ook een prima gelegenheid om de NNV onder de aandacht te brengen bij mogelijke nieuwe leden. Kent u een collega of (oud-) studiegenoot die nog geen NNV-lid is? Met het speciale NTvN-jubileumnummer in de hand kunt u deze persoon vragen om zich bij ons aan te sluiten. Immers, hoe meer natuurkundigen we verenigen, des te meer we kunnen doen en bereiken. Hopelijk heeft u ook al zin in het feestjaar. We zien uit naar uw deelname aan diverse activiteiten. Houd het NTvN, uw e-mail en de website www.nnv.nl/NNV_100_jaar_in_2021 in de gaten voor aankondigingen en mededelingen. Graag tot snel!

Spintronica met roostertrillingen

Communicatie staat centraal in onze informatiemaatschappij, maar verbruikt veel energie. Toegepast maar ook fundamenteel onderzoek is dan ook gericht op het vinden van nieuwe natuurkundige processen en materialen om op een energiezuinige manier informatie te verwerken en te versturen. Hierbij zijn trillingen van de atomen in het materiaal vaak ongewenst vanwege hun bijdrage aan opwarming en dus energieverlies. Recent onderzoek laat verrassend genoeg zien dat deze trillingen ook aantrekkelijk kunnen zijn als dragers van informatie. Mede door deze ontwikkelingen staat Einsteins enige experiment weer volop in de belangstelling!



Bij elke e-mail of tweet die je verzendt wordt gebruikgemaakt van verschillende materialen en informatiedragers om te communiceren: voor lange afstanden tussen datacenters zijn er bijvoorbeeld glasvezels die lichtdeeltjes (fotonen) geleiden. Voordat het bericht je computer of smartphone verlaat, is de informatie opgebouwd uit elektrische stroompjes. Deze produceren veel afvalwarmte en verhogen dus het energieverbruik, wat ook de rekenkracht van je computer aanzienlijk beperkt. Spinelektronica, kortweg spintronica, wil daarom de elektrische lading als informatiedrager vervangen door de spin van het elektron – het intrinsieke impulsmoment oftewel het tollen van het elektron – dat de elektronen via hun elektrische lading ook een magnetisch moment of kompasnaaldje geeft. Recent is gebleken dat trillingen van de atomaire roosters in een vaste stof opgewekt door de elektronspin wellicht aantrekkelijker zijn dan elektronen als energiezuinige dragers van informatie.

Elk communicatiemedium heeft zijn eigen informatiedrager. Natuurkundig gezien is de informatiedrager vaak een golf. Denk bijvoorbeeld aan geluidsgolven in de lucht of de trillingen van het touw dat in het klassieke experiment de bodems van twee conservenblikjes verbindt waarin je spreekt en luistert. De informatiedrager en kwaliteit van het medium bepalen ook hoe ver de signalen komen. Hoe ver geluid draagt, hangt, met name bij heel hoge frequenties, bijvoorbeeld af van de mate waarin het wordt geabsorbeerd door de lucht en daarbij omgezet wordt in warmte.

Bij het overdragen van spininformatie door elektronen in elektrische geleiders wordt de maximale afstand waarover het signaal zich voort kan planten bepaald door botsingen met onzuiverheden. Bij dit soort botsingen kan de spin van het elektron, het ingebouwde kompasnaaldje dus, van richting veranderen. De mate waarin de spin verstoord wordt hangt dus van de zuiverheid van het materiaal af, maar ook van hoe sterk de beweging van het elektron gekoppeld is aan de richting van de spin. Bij een botsing verandert het elektron immers van richting, en als deze richtingsverandering sterk gekoppeld is aan de richtingsverandering van de spin zal de spininformatie snel

verloren gaan. Deze spin-baankoppeling is vooral sterk in zware metalen zoals platina, waarin de spinstromen maar een paar nanometer ver komen. In het veel lichtere koper hebben we te maken met honderden nanometers. Grafeen bestaat uit nog lichtere koolstofatomen op een honingraatrooster dat ook extreem zuiver gemaakt kan worden. De overdrachtslengte van spinstromen, oftewel de spindiffusielengte, is in grafeen dan ook in de orde van tientallen micrometers.

Alhoewel dit soort lengteschalen ruim voldoende zijn voor toepassingen in de nano-elektronica, hebben we nog steeds te maken met geleiders en dus met bewegende elektronen die door het botsen met onzuiverheden hun energie verliezen. Hierdoor lijkt het aantrekkelijk om isolatoren te gebruiken: materialen die geen elektriciteit geleiden. De elektronen blijven, ruwweg, aan de atomen zitten en kunnen dan ook niet botsen. Een belangrijke groep zijn elektrisch isolerende materialen die ook magnetisch zijn en spininformatie kunnen overdragen door middel van golfachtige bewegingen van de magnetisatie, spingolven dus. In een experiment dat in 2015 werd uitgevoerd door Ludo Cornelissen, destijds promovendus in de groep van Bart van Wees in Groningen, met yttriumijzergranaat (YIG), plantte spininformatie gedragen door spingolven zich voort over een afstand van tien micrometer bij kamertemperatuur [1]. Dit was een spectaculair resultaat omdat het eerste experiment in zijn soort zonder enige optimalisatie al de record spindiffusielengte van elektronen in grafeen haalde. Dit experiment gaf mede aanleiding tot de magnon-spintronica, het op dit moment zeer actieve deelgebied van de spintronica dat zich bezighoudt met overdracht van signalen door spingolven. Een magnon is de kleinste mogelijke quantummechanische trilling van de magnetisatie, vergelijkbaar met het foton en fonon voor licht en roostertrillingen. We gaan hier niet verder in op de magnon-spintronica maar stellen ons de vraag: is het mogelijk om met gewone isolatoren, materialen die geen elektriciteit geleiden en ook niet magnetisch zijn, toch spininformatie over te dragen? Voordat we deze vraag beantwoorden gaan we terug naar 1915 en een experiment dat mede werd uitgevoerd door 's werelds beroemdste theoretisch natuurkundige.

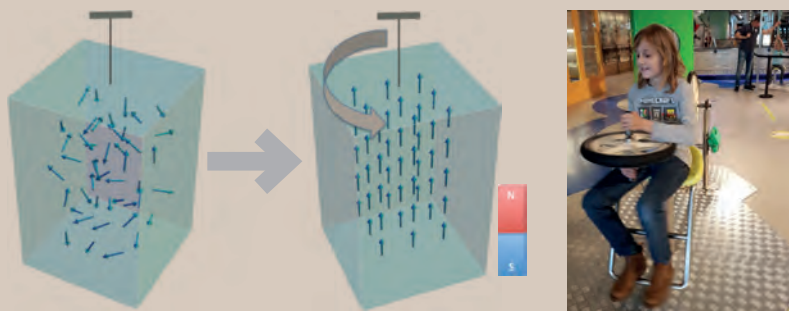


Rembert Duine (1975) is hoogleraar Theory of Nanoscale Systems in Utrecht en deeltijdhoogleraar aan de TU/e in de vakgroep Physics of Nanostructures. R.A.Duine@uu.nl

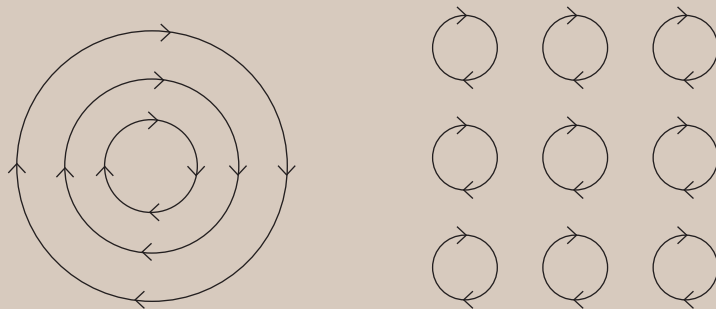


Gerrit Ernst-Wilhelm Bauer (1956) is hoogleraar theoretische natuurkunde in Delft en is in dienst van de Tohoku Universiteit in Sendai, Japan en bekleedt in deeltijd een hooglerschap aan de Rijksuniversiteit Groningen.

