

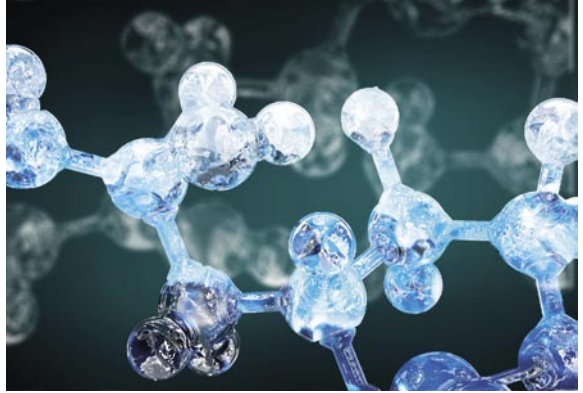
# perio\*diek

op regelmatige tijden terugkerend jaargang 2010 nummer 3

# Inhoud

## 6 Op de schouders van Newton

Het modelleren van moleculen doen de meeste mensen niet met de wetten van Newton, maar met kwantummechanica, want op kleine ruimte- en tijdschaal werkt dat doorgaans beter. De vakgroep Molecular Dynamics trekt zich daar echter niks van aan.



## 22 Regen op bestelling

China liet tijdens de Olympische Spelen een mooi staaltje regeninductie zien. Hoe werkt dit? En kun je je vervelende burens ook een koude douche geven?



## 28 Spooky action at spacy distances

Bij een vak over speciale relativiteit leer je dat niets sneller kan gaan dan het licht omdat dit anders de causaliteit aantast. Het ligt toch iets subtieler, sommige fenomenen kunnen wel 'te snel'. *Spooky* zeg!

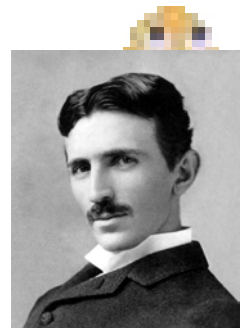


## En verder

- 4 In het nieuws
- 12 De oorsprong van Newton
- 16 Je eigen supercomputer
- 20 Kokkerellen
- 26 Een cursusje verzekeren
- 34 Herrie in de huiskamer
- 39 Breinwerk

## 32 Tovenaar Tesla

Tesla: je kent zijn naam als eenheid, maar wie is de man achter deze eenheid? En waarom hoor je nooit wat over hem?



## 10 The Science of Ringworld

Larry Niven, de auteur van Ringworld, heeft erg zijn best gedaan om zijn fictieve wereld zo echt mogelijk te beschrijven. Hij zag echter een klein, maar cruciaal fenomeen over het hoofd.



**Redactie** Marion Dam, Ronny Joseph, Herbert Kruitbosch, Ellen Schallig, Pjotr Svetachov, Marten Veldhuis, Erik Weitenberg

**Scribenten** Roel Andringa, Thomas ten Cate, Samuel Hoekman, Keimpe Nevenzeel, Michiel Schallig, Alex de Vries

**Met dank aan** Monique van Beek

**Adverteerder** TNO (p. 19), Selexyz (p. 38.)

Ook adverteren? Neem contact op met [bestuur@fmf.nl](mailto:bestuur@fmf.nl).

**Oplage** 1300 stuks

**Druk** Scholma

**ISSN** 1875-4546

**De Periodiek** is een uitgave van de Fysisch-Mathematische Faculteitsvereniging en verschijnt vijf keer per jaar. Eerder uitgebrachte Periodieken zijn na te lezen op [perio.fmf.nl](http://perio.fmf.nl). De redactie is te bereiken via [perio@fmf.nl](mailto:perio@fmf.nl).

## Van de redactie

In je leven heb je een aantal onveranderlijke zekerheden. De wekker gaat altijd te vroeg en je begint natuurlijk altijd te laat met je huiswerk. Dat meeuwendrek op je hoofd valt, komt door dezelfde fundamentele kracht als waardoor Newton die hersenschudding kreeg, en al valt die drek nog zo snel, hij kan niet sneller dan het licht.

En natuurlijk regent het altijd als je een eind moet fietsen.

Nu heb ik ook positief nieuws. Het blijkt namelijk dat het uitstellen van werk goed voor je is. Ook zijn er manieren om ervoor te zorgen dat de regen niet valt op het moment dat je op pad wilt, of een terrasje wilt pakken om je werk langer te kunnen negeren.

Helaas moet ik ook een aantal heilige huisjes omver schoppen. Ook al gaat die drek niet sneller dan het licht, dat betekent nog niet dat niets sneller kan gaan. Dat dat geen consequenties heeft voor ons wereldbeeld kun je lezen in *Spooky action at spacy distances*. Wat wel potentieel wereldschokkend is, is wat Erik Verlinde heeft geponeerd over de zwaartekracht. Zwaartekracht is geen fundamentele kracht! Wil je hierover meer weten, lees dan het verhelderende *De oorsprong van Newton*.

Ook al zijn die onveranderlijke zekerheden dus niet zo onveranderlijk als ze in eerste instantie lijken, je kunt ervan uitgaan dat dit weer de mooiste Perio ooit is!

— Ellen

# In het nieuws

## Gedachten lezen

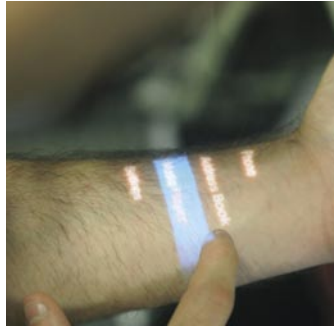
Het is wetenschappers gelukt om iets te doen wat iedereen soms wel zou willen: gedachten lezen. Herinneringen laten namelijk zichtbare sporen achter in je hersenen. Proefpersonen kregen drie filmpjes van een paar seconden te zien en werd gevraagd terug te denken aan wat ze hadden gezien, terwijl ze een fMRI-scan ondergingen. Een computeralgoritme matchte aan de hand van de scan het patroon van de hersenactiviteit aan de herinnering van de film. Zo kon de computer precies vertellen wanneer een proefpersoon aan één van de films dacht.

[news.sciencemag.org](http://news.sciencemag.org)

## Klokneuronen en een droog bed

Een mens wordt erg gelukkig van een goede nacht slapen. Daarom is het fijn dat je niet om de vijf minuten wakker wordt omdat de wc je roept, als je eenmaal in bed ligt. Dit kan dankzij het anti-diuretisch hormoon, dat je minder urine laat aanmaken en vocht langer laat vasthouden. Onderzoekers van McGill University hebben bij ratten ontdekt dat de neuronen van hun biologische klok ervoor zorgen dat het hormoon minder wordt aangemaakt. Omdat deze klokneuronen tijdens het slapen minder actief zijn, urineren de ratten minder. Omdat onze neuronen op die van ratten lijken gaat dit resultaat ook voor ons op.

[nature.com](http://nature.com)



## Mobieltjes voor armen

In de toekomst is het aanraken van je hand of onderarm met een vinger wellicht de manier waarop je je mobiele telefoon bestuurt. Amerikaanse onderzoekers hebben een sensor ontwikkeld die met behulp van geluidssignalen precies kan achterhalen waar je arm aangeraakt is. Met een kleine projector kan het systeem je hand gebruiken als beeldscherm. Je kunt dan sms-jes typen en spelletjes spelen op je handpalm.

[news.bbc.co.uk](http://news.bbc.co.uk)

## Het is een... quasar!

Het ontstaan van quasars, sterke bronnen van radiogolven, was al een tijdje een mysterie voor astrofysici. Vermoedens hierover zijn kortgeleden bevestigd. Een team sterrenkundigen van de Universiteit van Hawaï heeft enkele net gefuseerde sterrenstelsels in de gaten gehouden. En wat bleek zich in het midden van het sterrenstelsel te bevinden? Een zojuist geboren quasar, die zich door het omringende gas een weg

naar buiten vrat. Quasars ontstaan bij het botsen van sterrenstelsels waarbij de supermassieve zwarte gaten fuseren en de overige materie verorberen.

[news.sciencemag.org](http://news.sciencemag.org)

## Roken is voor de dommen

Uit onderzoek van de Universiteit van Tel Aviv is gebleken dat rokende mensen niet slim zijn. Rokende jonge mannen hebben gemiddeld een lager IQ dan hun niet-rokende leeftijdsgenoten. Er is ook een verband tussen het aantal gerookte sigaretten en het IQ. Het gemiddelde IQ van een niet-roker is 101, van een roker 94 en van iemand die meer dan een pakje per dag rookt, ligt het rond de 90. Dit verschil verklaren de onderzoekers doordat mensen met een lager IQ eerder slechtere keuzes voor hun gezondheid maken dan mensen met een hoger IQ.

[physorg.com](http://physorg.com)



## Leuke nieuwtjes uit de wondere wereld der wetenschap

### Allergisch voor Avatar

Zette je tijdens Avatar je bril zo nu en dan af omdat hij niet alleen vloekte bij je shirt maar je er bovendien hoofdpijn van kreeg? Vrees niet, je bent niet de enige die last heeft van dat vele scherpenstellen. De TU Eindhoven heeft een test bedacht om te zien of je hier gevoelig voor bent: lees een 2D-tekst en een 3D-tekst. Kost het lezen van 3D meer tijd, dan heb je last van verminderde oog samenwerking en kun je Alice in Wonderland voorlopig maar beter mijden.



kennislink.nl

### Praat tuberculose zelfmoord aan

Tuberculosebacteriën laten zich steeds moeilijker bestrijden met antibiotica. Daarom is er een nieuwe methode voor gezocht en gevonden: laat hen zelfmoord plegen. Er is een gen ontdekt, het glgE-gen, waarmee deze bacterie suikers omzet in een bruikbare energiebron. Door dit gen aan te pakken met medicatie stikken de bacteriën in hun eigen voedsel: ze laten al etend hun cellen vollopen met onverteerbare suikers. De benodigde medicatie heeft geen invloed op mensen. Dit lijkt dus dé methode om de ziekte te bestrijden.

kennislink.nl

### Fraude in wijn komt aan het licht

Hoe weet je nou of je dure flesje wijn wel uit het jaar komt dat op het etiket gedrukt staat? Het blijkt dat 5% van de dure wijnen een verkeerd wijnjaar op de fles heeft staan. Om deze fraude aan de kaak te stellen hebben Australische onderzoekers een test opgesteld die de verhouding tussen  $^{12}\text{C}$ - en  $^{14}\text{C}$ -atomen in de druiven bekijkt. De verhouding van deze isotopen in de lucht verschilt door de jaren heen door testen met atoombommen in de afgelopen eeuw en deze verhouding is terug te vinden in de druiven. Zo kun je dus achterhalen of een etiket de waarheid spreekt. De methode is afgeleid van de 'echte'  $^{14}\text{C}$ -datering die voor wijn natuurlijk ongeschikt is.