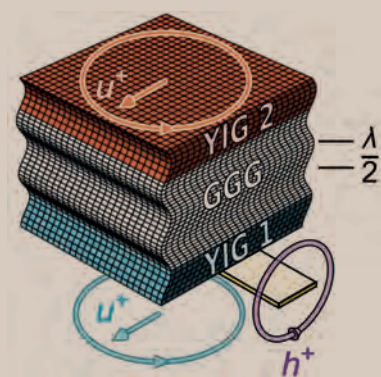
ONDERZOEK



Figuur 1: Het Einstein-de Haaseffect en behoud van impulsmoment. Links: de beginsituatie in het Einstein-de Haaseffect is een vrij hangende magneet waarin de nettomagnetisatie klein is doordat de bijdragen van de microscopische magnetische domeinen (pijltjes) elkaar opheffen. Onder invloed van een extern magneetveld gaan alle pijltjes in dezelfde richting staan (midden). Als gevolg van behoud van impulsmoment gaat de gehele magneet vervolgens om zijn as roteren (naar [6]). Rechts: de bekende demonstratie van het behoud van het impulsmoment. Foto: Geertje Spielman.



Figuur 2: Elke draaiing van een materiaal kan worden ontbonden in een draaiing van het gehele systeem (links) en een draaiing van de atomen rond hun evenwichtspositie (rechts). De tweede draagt niet bij aan de algehele draaiing. De rotatie van de atomen rond hun evenwichtspositie noemen we de fononspin. Vrij naar [7].



Figuur 3: Communicatie van spinimpulsmoment tussen twee magneten door roostertrillingen. De twee magnetische lagen bestaan uit YIG en zijn verbonden door de tussenliggende niet-magnetische GGG-laag. De magnetisatie dynamica in de twee YIG-lagen wordt aangegeven door de pijlen gelabeld met u^+ en wordt aangeslagen in de onderste laag door een extern magneetveld opgewekt door een wisselstroom in een onderliggende draad (h^+). De golflengte van de fonon resonantie is λ . Uit [4].

Van Einsteins enige experiment naar draaiende roostertrillingen

Het Einstein-de Haaseffect, genoemd naar het experiment dat voor het eerst werd uitgevoerd door Albert Einstein in samenwerking met de Nederlandse natuurkundige Wander Johannes de

Haas, is de door Lord Kelvin voorspelde relatie tussen magnetisme en impulsmoment of rotatie (figuur 1). In het experiment wordt de magnetisatie van een vrij hangende magneet gericht met een extern opgewekt magneetveld. Het vergroten van de magnetisatie in de richting van het externe magneet-

veld verandert ook het impulsmoment van de tollende elektronen die de magnetisatie veroorzaken. Het totale impulsmoment is behouden en omdat, in de eenvoudigste interpretatie van het experiment, het enige andere impulsmoment veroorzaakt kan worden door mechanische draaiing van het systeem, begint de magneet in zijn geheel te draaien. Dit experiment is een magnetische variant van de bekende demonstratie van behoud van impulsmoment (figuur 1): je zit op een bureaustoel en iemand geeft je een zwaar en snel draaiend vliegwiel waarvan de draaiingsas horizontaal is. Zodra je de draaiingsas een beetje verticaal draait, compenseert de bureaustoel dit door te gaan draaien met jezelf er bovenop. Ongeveer tegelijkertijd toonde Samuel Barnett het omgekeerde van het Einstein-de Haaseffect aan, namelijk dat rotatie een magnetisatie veroorzaakt.

De demonstratie van het behoud van impulsmoment illustreert ook op een subtiele manier een andere behoudswet, die van energie. Als je het vliegwiel van horizontaal naar verticaal draait kost dit spierkracht en krijg je het een klein beetje warmer. De energie van het draaiende vliegwiel plus de chemische energie opgeslagen in je spieren wordt dus omgezet in draaiingsenergie plus warmte. Hoe werkt dit precies in het Einstein-de Haaseffect? Hier hebben we te maken met magnetische en draaiingsenergie. Voor macroscopische systemen, dat wil zeggen systemen van 'alledaagse' grootte zoals gebruikt in het originele experiment van Einstein en De Haas, is de draaiingsenergie echter verwaarloosbaar ten opzichte van de magnetische energie. Maar om te kunnen voldoen aan de wet van behoud van energie moet de vrijgekomen magnetische energie toch echt ergens 'gedumpt' worden. De enige mogelijkheid is dat de roostertrillingen, oftewel hun quanta, de fononen, deze energie opnemen [2]! De roterende magneet wordt uiteindelijk dus ook een beetje opgewarmd. Nu we weten dat roostertrillingen een belangrijke rol spelen in het Einstein-de Haaseffect is de volgende vraag: wat gebeurt er met het impulsmoment van de elektronen, de spin, in dit proces? Kunnen de roos-

tertrillingen dit impulsmoment ook absorberen en wat betekent de spin van de roostertrillingen dan precies? Net zoals het impulsmoment van bijvoorbeeld de aarde de som is van de draaiing rond de zon (het baanimpulsmoment) en de draaiing rondom haar eigen as (het spinimpulsmoment, kortweg spin), draagt elke trilling van atomen rond hun evenwichtspositie bij aan rotatie van het materiaal als geheel, en rotatie van de atomen rondom hun evenwichtspositie (figuur 2). Deze laatste vorm van draaiing correspondeert nu met de spin van de roostertrillingen, afgekort tot fononspin. Een andere manier om de fononspin te begrijpen is als een superpositie van de twee loodrecht op elkaar staande transversale trillingen van de atomen tot een circulair gepolariseerd fonon. Hierbij ondergaan de trillende atomen cirkelbewegingen rondom hun evenwichtspositie en hebben zo op een natuurlijke manier spin. Dit is analoog aan circulair gepolariseerd licht dat ook spinimpulsmoment heeft. Dat fononen een spin kunnen hebben was al sinds de jaren zestig van de vorige eeuw bekend, maar ook weer grotendeels vergeten. De afgelopen paar jaar is de fononspin echter theoretisch herontdekt om relaxatie van de magnetisatie van magnetische isolatoren te begrijpen. Ook zijn er nieuwe experimenten die Einstein-de Haasachtige effecten bestuderen, zoals bijvoorbeeld in de context van de spindynamica van een magnetisch molecuul. Kan de fononspin ook rechtstreeks gemeten worden? Het antwoord hierop werd in 2018 gegeven in een experiment waarbij wederom gebruikgemaakt werd van de magnetische isolator YIG [3]. In dit materiaal is de koppeling tussen roostertrillingen en spingolven, de magneto-elastische koppeling, zo sterk dat het bij een bepaalde energie niet onderscheidbaar is of we met een spingolf of fonon te maken hebben. De ontstane golven worden magneto-elastische golven genoemd. Waar deze koppeling precies optreedt hangt af van de grootte van het magneetveld. Door ruimtelijke variatie van de sterkte van het magneetveld kan een excitatie, als die het gebied passeert waar de

koppeling tussen magnetisatie en roostertrillingen maximaal is, overgaan van pure spingolf naar magneto-elastische golf en eindigen als puur fonon. Een magnon, dus een quantum van een spingolf, heeft een impulsmoment gelijk aan de constante van Planck \hbar . In het experiment werd door middel van lichtverstrooiing gemeten dat het impulsmoment van de excitatie die na het doorlopen van het genoemde conversieproces een fonon is geworden, het impulsmoment van het magnon heeft overgenomen! Dit toont experimenteel het bestaan van de fononspin aan en maakt de vergelijking met circulair gepolariseerd licht – dat ook een spin heeft gelijk aan de constante van Planck – compleet. Volgende vraag is nu: kunnen we iets doen met deze fononspin? Kunnen we haar bijvoorbeeld verplaatsen in een materiaal en daarmee als drager van spininformatie gebruiken?