cosmosmagazine.com

### Van uitstel komt afmaken

Om het beste resultaat uit jezelf te halen is het goed om taken tot het laatste moment uit te stellen, nietwaar? We presteren immers goed onder druk. Een studie naar, jawel, pubermuizen bevestigt dit vermoeden dat studenten al jaren hadden. In de puberteit ontwikkelen de muizen een eiwit dat het leervermogen belemmert. Het gen hiervoor bezitten wij studentenmensen ook. Nu blijkt dat het toedienen van een beetje stresshormoon de effecten van het eiwit teniet doet. Dus pak een terrasje en wacht tot de deadline nadert!

nrc.nl

### Onze uitgestorven familie gevonden

40.000 jaar geleden leefde er naast de Neanderthaler en de Homo sapiens nog een soort mens. Dit volgt uit DNA van een vingerbotje uit die tijd. Dit botje is gevonden in een grot in Siberië. Wetenschappers vragen zich af of de menssoorten elkaar ook ontmoet hebben. Ze wachten met naamgeven van deze nieuwe soort tot ze meer zekerheid hebben over wie deze mysterieuze mens was.

news.sciencemag.org

### Oogpatrouille

Groene staar, in de wetenschap bekend als glaucoma, is een ziekte waarbij de oogzenuw verslechtert en de patiënt uiteindelijk blind kan worden. Om dit te voorkomen is het belangrijk om de hoeveelheid vocht in het oog in het oog te houden en dit adequaat bij te stellen. Dat is een probleem; tot nu toe moesten patiënten vaak op bezoek bij de oogartsen of het ziekenhuis. Het Zwitserse bedrijf Sensimed komt nu met de *Triggerfish*, een lens die de vochtigheid van het oog continu registreert. Hierdoor zouden artsen betere behandelplannen voor hun patiënten kunnen opstellen.

technologyreview.com



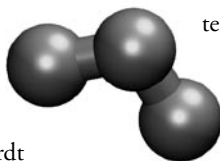
# Op de schouders van Newton

## *Molecuulmodellen op nanoschaal*

DOOR ALEX DE VRIES

Het is moeilijk om het ingewikkelde gedrag dat we dagelijks waarnemen terug te brengen tot fundamentele wisselwerkingen – het is zo mogelijk nog moeilijker om macroscopisch gedrag op basis van fundamentele wisselwerkingen te voorspellen. Toch jagen we deze doelen hartstochtelijk na. Waarom? Het is het meer dan waard!

**D**e groep Moleculaire Dynamica (MD)<sup>1</sup> probeert op basis van de bewegingswetten van Newton het gedrag van voornamelijk biomoleculen te begrijpen en te voorspellen. Moleculen worden daartoe voorgesteld als een verzameling puntmassa's met onderling een aantal zeer eenvoudige afstandsafhankelijke wisselwerkingen. Met behulp van een computer wordt, uitgaande van een of andere beginsituatie, uitgerekend waar de massa's zich in de loop van de tijd bevinden en op basis daarvan wordt uitgerekend wat de structurele en dynamische eigenschappen van de (verzameling van) moleculen zijn.



Als je erover nadenkt is het eigenlijk vreemd dat we zoiets aandurven. We weten dat de klassieke mechanica niet werkt voor het beschrijven van het gedrag van kleine deeltjes: op die ruimte- en tijdschaal heerst de kwantummechanica. En dan hebben we het nog niet gehad over de grootte van ons systeem: we beschrijven maximaal enkele duizenden biomoleculen (vaak maar één eiwit of een paar honderd lipiden; de 'grote' aantallen zijn kleine moleculen zoals water) en dat doen we gedurende slechts enkele honderden nanoseconden. Zet hier tegenover de ruimte- en tijdschalen waarop we experimenteel naar deze moleculen kunnen kijken en de zaak lijkt volledig hopeloos. In dit artikel zal ik proberen duidelijk te maken waarom het toch zinvol kan zijn op deze manier met moleculen te werken en wat de uitdagingen in het vakgebied zijn voor de nabije toekomst.

### Waarom computermodellen?

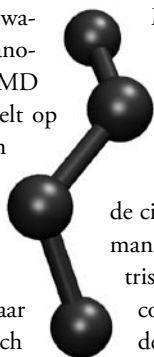
Een eerste goede reden om MD-simulaties te doen is een heel algemene reden, namelijk dat we alleen een beetje vat kunnen krijgen op de complexiteit van de wereld om ons heen door deze aan te duiden in termen van modellen. Wij kunnen ons nauwelijks voorstellen hoe wetenschappers zonder het molecuulmodel door het leven gingen; toch is het nog maar zo'n dikke honderd jaar geleden dat men dit model algemeen accepteerde. Om geloofwaardig te zijn, moet een model experimentele waarnemingen kunnen verklaren en voorspellingen kunnen doen. Het is dus belangrijk een voorgesteld model te doorgronden en de grenzen ervan op te zoeken.

Met het molecuulmodel zoals wij dat in onze groep gebruiken, kunnen we een groot deel van de thermodynamische eigenschappen van gassen, vloeistoffen en vaste stoffen kunnen beschrijven en voorspellen door moleculen voor te stellen als klassieke puntmassa's met relatief eenvoudige onderlinge wisselwerkingen. Met dit model kunnen we echter de meeste elektronische eigenschappen niet beschrijven, dat wil zeggen, eigenschappen waarbij elektronische overgangen gemoeid zijn; ook is de vorm van de gebruikte wisselwerkingen niet zodanig dat chemische reacties kunnen worden beschreven. Afgezien daarvan kan in principe alles.

Dat brengt ons bij een tweede goede reden om MD-simulaties te doen: het is in principe mogelijk het thermodynamisch gedrag van een verzameling moleculen

<sup>1</sup> [www.rug.nl/gbb/research/researchgroups/moleculardynamics](http://www.rug.nl/gbb/research/researchgroups/moleculardynamics)

te voorspellen. Dat kan een enorme besparing opleveren in het doen van experimenten en helpen bij het ontwerp van moleculen of stoffen met specifieke functies. De nog altijd groeiende beschikbare rekenkracht zorgt er 'vanzelf' voor dat onze simulaties steeds realistischer worden als het gaat om de tijd- en ruimteschaal. Als je de literatuur bekijkt zie je dat, waar men twintig jaar geleden rekende aan systemen met 256 watermoleculen gedurende enkele honderden picoseconden, men nu werkt met enkele honderden lipidemoleculen omgeven door tienduizenden watermoleculen gedurende enkele honderden nanoseconden. Een van de ontwikkelaars van de MD in Groningen, Wilfred van Gunsteren, voorspelt op basis van de vorderingen van de afgelopen jaren dat men in het jaar 2172 een simulatie van de mens op de moleculaire schaal zal kunnen doen gedurende een seconde. Tegen die tijd zal het natuurlijk zaak zijn al die informatie terug te brengen tot een begrijpelijk model, maar dat terzijde. Het gaat erom dat macroscopisch gedrag af te lezen is uit een simulatie net als uit een experiment; maar het is makkelijker de moleculen vervolgens te veranderen in een simulatie dan in werkelijkheid. Wij hoeven geen lastige syntheses te doen, of toestemming te krijgen van ethische commissies, wij veranderen gewoon een paar getallen!



## Hiërarchisch modelleren

Natuurlijk moeten de wisselwerkingen tussen onze deeltjes de werkelijkheid goed genoeg beschrijven: naarmate meer experimentele data beschikbaar komt, kan de beschrijving beter zijn. Er is echter nog een andere route naar het vinden van een nauwkeuriger beschrijving van wisselwerkingen, namelijk door een nog beter model van moleculen te gebruiken, een in termen van kernen en elektronen. We moeten dan de Schrödingervergelijking oplossen, die de eigentstanden van het systeem met bijbehorende energieën beschrijft. Dit doen we voor verschillende paren van moleculen bij verschillende afstanden en oriëntaties. Zo kunnen we de effectieve wisselwerking tussen de kernen en elektronen benaderen met een wisselwerking tussen puntmassa's die een of meer 'atomen' in

de moleculen voorstellen. Zo'n procedure heet *coarse graining* en is een algemene term voor wat we doen in een hiërarchisch model: op elke tijd- en ruimteschaal is de effectieve wisselwerking tussen 'bouwstenen' het gevolg van de collectieve wisselwerking tussen meer gedetailleerde bouwstenen. Niemand zal proberen het weer te voorspellen aan de hand van de bewegingen van alle kernen en elektronen in de atmosfeer, maar toch is dat in principe wat je moet doen.

Maar is dat eigenlijk wel zo? Hoe zit het met de quarks? Inderdaad: je hoeft op een bepaalde tijd- en ruimteschaal niet alles te weten, omdat sommige wisselwerkingen op die schaal zijn uitgemiddeld! De ons bekende natuurwetten zijn eigenlijk via deze route ontdekt. Zo is de cirkel rond en kunnen we dus modelleren op twee manieren: met empirische kennis een model parametriseren op een bepaalde ruimte- en tijdschaal, of een coarse-grained model afleiden uit een gedetailleerder model.

## Onze molecuulmodellen

In onze groep zijn we momenteel druk bezig met het ontwikkelen en toepassen van een coarse-grained model voor biomoleculen dat vooral van de empirische soort is, maar ook gedetailleerdere informatie bevat. Dit zogenaamde MARTINI-model is niet alleen genoemd naar onze eigen stadsheilige, maar ook naar het bekende drankje: de bouwstenen waaruit het bestaat zijn namelijk goed te mixen met elkaar en met een gedetailleerder of grover model. De filosofie van de aanpak is schematisch weergegeven in figuur 1 op pagina 9.

In deze figuur zijn de twee modellen aangegeven waarmee we in onze groep werken. Links zien we het atomistische model waarin elk atoom in een molecuul expliciet wordt beschreven als puntmassa met wisselwerking. Rechts in de figuur zien we het coarse-grained MARTINI-model waarin ongeveer vier atomen worden samengevoegd tot een 'superatoom'. In scheikundige termen is dit vergelijkbaar met een kleine functionele groep zoals een alcohol, ester of

amide. De eigenschappen van de bouwstenen worden gekalibreerd op basis van gemeten thermodynamische eigenschappen van kleine moleculen die de functionele groep vertegenwoordigen, bijvoorbeeld methanol of ethanol voor de alcohol, methylacetaat voor de ester en methylamide voor de amide.