Spintransport door roostertrillingen

De eenvoudigste manier om het verplaatsen van fononspin te detecteren is door opnieuw gebruik te maken van de samenspraak tussen magnetisatie en roostertrillingen: de magneto-elastische koppeling. Dit kan in een sandwich waarbij een niet-magnetische isolator het 'beleg' is tussen twee 'boterhammen' gemaakt van een magnetische isolator (figuur 3). Als de magnetisatie in een van de twee magneten – zeg de onderste – aangeslagen wordt door bijvoorbeeld een tijdsafhankelijk magneetveld, dan wordt via de magneto-elastische koppeling ook het rooster in beweging gezet. De roostertrillingen kunnen zich vervolgens voortplanten van de magnetische isolator aan de onderkant, door de tussenliggende niet-magnetische isolator, naar de bovenste magnetische isolator, waar vervolgens magnonen worden gemaakt. Uit de manier waarop de fononen in het 'beleg' de 'boterhammen' verbinden, kan worden afgeleid dat spinimpulsmoment wordt uitgewisseld tussen de twee magneten. Eerder dit jaar werd deze koppeling experimenteel gerealiseerd door gebruik te maken van (alweer) YIG als mag-

netische isolator en paramagnetisch gadoliniumgalliumgranaat (GGG) als tussenliggend materiaal [4]. Hier bovenop hebben we theoretisch laten zien dat een opstelling als deze ook gebruikt kan worden om spintransport te realiseren tussen twee elektronische reservoirs [5]. Vanwege de extreem goede akoestische kwaliteit van GGG, wordt zowel in theorie als experiment een spinpropagatielengte gevonden in de orde van millimeters bij kamertemperatuur, wat de vorige recordlengtes, met name van elektronen in grafen en spingolven in YIG, doet verbleken!

Hoe verder?

Het transporteren van spins tussen twee elektronische reservoirs door middel van fononen moet nog experimenteel worden gerealiseerd. Ook lijken antiferromagneten, magnetische materialen waarin de magnetische momenten van naburige atomen elkaar opheffen zodat ze van buiten niet-magnetisch lijken, een aantrekkelijk keuze van materialen om de fononspin in te zetten. Deze materialen zijn namelijk ongevoelig voor magneetvelden en zo robuuster voor toepassingen. Uiteindelijk is de opmars van het fonon in de spintronica, van ongewenst buitenbeentje dat energie verspilt naar drager van informatie, nog maar net begonnen en verwachten we veel nieuwe natuurkunde uit deze ontwikkelingen!

REFERENTIES

- 1 L.J. Cornelissen, *Stroom sturen door een isolator: magnonen maken het mogelijk*, NTvN **04**, 104-107 (2016).
- 2 Andreas Rückriegel, Simon Streib, Gerrit E. W. Bauer en Rembert Duine, *Angular momentum conservation and phonon spin in magnetic insulators*, *Phys. Rev. B* **101**, 104402 (2020); in dit artikel zijn ook alle historische referenties naar fononspin te vinden. Tevens bevat het artikel referenties naar moderne ontwikkelingen.
- 3 J. Holanda, D.S. Maior, A. Azevedo en S.M. Rezende, *Detecting the phonon spin in magnon-phonon conversion experiments*, *Nature Physics* **14**, 500 (2018).
- 4 K. An et al., *Coherent long-range transfer of angular momentum between magnon Kittel modes by phonons*, *Phys. Rev. B* **101**, 060407(R) (2020).
- 5 Andreas Rückriegel en Rembert A. Duine, *Long-Range Phonon Spin Transport in Ferromagnet-Nonmagnetic Insulator Heterostructures*, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 117201 (2020).
- 6 M. Matsuoi, J. Ieda en S. Maekawa, *Mechanical generation of spin current*, *Frontiers in Physics* **30** juli (2015).
- 7 D. A. Garanin en E. M. Chudnovsky, *Angular momentum in spin-phonon processes*, *Phys. Rev. B* **92**, 024421 (2015).

Een eeuw fysica

Deel 1: de quantumrevolutie



In de twintigste eeuw is ons fysisch wereldbeeld ingrijpend veranderd, met name door de introductie en ontwikkelingen van de quantummechanica en de speciale en algemene relativiteitstheorie. In deel I worden in vogelvlucht die ontwikkelingen tot vlak na de Tweede Wereldoorlog geschetst.

Op de drempel van een nieuwe fysica

Op 2 april 2021 is het honderd jaar geleden dat de Nederlandse Natuurkundige Vereeniging (NNV) in het Natuurkundig Laboratorium te Utrecht werd opgericht. Nederland is het enige land in de wereld dat een eigen woord bezit – natuurkunde (door Simon Stevin (1548-1620) gemunt) – voor wat in andere talen is afgeleid van het Griekse woord φυσική (fusikè). Hoe was de stand van zaken in de natuurkunde op het moment dat kort na de Eerste Wereldoorlog (1914-1918) de NNV werd opgericht? Hoe is de verdere ontwikkeling verlopen? En wat mag men in de toekomst verwachten? Een beknopt tweedelig overzicht van honderd en nog wat jaren.

Tegen het einde van de negentiende eeuw meende men dat de (klassieke) fysica goeddeels kon worden afgesloten. De bewegingen van materiële lichamen konden worden beschreven met de drie bewegingswetten van Newton en diens gravitatiewet, de stralingsverschijnselen konden worden samengevat in de vier wetten van Maxwell en de (continue) energieoverdracht (warmte) werd geregeld door de twee hoofdwetten van de thermodynamica. Inderdaad kon bijna de hele fysica met de bovenstaande wetten worden begrepen. Toen Pieter Zeeman in 1883 aan zijn studie natuurkunde begon, kreeg hij dan ook de ontmoedigende raad: “Dat vak is klaar. Daar is geen eer meer mee in te leggen” [1]. En toen Max Planck fysica wilde studeren werd hem dat ook afgeraden, aangezien daarin bijna alles al was ontdekt. Omstreeks dezelfde tijd echter, werden verschillende verschijnselen waargenomen die niet binnen het klassieke theoretische kader konden worden verklaard. Zo ontdekte in 1895 Wilhelm Röntgen (de allereerste winnaar van de Nobelprijs voor de Natuurkunde) de naar hem genoemde röntgenstralen – onzichtbare stralen met een groot doordringingsvermogen, die geen focussing door lenzen en geen polarisatie via prisma’s vertoonden. In 1892 ontwikkelde Hendrik Lorentz (samen met Zeeman de tweede winnaars van de Nobelprijs voor de Natuurkunde) in zijn elektronentheorie een microscopische versie van de Maxwelltheorie, waarmee hij onder andere de invloed van een magnetisch veld op de golflengte van door atomen uitgezonden licht (Zeemaneffect) kon verklaren. Dit alles, nog voordat J.J. Thomson in 1897 in kathodestrallen het elektron – het eerste fundamentele deeltje – experimenteel had aangetoond en had bewezen dat straling ook uit deeltjes kon bestaan. (Ironisch genoeg ontdekte diens zoon, George Paget Thomson, in 1927 via diffractie-experimenten dat elektronenstralen naast een deeltjes- ook een golfkarakter bezitten.) Verder ontdekte in 1896 Henri Becquerel radioactiviteit: de spontane uitzending door bepaalde stoffen van energie en deeltjes. Bij die radioactieve straling onderscheidde men drie soorten: α -stralen (positief geladen heliumkernen), β -stralen (negatief geladen elektronen) en γ -stralen (energierijke elektromagnetische straling). Daarenboven ontdekten Maria en Pierre Curie twee nieuwe elementen die sterk radioactief waren: polonium en radium.