De eigenschappen die gebruikt worden voor kalibratie zorgen ervoor dat het volume dat de moleculen innemen klopt (uit dichtheidsgegevens van de vloeistoffen), en dat ook de cohesie tussen de moleculen correct is (uit de warmte die nodig is om een vloeistof te laten verdampen). Een andere heel belangrijke soort van experimentele gegevens is de oplosbaarheid van de verschillende moleculen in elkaar. Deze zogenaamde partitie-eigenschappen spelen een cruciale rol in de chemie van het leven; denk bijvoorbeeld aan wat een geneesmiddelmolecuul moet ondergaan om te kunnen werken. Zo moet het natuurlijk affiniteit hebben voor de plek in de cel waar het zijn werk moet doen. Een eiwit-inhibitor bijvoorbeeld moet zich bij voorkeur in het actieve centrum van het eiwit nestelen; als het actieve centrum voornamelijk hydrofoob (olieachtig) is, moet de inhibitor dat ook zijn. Dat schept echter een probleem, want het eiwit bevindt zich min of meer in een zoutoplossing, waarin de inhibitor misschien wel zo slecht oplost dat hij neerslaat en dus niet of nauwelijks naar de plek van bestemming kan worden getransporteerd. De balans tussen allerlei voorwaarden van dit soort is nogal precair en dat maakt het ontwerpen van moleculen met een specifieke werking erg moeilijk, maar natuurlijk ook uitdagend.

Het model moet dus tenminste de essentiële fysica van de processen bevatten om nuttige verklaringen en kwalitatieve voorspellingen te doen, maar voor het doen van kwantitatieve voorspellingen moeten de details goed bekend zijn. Derhalve is de tweede stap in het opzetten van een goed model het testen van het gedrag van wat ingewikkeldere moleculen die opgebouwd zijn uit een aantal van de functionele groepen die we in de eerste stap hebben gedefinieerd. Op basis hiervan kunnen we zien in hoeverre de wisselwerking tussen de functionele groepen additief is: er kunnen

goede redenen zijn waarom de nabijheid van twee verschillende functionele groepen in hetzelfde molecuul iets andere eigenschappen oplevert dan wanneer die groepen zich in verschillende moleculen bevinden. Dit heeft weer alles te maken met de mate van detail waarin we de moleculen beschrijven: in het model waarin de elektronen aanwezig zijn kunnen die zich herverdelen over twee functionele groepen, waardoor de functionele groepen van karakter veranderen. Ons model biedt deze mogelijkheid niet, want we beschrijven de elektronen niet. Vergelijkbare overwegingen spelen natuurlijk een rol wanneer we het atomistisch en coarse-grained model vergelijken: naarmate we meer details weglaten wordt het model minder specifiek en moeten meer wisselwerkingen expliciet aangepast worden als we met ons model een specifiek molecuul willen beschrijven.

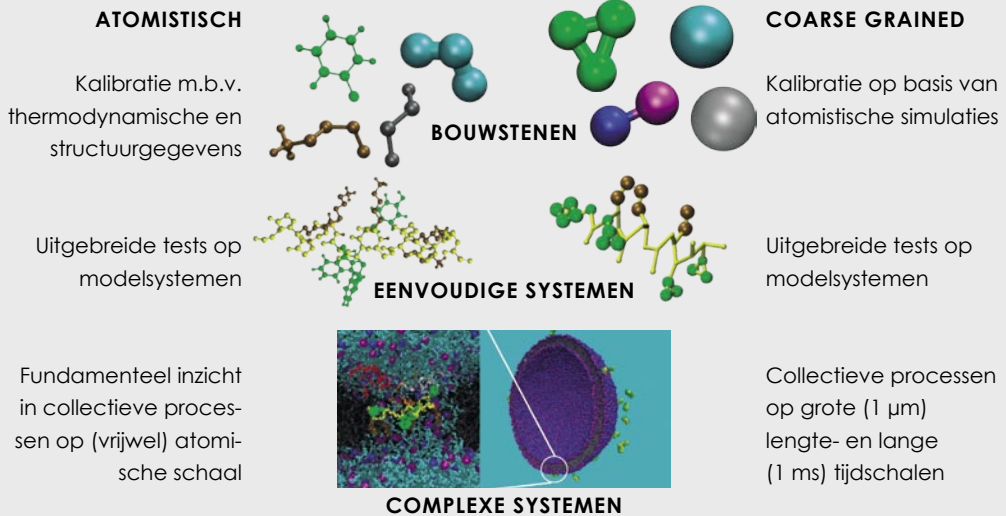
## Een kijkje in de moleculaire keuken

Zijn we tevreden met de beschrijving van onze moleculen en hun wisselwerkingen, dan kunnen we echt interessante processen gaan bekijken, zoals de poratie van biologische membranen door antimicrobiële peptiden. Linksonder in figuur 1 is in atomistisch detail weergegeven hoe zo'n porie eruit zou kunnen zien: de korte peptidemoleculen (het meest centrale is geel-groen gekleurd) overspannen het membraan, dat uit lipidemoleculen bestaat.

Doordat de peptiden zich thuisvoelen in de interface tussen lipide en water adsorberen ze daar en verstoren het lipidemembraan zodanig dat dit plaatselijk instabiel wordt. Hierdoor vormt zich een interface door het binnenste van het membraan heen en worden binnen- en buitenkant van een zogenaamde vesikel (een holte in de opperhuid, gevuld met helder vocht) met elkaar verbonden door een porie. Rechts zie je een dwarsdoorsnede, waarbij het membraan de schil is van de bol die binnen- en buitenkant van elkaar scheidt. Nu kunnen wateroplosbare moleculen ongehinderd van binnen naar buiten en omgekeerd stromen, hetgeen eerder door de olieachtige binnenkant van het membraan werd verhinderd. Vele vitale processen hangen af van het verschil in concentratie van moleculen binnen en bui-



## SYSTEMATISCHE AANPAK VOOR MODELLEREN OP MEERDERE SCHALEN



**FIGUUR 1** Molecuulmodellen op verschillende ruimte- en tijdschalen

ten. In het lekkende vesikel worden deze processen verstoord, waardoor de cel sterft.

Het idee van het gebruik van meerdere tijd- en ruimteschalen zal nu duidelijk zijn: het coarse-grained niveau is voldoende om te bestuderen hoe de antimicrobiële peptiden een membraan naderen, eraan adsorberen en zich over het oppervlak bewegen. Voor poratie zijn meer specifieke wisselwerkingen belangrijk en daar is een atomistisch model adequater. Door een combinatie van de modellen kunnen deze processen in hun geheel worden beschreven en kan een realistischer beeld van de werkelijkheid verkregen worden.

Hoewel de toepassingen van deze techniek zich in onze groep tegenwoordig vooral richten op biomoleculaire processen, is er ook voor echte fysici en (toegepaste) wiskundigen voldoende te beleven in het vakgebied; de groep bestaat uit een mix van onderzoekers met verschillende achtergronden. Er is enorme belangstelling voor technische en theoretische aspecten die te maken hebben met het efficiënter integreren van de bewegingsvergelijkingen en het

consistent combineren van modellen op verschillende tijd- en ruimteschaal. Mocht je een bijdrage willen leveren, dan ben je altijd van harte welkom om te komen praten over een bachelor-, master-, of promotie-onderzoek in onze groep. •

### Aanbevolen literatuur

- **Numerieke aspecten**  
Allen, M.P. en Tildesley, D.J. "Computer Simulation of Liquids." Oxford University Press, 1987.
- **Theorie van ruimte- en tijdschalen**  
Berendsen, H.J.C. "Simulating the Physical World: Hierarchical Modeling from Quantum Mechanics to Fluid Dynamics." Cambridge University Press, 2007.
- **Het GROMOS-krachtenveld**  
Oostenbrink, C., Villa, A., Mark, A.E. en Van Gunsteren, W.F. "A biomolecular force field based on the free enthalpy of hydration and solvation: The GROMOS force-field parameter sets 53A5 and 53A6." J. Comput. Chem. 25, 1656, 2004.
- **Het MARTINI-model**  
Marrink, S.J., Risselada, H.J., Yefimov, S., Tieleman D.P. en De Vries, A.H. "The MARTINI force field: coarse grained model for biomolecular simulations." J. Phys. Chem. B 111, 7812, 2007.

# The Science of Ringworld

DOOR THOMAS TEN CATE

In 1970 publiceerde Larry Niven zijn beroemde sciencefictionroman *Ringworld*. Hierin beschrijft hij een kunstmatige wereld die als een ring om zijn ster heen draait. Hoewel Niven duidelijk grote moeite heeft gedaan om alle verhaalelementen zo goed mogelijk wetenschappelijk te onderbouwen, zag hij een belangrijk feit over het hoofd.

**D**e Ringwereld is een gigantische ring in de ruimte met een ster als middelpunt (figuur 1). De ring heeft een breedte van 1,6 miljoen kilometer en een straal van ongeveer 150 miljoen kilometer, oftewel de afstand Aarde–Zon, goed voor een oppervlakte van drie miljoen maal die van de Aarde. Om zwaartekracht op te wekken draait de ring om zijn as. Aan de randen houden 1600 kilometer hoge muren een atmosfeer binnen. Panelen in een kleinere baan om de zon zorgen voor dag en nacht. Op de binnenkant van de ring is daardoor leven mogelijk.

De massa van de Ringwereld is ongeveer gelijk aan die van alle planeten in ons zonnestelsel samen. Je kunt je voorstellen dat zo'n grote ring dan erg dun moet zijn, en inderdaad ontdekken de avonturiers in *Ringworld* dat de bodem slechts zo'n dertig meter dik is. Om zijn fictieve wereld sterk genoeg te maken moest Niven daarom toevlucht nemen tot een fictief materiaal, *scrith*, met een sterkte die te vergelijken is met de sterke kernkracht binnen atomen. Dit is een van de weinige gevallen waar wetenschappelijke aannemelijkheid wordt opgeofferd voor de verhaallijn.

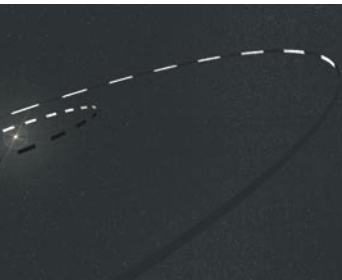
Maar wat was nu het grote probleem dat Larry Niven in het eerste deel van de *Ringworld*-serie over het hoofd had gezien? De Ringwereld is niet stabiel! Maar voordat we daar verder op ingaan, moeten we een uitstapje maken naar een nog exotischer wereld, de Dysonschild.

## De Dysonschild

De natuurkundige en wiskundige Freeman Dyson beschreef in 1959 in een gedachtenexperiment een bolvormige schil die de bijbehorende ster volledig omsluit.<sup>1</sup> Zo'n schil zou alle energie van de ster kunnen opvangen en zo een oplossing vormen voor de groeiende energiebehoefte van onze, of een andere, beschaving.