Tijdens het allereerste Congrès International de Physique in augustus 1900 te Parijs bestond de wereld van de fysica uit ongeveer 1100 fysici, waarvan zo’n 200 tot de top werden gerekend, die elkaar onderling allemaal kenden. Nederland gold met acht topfysici, waaronder toekomstige Nobelprijswinnaars zoals Lorentz, Kamerlingh Onnes, Van der Waals en Zeeman, als een “Grossmacht im Gebiete der Physik” [2].

Quantum en relativiteit

De ingrijpendste vondst, die een revolutie in de natuurkunde zou ontketenen en het gehele fysische wereldbeeld radicaal zou veranderen, was in 1900 de quantumhypothese van Max Planck. Ter oplossing van de ultravioletcatastrofe bij zwarte stralers waarvan de maximum uitgestraalde energie theoretisch naar oneindig zou lopen bij afnemende golflengte (of toenemende frequentie), terwijl dat experimenteel niet plaatsvond, stelde hij dat energieoverdracht niet continu gebeurde, maar plaatsvond via discrete pakketjes, door hem energiequanta genoemd, ter grootte van $E = h\nu$ (ν = frequentie energiestraling, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kgs}^{-1}$, de constante van Planck). Dat leidde, na een aantal tussenstappen van Einstein, Bohr en De Broglie, in 1926 tot de ontwikkeling van een geheel nieuwe fysica, de quantummechanica. Een andere ingrijpende gebeurtenis vond plaats in het annus mirabilis 1905 waarin de toen nog volledig onbekende 26-jarige Albert Einstein in een drietal artikelen respectievelijk een methode ontwikkelde om het bestaan van moleculen en atomen aan te tonen, het lichtquantum (foton) werkelijkheidswaarde gaf door daarmee het foto-elektrisch effect te verklaren en de (speciale) relativiteitstheorie (SRT) ontwikkelde waarin hij aantoonde dat tijd en ruimte niet absoluut waren (die zouden later door Hermann Minkowski verenigd worden in een vierdimensionale ruimtetijd). Zijn aanname dat de lichtsnelheid c een absolute snelheid bezat die niet kon worden overstegeen impliceerde dat simultaneïteit van ruimtelijk gescheiden gebeurtenissen niet absoluut kon worden vastgesteld en dat de ether als concept overbodig kon worden verklaard. Dit alles vervolgde Einstein in 1907 door de equivalentie van energie en massa aan te tonen ($E = mc^2$) en in 1915 de algemene relativiteitstheorie (ART) te ontwikkelen waarin massa aan de ruimtetijd een kromming verleende. Quantumtheorie (QT) en relativiteitstheorie bleken de pijlers te vormen voor de nieuwe fysica van de twintigste eeuw – pijlers die nog steeds overeind staan en niet zijn gefalsificeerd. Daarbij werd ook niet meer aan het bestaan van atomen getwijfeld.

Atoomtheorie

Hoewel reeds in de vijfde eeuw voor Christus door Leucippus en Democritus werd verkondigd dat alle materie uit atomen (ondeelbare deeltjes) bestaat, is een microscopisch fysische atoomtheorie (in wezen een theorie van de omhullende elektronen) pas in 1911 door

OPRICHTERS NNV

Ewoud van Everdingen (1873-1955) KNMI,
 Herman Haga (1852-1936) Groningen,
 Gilles Holst (1886-1968) Nat. Lab. Philips,
 Willem Henri Julius (1860-1925) Utrecht,
 Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) Leiden,
 Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) Leiden,
 Leonard Salomon Ornstein (1880-1941) Utrecht,
 Pieter Zeeman (1865-1943) Amsterdam.

Ernest Rutherford geformuleerd. Via bestraling met α -deeltjes uit radioactief materiaal toonde hij aan dat een atoom uit een positief geladen kern bestond (waarin bijna alle massa was geconcentreerd), omcirkeld door negatief geladen elektronen. Echter, klassiek verliezen elektrisch geladen deeltjes die in een cirkel bewegen, en dus aan een continue versnelling onderhevig zijn, energie en zouden de elektronen binnen 10^{-11} seconden op de kern moeten storten. Het is op dit punt dat Niels Bohr in 1913 het quantumconcept inbracht door te stellen dat het baanimpulsmoment L van de elektronenbanen gequantiseerd is: $L = pr = n\hbar$ (r = straal elektronbaan, $p = mv$ = impuls, $\hbar = h/2\pi$ is de gereduceerde constante van Planck, $n = 1, 2, \dots$ is een geheel getal). Daardoor kunnen de elektronen zich niet overal bewegen, maar slechts in vaste banen met een constante energie $E_n = nh\nu$ (ν = frequentie), waarbij zij geen straling uitzenden. Emissie of absorptie van straling vindt enkel plaats bij het overspringen van het elektron van de ene baan naar de andere, waarbij de frequentie van de straling wordt bepaald door het energieverval $E_{n+1} - E_n = h\nu = \hbar\omega$ ($\omega = 2\pi\nu$ is de hoekfrequentie). Vanaf dat moment gingen de ontwikkelingen van de quantumtheorie en de atoomtheorie hand in hand: quantumuitspraken werden experimenteel via de atoomtheorie geïnterpreteerd en atomaire vondsten via de quantumtheorie geïnterpreteerd.

Uit verdere ontwikkelingen bleek dat de energietoestanden van elektronen in een atoom (de spectraallijnen en hun opsplitsing in een magnetisch veld) volledig beschreven konden worden met vier quantumgetallen (n, l, m_l, m_s). Daarbij bepaalt het hoofdquantumgetal $n = 1, 2, 3, \dots$ de energie van het elektron, het baanimpulsquantumgetal $l = 0, 1, 2, \dots (n - 1)$ de grootte van de baanimpuls $L = (l(l + 1))^{1/2} \hbar$, het magnetisch quantumgetal m_l , tezamen met l , de grootte en ruimtelijke oriëntatie van L , terwijl het spinquantumgetal m_s alleen half-tallige waarden kan aannemen. De spin van een elektron $S = m_s \hbar = \pm 1/2 \hbar$ werd door George Uhlenbeck en Samuel Goudsmit, twee promovendi van Paul Ehrenfest, in 1925 als vierde vrijheidsgraad geïntroduceerd. In hetzelfde jaar formuleerde Wolfgang Pauli zijn uitsluitingsprincipe, dat zegt dat in een atoom geen twee elektronen kunnen zijn met dezelfde vier quantumgetallen (n, l, m_l, m_s). Later ontdekte men dat niet alleen elektronen,

maar alle fundamentele materiedeeltjes half-tallige spinwaarden bezaten (fermionen) en alle fundamentele krachtendeeltjes, zoals het foton, een heeltallige spin (bosonen genaamd). De complementaire golf-deeltjesdualiteit, zowel bij fotonen als elektronen geconstateerd, werd door Louis de Broglie in zijn proefschrift uit 1924 veralgemeniseerd door te stellen dat alle materie ook een golfkarakter bezat met een de Broglie-golflengte $\lambda = h/p$. De Bohrse elektronenbanen konden daarop ook worden geïnterpreteerd als staande golven die precies op zo'n baan passen.