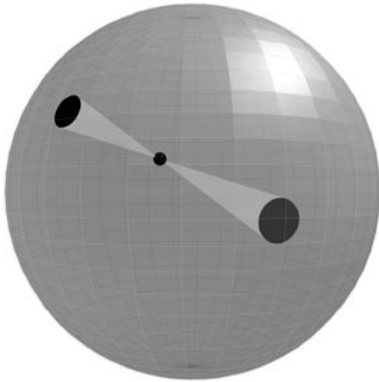
Als je echter op vakantie zou willen naar de binnenkant van zo'n schil, zou je voor een nare verrassing komen te staan. De schil oefent namelijk geen aantrekkingskracht uit op alles wat zich daarbinnen bevindt! Het probleem is zelfs nog groter: de ster zelf oefent wel aantrekkingskracht uit, en je zonzvakantie zou erg vervelend aflopen.

Maar hoe komt het nu dat je binnen een Dysonschild geen zwaartekracht voelt? Stel je voor dat je je ergens binnen de schil bevindt en door een telescoop in een bepaalde richting kijkt, zoals in figuur 2. Het stukje van de schil dat je ziet oefent een bepaalde aantrekkingskracht op je uit, te weten  $F = GMm/r^2$ . Hierin zijn  $G$  en  $m$  de zwaartekrachtconstante en je eigen massa, en dus beide onafhankelijk van je positie:  $F \sim M/r^2$ .  $r$  is de afstand tot het stukje schil dat je ziet, en  $M$  is de massa ervan; we nemen aan dat de massa van de schil uniform verdeeld is, en dat  $M$  dus evenredig is met de oppervlakte. De oppervlakte van het stukje schil dat je kunt zien is evenredig met het kwadraat van de afstand:  $M \sim r^2$ . Vul dit in, en je vindt  $F \sim r^2/r^2 = 1!$  Hoe je dus je telescoop ook richt, de kracht die het

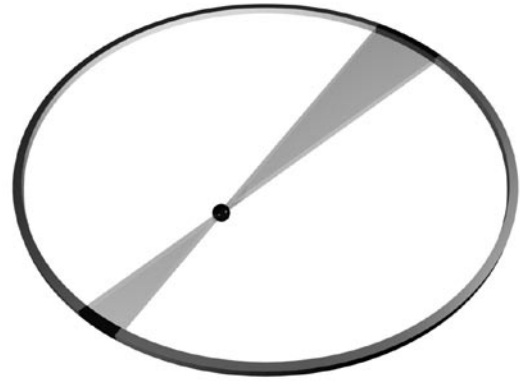


**FIGUUR 1** De Ringwereld en de panelen, op schaal getekend.

<sup>1</sup> Althans, dit is de populaire opvatting van zijn idee. In werkelijkheid was het gecoördineerd.

**FIGUUR 2**

De aantrekkingskrachten die de gemarkeerde stukjes Dysonschil op je uitoefenen heffen elkaar precies op.

**FIGUUR 3**

Het dichterbij gelegen segment van de Ringwereld oefent een grotere aantrekkingskracht op je uit dan het tegenoverliggende segment.

stukje bolschil op je uitoefent is altijd hetzelfde. In het bijzonder is de kracht precies hetzelfde als je 180 graden omdraait, waarmee is aangetoond dat al deze krachten elkaar netto precies opheffen.<sup>2</sup>

Het gevolg is dat de Dysonschil geen kracht uitoefent op de ster die hij omsluit. Enige beginsnelheid die de schil heeft ten opzichte van de ster zal dus niet veranderen, en de kleinste beginsnelheid zal er uiteindelijk toe leiden dat de schil met de ster in botsing komt. Het goede nieuws is natuurlijk dat de snelheid tijdens dit proces niet toeneemt, en je dus als Dysonschilbewoner tijd genoeg hebt om je wereld weer op zijn plaats te duwen.

## De Ringwereld

Hetzelfde rekensommetje dat we zojuist toepasten op de Dysonschil, kunnen we ook toepassen op de Ringwereld. In dit geval modelleren we de wereld niet als een bolschil, maar als een cirkel, te zien in figuur 3. Weer nemen we aan dat de massa van een segmentje evenredig is met de oppervlakte van dat segmentje,

en dat vertaalt zich nu naar lengte. Echter, de lengte van het segmentje dat je kunt zien in je telescoop is niet langer evenredig met het kwadraat van de afstand, maar met de afstand zelf! Hierdoor vinden we  $F \sim r/r^2 = 1/r$ , oftewel, segmentjes die zich dichterbij je bevinden trekken harder aan je, en dit wordt niet opgeheven door tegenoverliggende, grotere segmentjes; je valt richting het dichtstbijzijnde stuk van de Ringwereld.

Natuurlijk geldt dit niet alleen voor een dappere avonturier met een telescoop, maar ook voor de ster zelf. Als die exact in het midden van de ring staat is er sprake van een evenwicht, maar dit is labiel: de kleinste afwijking zal ervoor zorgen dat de ster, met een toenemende snelheid, naar de ring toe valt, of – equivalent – de ring naar de ster.