Quantummechanica

Het Rutherford-Bohratoommodel was een fenomenologisch semiklassiek model dat bijvoorbeeld de spectra van atomen met meer dan één valentie-elektron en de relatieve intensiteiten van verschillende overgangen niet goed kon beschrijven. Daarna lukte het Werner Heisenberg om een volledige quantumtheorie te ontwikkelen, enkel gebaseerd op waarneembare elementen (observabelen), zoals de frequentie en intensiteit van de inkomende en uitgaande straling van een atoom, en niet op de onwaarneembare elektronenbanen. Gebruikmakend van het correspondentieprincipe van Bohr wist hij de klassieke plaats- en impulsgrootheden $x(t)$ en $p(t)$ te vervangen door met stralingsovergangen samenhangende tabellen, door Born herkend als matrices. Heisenberg, Max Born en Pascual Jordan (allen te Göttingen) ontwikkelden in 1925 op die basis een matrixmechanica, gebaseerd op de niet-commutativiteit van matrices ($xp - px \neq 0$) die zij quantummechanica noemden. Daarmee formuleerde in 1927 Heisenberg zijn onzekerheidsprincipe dat zegt dat canoniek geconjugeerde variabelen niet tegelijk exact zijn te bepalen, dat wil zeggen $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$ en $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$. Bijvoorbeeld: hoe preciezer de positie van $x(t)$ wordt bepaald, hoe onzekerder de bepaling van $p(x, t)$ wordt en omgekeerd.

Echter, geïnspireerd door de hypothese van De Broglie ontwikkelde Erwin Schrödinger (Zürich) in 1926 een alternatieve golfmechanica, bestaande uit de volgende elementen:

1. De volledige toestand van het elektron wordt gegeven door de complexe golf- of toestandfunctie $\Psi(x, t)$ en is niet direct meetbaar.
2. De totale energie (som van kinetische energie E en potentiële energie V) oftewel de hamiltoniaan H is geen getal, maar een operator $\hat{H} = i\hbar(d/dt)$ werkend op $\Psi(x, t)$.
3. Aldus ontstaat de dynamische tijdafhankelijke Schrödingervergelijking $\hat{H}\Psi(x, t) = i\hbar(d\Psi(x, t)/dt)$. Paul Dirac (Cambridge) toonde aan dat de matrix- en golftheorie volledig equivalent waren, ontwikkelde een nieuwe notatie, de $\langle \text{bra} | - | \text{ket} \rangle$ -notatie en verklaarde dat de Schrödingertheorie "de gehele scheikunde kon verklaren en een groot deel van de natuurkunde".

Daarmee was de nieuwe fysica, als discrete quantummechanica een feit! De overgang naar de continue klassieke fysica gebeurt in de limiet $\hbar \rightarrow 0$. Verder ontdekte George Gamow in 1928 het quantummechanische tunnелеffect (een verschijnsel zonder klassiek analogon), waarbij een deeltje een potentiaalbarrière kan doorbreken, ondanks het feit dat het de barrière niet kan overstijgen. De Schrödingertheorie leek analoog aan de klassieke mechanica in zoverre dat de door de theorie beschreven evolutie van een systeem strikt deterministisch verloopt – mits er niet gemeten wordt! Er is een oneindig aantal oplossingen, want iedere combinatie van oplossingen is weer een oplossing (superpositie). Bij een meting echter ontstaat een moeilijkheid omdat dan een discontinuïteit wordt geïntroduceerd waarbij alle mogelijke oplossingen zich reduceren tot één enkele oplossing, maar waarbij niet voorspelbaar is welke toestand gemeten gaat worden. Dit is het beroemde meetprobleem, dat tot op heden nog niet tot ieders tevredenheid is opgehelderd. Bohr, Heisenberg, Pauli, Born en anderen formuleerden voor de interpretatie (géén verklaring!) van het meetprobleem een ‘kookboek’ met het volgende recept (dit wordt de Kopenhaagse interpretatie genoemd):

1. Meting van een grootte $U(x,t)$ bij (x_o, t_o) geeft een definitieve waarde $U(x_o, t_o)$, maar slechts met een bepaalde waarschijnlijkheid.
2. Die waarschijnlijkheid wordt bepaald door de absolute waarde $|\Psi(x_o, t_o)|^2$ (de regel van Born).
3. Die waarschijnlijkheid is 1 bij (x_o, t_o) en 0 voor alle andere (x,t) , met andere woorden: de golffunctie heeft zich bij (x_o, t_o) versmald tot één enkele waarde (ineenstorting of collaps van de golffunctie).

Kernpunt van de Kopenhaagse interpretatie is de aanname dat de wereld alleen klassiek-fysisch kan worden ervaren, omdat een quantummechanisch verschijnsel slechts gemeten/waargenomen kan worden op klassiek fysische wijze via klassiek fysische apparatuur. Fysica is dus geen ontologie, maar epistemologie. Naast de Kopenhaagse interpretatie bestaan echter ook andere interpretaties van de quantummechanica.

Kernfysica

In 1919 ontdekte Rutherford het positief geladen proton (waterstofkern) met dezelfde maar tegengestelde lading als het elektron. In 1932 ontdekte zijn medewerker James Chadwick een ander kerndeeltje, het ongeladen neutron. Een atoom bleek aldus te bestaan uit een kern van positieve protonen en ongeladen neutronen, omhuld door negatieve elektronen. Een heliumkern of alfa-deeltje bijvoorbeeld, bestaat uit twee protonen en twee neutronen. In een neutraal atoom is het aantal protonen gelijk aan het aantal elektronen en dat aantal bepaalt ook het soort chemisch element. In een atoom van eenzelfde element kan het aantal neutronen echter verschillend zijn (isotopen). De bovenstaande resultaten waren

bereikt via beschieting met radioactieve α -deeltjes, die een kinetische energie bezaten van 5 MeV en een snelheid van 15.000 km/s. In 1932 slaagden John Cockcroft en Ernest Walton erin via een hoogspanningskaskade protonen te versnellen en daarmee een lithiumatoom te splitsen in twee heliumatomen. Dit was de eerste kernsplijting! In 1935 ontdekte Enrico Fermi dat de ongeladen neutronen veel beter dan protonen in de atoomkern konden doordringen en dat het doordringingsvermogen vergroot kon worden door de neutronen met een moderator te vertragen. Door beschieting met neutronen kon hij verschillende kunstmatig radioactieve isotopen produceren, doordat de atomen onstabiel werden en radioactief vervielen. Theoretisch vormde radioactiviteit in die tijd een probleem, omdat daarbij energie niet scheen te worden behouden. In 1930 beging Pauli, naar eigen zeggen “iets ergs” door ter oplossing een deeltje te suggereren (door Fermi later neutrino genoemd), met een massa van bijna nul. Het neutrino werd pas in 1956 door Clyde Cowan en Frederick Reines ontdekt. Met behulp van het neutrino ontwikkelde Fermi in 1933 een theorie voor de radioactiviteit op basis van een zwakke kernkracht. Maar zijn artikel erover werd door *Nature* geweigerd omdat zijn theorie “too remote from reality” werd geacht. Om het bijhouden van gelijk geladen protonen in de kern te verklaren introduceerde Hideki Yukawa in 1935 de sterke kernkracht, niet als een elektromagnetische kracht zoals tussen kern en elektron, maar als een uitwisselingskracht (*exchange force*) tussen protonen en neutronen met een korte dracht van 10^{-14} m. De sterke-krachtdeeltjes, mesonen genoemd (met een massa tussen proton en elektron) werden in 1947 door onder andere Cecil Powell ontdekt. Aldus ontstond, eind jaren dertig van de vorige eeuw, een atoommodel, quantummechanisch beschreven, gevormd door een kern bestaande uit protonen en neutronen, bijgehouden door de sterke kernkracht (mesonen) en omhuld door elektronen, verbonden met de kern via de elektromagnetische kracht (fotonen). Kernverval (radioactiviteit) werd geregeld via de zwakke kernkracht. In de eerste helft van de twintigste eeuw werd – dankzij quantummechanica en relativiteitstheorie – grote theoretische vooruitgang geboekt in de fysica van het submicroscopisch kleine en het kosmologisch grote. In de tweede helft, het onderwerp van het tweede deel van dit tweeluik, werd vooral gestreefd naar verificatie en uitdieping van de gedane voorspellingen. Dit gebeurde via de oprichting van grote nationale en internationale meetfaciliteiten en de ontwikkeling van vergrote computercapaciteiten. Kortom, via big science en big data.

REFERENTIES

- 1 Hendrik Casimir, *Het toeval van de werkelijkheid. Een halve eeuw natuurkunde*, p. 40, Meulenhof (1985).
- 2 Woldemar Voigt, *Heike Kamerling Onnes, Chemiker Zeitung*, p. 3 (1913).
- 3 Paul Dirac, *Quantum mechanics of many-electron systems, Proceedings of the Royal Society of London A213, 714-733* (1929).

GOLVEN, GELUID EN GEHOOR

Het onderwerp 'trillingen en golven' biedt op school veel kansen. Kansen om verbanden te leggen tussen verschillende stukjes natuurkunde, aandacht te besteden aan verstandig omgaan met de eigen gezondheid en met de leefomgeving, en om wiskundige, computer- en ontwerpvaardigheden van leerlingen te verbeteren.

Het hoofdstuk over geluid in de onderbouw en dat over trillingen en golven in de bovenbouw, lijken op het eerste gezicht modules die vrij los staan van de rest van de natuurkunde. De lesstof is ook veel beperkter in omvang dan bijvoorbeeld die van elektriciteit of mechanica. Met die laatste onderwerpen ben je veel vaker in de loop van de verschillende leerjaren bezig. Geluid doe je één keer in de onderbouw en één keer in de bovenbouw. Ik vind het niet wenselijk als een on-

derwerp overkomt als losstaand. Nog onwenselijker vind ik het als leerlingen alle hoofdstukken als losse modules zien, die je na een proefwerk weer snel kunt vergeten. Mijn doel is dat leerlingen natuurkundig leren denken en de natuurkunde als een samenhangend bouwwerk gaan ervaren. Graag grijp ik de behandeling van de harmonische trilling dan ook aan om computermodellen uit de kast te halen. Dan sla je twee vliegen in één klap: je kunt laten zien dat een terugdrijvende kracht op een massa, die evenredig is

met de uitwijking, altijd resulteert in een sinusoïde. Je hoeft dat niet alleen maar te poneren. Daarnaast zien leerlingen ook dat computermodellen niet alleen een trucje zijn dat hoort bij de tweede wet van Newton. Ik probeer computermodellen ook aan de orde te laten komen bij vermogen en energie, radioactief verval en elektrische en magnetische velden. Een tweede verband is dat tussen golven en de quantumwereld. Eigenlijk staat het begrip 'interferentie' in de syllabus met exameneisen alleen vermeld bij dat



domein, bij de golf-deeltjedualiteit. Dat komt een jaar later pas, maar ik probeer de geesten vast rijp te maken voor dat concept door ook bij geluid te noemen dat de mogelijkheid van constructieve en vooral ook destructieve interferentie kenmerkend is voor golfverschijnselen. Als ik het jaar erna opmerk dat quantummechanica ook wel golfmechanica werd genoemd, dan helpt dat sommige leerlingen bij het zien van de grote lijn. In de bovenbouw moet een leerling volgens de exameneisen een ontwerp voorbereiden, uitvoeren, testen en evalueren. Hiertoe laten we op onze school de leerlingen een muziekinstrument ontwerpen, bouwen en bespelen. Uiteraard moet er ook een uitleg bij, en een meting van het frequentiespectrum. Nieuw is dat ze met hun groepje ook een bijbehorende opgave met antwoorden moeten bedenken. Niet alles gaat goed. Zo zijn er elk jaar groepjes die bij berekeningen aan een snaar in de formule $v = \lambda \cdot f$ voor de snel-

heid invullen: $v = 340 \text{ m s}^{-1}$. Slechts iets beter is 'de geluidssnelheid in nylon =' en dan een getal dat kennelijk de geluidssnelheid in massief nylon is, niet de golfsnelheid in een gespannen snaar. Maar meestal komt er een zinnig verhaal. Leuk was de reactie van een groepje meiden dat een Griekse lier had gemaakt. Eentje zei: "Ik vind het serieus leuk dat al die vakken bij elkaar komen: natuurkunde, muziek en Grieks". In het filmpje dat elk groepje moet opsturen klonk bij hen niet het geijkte *Loesje heeft een lammetje*, dat alle noten omvat die hun instrument volgens de opdracht moet kunnen produceren, en dat ik nu wel erg vaak heb gehoord, maar een versie van *Viva la vida* die echt heel goed klonk. Dat ik in de bovenbouw ook verband leg met wat ze bij wiskunde leren over goniometrie ligt voor de hand. Een aardige aanvulling van spelen met wiskunde en geluid, die ook consequenties heeft voor het begrijpen waarom de geluids-

overlast van een snelweg nog op een zo grote afstand hoorbaar is: een lijnvormige geluidsbron voldoet niet aan de kwadratenwet en op een tienmaal zo grote afstand zakt het niveau niet met 20 dB zoals je leert voor het geluid van vliegtuigen en zo. Het zakt met slechts 10 dB omdat de intensiteit afneemt als $1/r$.

Volgens de ideeën van Curriculum.nu is het belangrijk dat we op scholen leerlingen zaken bijbrengen die te maken hebben met hun eigen gezondheid. Nou, dat doen we dus, ook bij geluid. De behandeling van hoe gehoorschade ontstaat, waarom die vaak onomkeerbaar is en wat helpt ter voorkoming ervan vind ik een voor de kinderen zeer nuttige verbreding van de natuurkundestof.

Hans van Bommel is natuurkundeleraar op een middelbare school. Hij illustreert ontwikkelingen in het onderwijs door te vertellen over wat hij in de klas beleeft.



Eco-Runner X

Deze waterstofauto uit Delft kan wereldrecords breken

Ieder jaar werkt een enthousiaste groep studenten in Delft aan de ontwikkeling van een superzuinige waterstofauto om deel te nemen aan een race tegen studententeams van over de hele wereld [1]. Het ontwerpen en produceren van en racen met de auto wordt gedaan door enkel en alleen studenten. In het collegejaar 2019-2020 was ik *Chief Strategy* van Eco-Runner Team Delft. Hier vertel ik hoe ik met mijn team in een jaar tijd heb geprobeerd 's werelds efficiëntste waterstofauto te bouwen.



De Eco-Runner X. Het Urban Concept is een stuk groter geworden met meer functionaliteit dan het Prototype. Zo laat deze versie de bestuurder rechtop zitten, heeft het een bagageruim en heeft het dezelfde verlichting als een personenauto.

Om een baanbrekende auto te kunnen bouwen, bundelde ons team van zo'n 25 studenten uit allerlei studierichtingen (zoals werktuigbouwkunde, luchtvaart- en ruimtevaarttechniek en natuurkunde aan de TU Delft) hun kennis. Ieder heeft zijn eigen expertise, maar door inzichten te delen en nauw samen te werken is het mogelijk om tot innovatieve oplossingen te komen. Het team bestaat uit teamleden die zich fulltime of parttime een jaar lang vrijwillig inzetten voor het project.

Het ontwerp

Ieder onderdeel moet perfect worden uitgedacht en zodoende moet er een boel kennis worden opgedaan om de wedstrijd te kunnen winnen. Ieder jaar wordt er een nieuw voertuig ontworpen. Wij konden dus voortborduren op negen jaar aan opgebouwde ervaring. Onze voorgangers hadden een futuristisch voertuig ontworpen, de Eco-Runner 9, dat met zijn aerodynamische vorm vergeleken kan worden met een langwerpige waterdruppel waarin een relatief klein persoon past. Wij waren de tiende

jaarlag en waren van plan een grote overstap te maken.

Met ons team zijn we overgestapt van de futuristische klasse Prototype naar de klasse Urban Concept, met een groter voertuig en veel meer functionaliteiten zoals in een stadsauto. Deze overstap zorgde voor ontzettend veel leuke nieuwe uitdagingen, maar als er ook maar een deel van het nieuwe ontwerp niet goed zou werken, dan was er geen back-up en zouden we niet kunnen deelnemen aan de race.

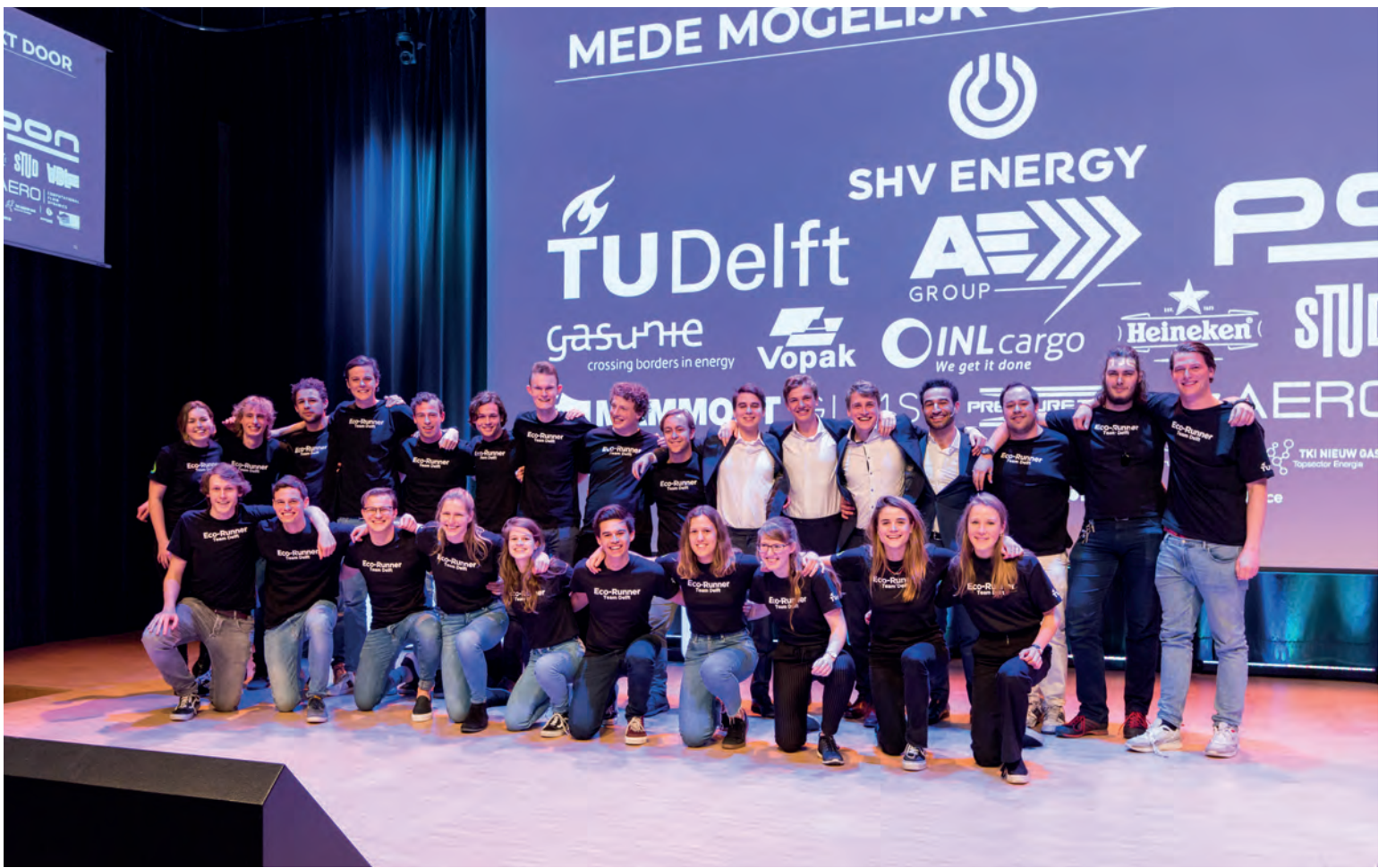
Na vier maanden ontwerpen begon de productiefase waarin bijna alle onderdelen van de auto door onszelf werden geproduceerd. Daarna volgde een fase van testen, oefenen, repareren, testen... en dan waar het allemaal om gaat: de race!

Tijdens de race hebben alle studententeams hetzelfde doel: zo zuinig mogelijk rijden. Het draait namelijk niet om snelle rondetijden of spannende inhaalmanoeuvres, maar om met zo min mogelijk brandstof een zo'n groot mogelijke afstand te kunnen rijden. Als hoofdstrategie (*Chief Strategy*) was ik onder andere verantwoordelijk voor de efficiëntie

van de auto gedurende de race. Hier kon ik mijn natuurkundige expertise mooi toepassen.

Om zo zuinig mogelijk te kunnen rijden moet namelijk iedere vorm van weerstand in de auto geminimaliseerd worden. Daarvoor moet eerst in kaart gebracht worden waar alle weerstanden – groot en klein – vandaan komen en hoe deze gemeten kunnen worden. Veel weerstanden kunnen simpel getest worden, zoals de luchtweerstand of de rolweerstand van de wielen. Zo hebben we de luchtweerstand zelf gemeten in een windtunnel en ons weerstandscoefficient C_d was slechts 0,21! Helaas zijn er ook grootheden die moeilijker te meten zijn, zoals bijvoorbeeld hoeveel het waterstofverbruik zou stijgen als er een motor met meer massa ontworpen zou worden.

Dit jaar hadden we de aandrijflijn – de reeks aan onderdelen die ervoor zorgen dat het voertuig aangedreven kan worden – aangepast en gekozen voor een speciaal voor ons ontworpen in-wiel-motor. Dit zorgt ervoor dat er geen verliezen zijn in een ketting of versnellingsbak en bovendien



Het team van studenten dat heeft bijgedragen aan het bouwen van de Eco-Runner X. De studenten doen allemaal een studie aan TU Delft, denk aan werktuigbouwkunde, luchtvaart- en ruimtevaarttechniek en natuurkunde.

is hij lichter dan de eerder gebruikte externe motor. Deze in-wiel-motor bracht echter wel een probleem met zich mee. Een zwaardere, sterkere motor zorgt ervoor dat je sneller kunt optrekken zodat eerder op de gewenste efficiënte kruissnelheid wordt gereden, maar ieder grammetje dat de motor (en dus ook de auto) zwaarder wordt, verandert niet alleen de traagheid van de auto, maar in het geval van de in-wiel-motor ook die van het wiel! Dit maakt een berekening voor het verbruik van een ontwerp van de motor vele malen complexer. Naast efficiëntie, gewicht en vermogen, moesten we zeker ook rekening houden met factoren als tijd, geld en haalbaarheid.

Hoe win je de race?

Ook al heb je misschien de efficiëntste waterstofauto ter wereld ontworpen, je kunt de competitie niet winnen zonder een goed getrainde

bestuurder en een goede strategie. Ik had de eer om dit jaar de bestuurder van de waterstofauto te zijn en de strategie te bepalen. In de strategie staat omschreven wat de bestuurder moet doen tijdens de race. Dit wordt bepaald met behulp van een groot rekenmodel in verschillende programmeertalen (bijvoorbeeld Matlab, Python en Arduino) waarin alle belangrijke parameters van de auto en het parcours zitten. Het model levert een rijstrategie op die precies beschrijft hoe je een race moet rijden; van hoe scherp je een bocht wilt nemen, tot hoe hard je over het kleinste heuveltje wilt klimmen. Uiteindelijk kan de strategie de doorslag geven: een auto met iets minder weerstand maar een verkeerd gebruik zal het niet winnen van onze auto met de optimale strategie!

Dit jaar is door COVID-19 onze race, de Shell Eco-Marathon in Londen, helaas niet doorgegaan, maar dit heeft ons zeker niet gedemotiveerd.

We hebben onze auto af kunnen maken en voor ons innovatieve ontwerp de Vehicle Design Award van Shell gewonnen! Daarnaast hebben we wel een kleinere race tegen andere studententeams uit Nederland kunnen houden. Ik had het geluk de bestuurder te mogen zijn wat toch wel een van de leukste manieren is om zo'n jaar af te sluiten.

Voor mij is dit jaar ontzettend leuk, maar vooral ook leerzaam geweest. Ik heb bijvoorbeeld geleerd hoe je grote projecten kunt aanpakken, hoe ik mijn eigen tijd moet verdelen en misschien wel het belangrijkste van alles: hoe belangrijk en waardevol teamwerk is. Mocht je graag nog meer willen zien, kijk dan vooral even op het YouTube-kanaal voor de onthulling van de Eco-Runner X [2]!

REFERENTIES

- 1 www.ecorunner.nl
- 2 [hww.youtube.com/watch?v=jAOSGEXA7dk](https://www.youtube.com/watch?v=jAOSGEXA7dk)

NNV-NIEUWS

Directeur Noortje de Graaf vertelt wat er speelt binnen de vereniging

Gastles in de klas!

Donderdag 11 februari 2021 is de International Day of Women and Girls in Science.

Wil je op die dag ook een vrouwelijke natuurkundige als gastdocent in de klas? Dat kan! In het kader van ons honderdjarig bestaan koppelen we scholen en wetenschappers aan elkaar.

De gastles zal online plaatsvinden.

Stuur ons een e-mail via directeur@nnv.nl en we gaan op zoek naar de perfecte combinatie.

Geef in de e-mail alsjeblieft de volgende zaken aan:

- Welk vakgebied heeft je voorkeur voor een gastles?
- Welke klas zou je een gastles willen geven (niveau en leerjaar)?
- In welke taal zou de gastles gehouden moeten worden, Nederlands of Engels?

NNV-sessie *Back to the Future*

Traditiegetrouw organiseert de NNV tijdens Physics@Veldhoven een speciale sessie. Dit jaar is gekozen voor het thema *Back to the Future*. De sessie sluit mooi aan op de viering van het honderdjarig bestaan van de vereniging en de lancering van de website *Pad naar de Toekomst*. De onlinesessie start met een natuurkundige terug- en vooruitblik door Vincent Icke. Vervolgens werpen we een blik op de toekomst binnen een aantal vakgebieden: elektronica (Charlotte Kjellander), *smart cities* (Michiel de Lange) en energie (Angèle Reinders). Haak ook aan op woensdag 20 januari van 10:20 tot 11:40 uur, het belooft een mooie sessie te worden.



Samenwerking NNV en Raad voor Natuurkunde

NWO (in het verleden Stichting FOM) subsidieert al jaren diverse outreachprojecten op natuurkundig gebied. In verband met nieuw beleid waren deze subsidies stopgezet, ook natuurkundeprijzen als de Proefschriftprijs en de Minervaprijs zijn afgeschaft. Hierdoor komen diverse projecten – denk bijvoorbeeld aan Natuurkunde.nl en de Natuurkunde Olympiade – financiën tekort. De NNV en de Raad voor Natuurkunde hebben de handen ineen geslagen en hebben, met steun van de Tafel Natuurkunde, bij NWO een verzoek ingediend om een aantal subsidies twee jaar door te zetten, zodat de projecten en prijzen nog even de tijd hebben om alternatieve financiering te zoeken. NWO heeft de subsidieaanvraag goedgekeurd, een mooi succes van deze samenwerking.

Contributiefacturen 2021

In de eerste weken van januari valt bij NNV-leden de contributiefactuur voor het jaar 2021 in de bus. De tarieven voor 2021 zijn gelijk aan die voor 2020. De contributie-inkomsten zijn een belangrijke bron van inkomsten voor de vereniging, die we onder meer inzetten voor het maken, laten drukken en verzenden van het *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* en dit jaar natuurlijk ook voor het jubileumjaar. Daarom bij voorbaat hartelijk dank voor een snelle betaling.

Algemene ledenvergadering op 1 april

Normaal gesproken houdt de NNV de algemene ledenvergadering (alv) tijdens het congres FYSICA. Omdat FYSICA 2021 op vrijdag 16 april online plaats gaat vinden vanwege COVID-19, hebben we een andere datum voor de alv vastgesteld. De alv vindt in 2021 online plaats op donderdag 1 april, van 19:30 tot 21:00 uur. Het wordt een alv met een feestelijk tintje, omdat de NNV de dag erna daadwerkelijk honderd jaar wordt. Op 2 april 1921 is de NNV opgericht. Noteer de datum alvast in de agenda, zodat we samen een toast uit kunnen brengen op de jarige NNV.

Als NNV willen we in dit feestelijke jaar 2021 een erfenis nalaten in de vorm van een dichtelijke 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!