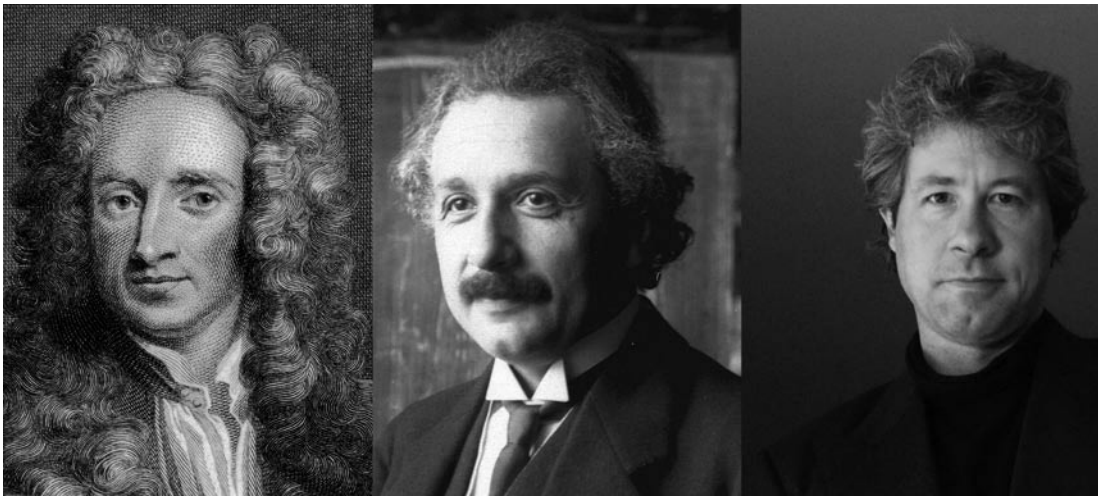
Om de Ringwereld op zijn plaats te houden zul je dus wat meer werk moeten doen dan bij een Dysonschil. Dankzij zijn vele oplettende lezers realiseerde Larry Niven zich dit, en in plaats van zijn hoofd in het zand te steken maakte hij handig gebruik van zijn fout. Hoe de bouwers van de Ringwereld het probleem van de instabiliteit hebben opgelost, en wat daarbij mis kan gaan, kun je namelijk lezen in het tweede deel van de Ringworld-serie: *Ringworld Engineers*. •

<sup>2</sup> Het is iets genuanceerder, want je ziet het stukje bolschil onder een hoek. Het tegenoverliggende stukje zie je echter onder dezelfde hoek.

# De oorsprong van Newton

DOOR ROEL ANDRINGA

Donderdag 18 maart kwam Erik Verlinde in Groningen om over zijn nieuwste artikel te praten, *On the origin of gravity and the laws of Newton* [1]. Gezien de drukte in de zaal was ook hier in Groningen de nieuwsgierigheid groot. Is dit idee een nieuwe valide manier om tegen zwaartekracht aan te kijken? In wat volgt zullen de belangrijkste argumenten aan bod komen om te geloven dat de oorsprong van zwaartekracht misschien wel entropisch is.



**FIGUUR 1** Drie natuurwetenschappers. Van links naar rechts Isaac Newton, Albert Einstein en Erik Verlinde. Newton bedacht de bekende formules om zwaartekracht te beschrijven, Einstein beweerde vervolgens dat zwaartekracht een fundamentele kracht is en Verlinde stelt nu dat dat wellicht niet zo is.

**D**e vorige Periodiek gaf al een opzet voor het begrip holografie, wat een belangrijke rol speelt in dit artikel. Dus mocht die nog niet in de prullenbak liggen [nou ja zeg! – red.] dan is het handig om die Perio er nog eens bij te nemen, maar noodzakelijk is het zeker niet.

## Holografie

Het belangrijkste ingrediënt van Verlindes artikel is het concept *holografie*. Het holografische principe vertelt ons dat wanneer je de microscopische vrijheidsgraden van een fysisch systeem in een volume  $V$  in  $D$  ruimte-

tijd-dimensies wilt beschrijven, je hiervoor in bepaalde gevallen niet het hele volume  $V$  nodig hebt. De  $(D - 1)$ -dimensionale rand van  $V$  is voldoende. Met ‘microscopische vrijheidsgraden’ worden hier de fundamentele vrijheidsgraden bedoeld. Voor een gas zouden dat bijvoorbeeld de vrijheidsgraden van de gasmoleculen zijn, en dus niet de beweging van het gas als geheel. Denk aan het aantal verschillende richtingen waarin het molecuul kan trillen, of interne vrijheidsgraden zoals de spin van de atomen in een magneetveld.

De argumenten hiervoor kun je in de vorige Perio lezen, maar een reden is de zogenaamde AdS/CFT-

correspondentie. Deze legt een link tussen theorieën met zwaartekracht in  $D$  ruimtetijd-dimensies en theorieën zonder zwaartekracht in  $(D - 1)$  ruimtetijd-dimensies. Door naar theorieën van zwaartekracht te kijken is men dus op het concept van holografie gekomen. In Verlindes artikel wordt deze logica omgedraaid: het uitgangspunt is holografie en de stelling is nu dat holografie zwaartekracht impliceert!

## Entropische krachten

Entropische krachten zijn krachten ten gevolge van de neiging van een systeem om de entropie te maximaliseren. De entropie is de mate van wanorde van een systeem en deze wanorde wordt gemaximaliseerd omdat dit statistisch het meest waarschijnlijk is. Deze toestand van gemaximaliseerde entropie noemen we evenwicht. Wanneer je een systeem uit evenwicht trekt zal er een proces op gang komen waarbij het evenwicht uiteindelijk weer hersteld zal worden, en met dit proces is een kracht te associëren.

Het idee dat zwaartekracht niet fundamenteel is, maar opduikt ten gevolge van meer fundamentele principes werd voor het eerst geopperd door Sakharov in de jaren zestig [2]. Het AdS/CFT-principe is hier min of meer een toepassing van; hierin induceren de microscopische vrijheidsgraden op de rand van het volume  $V$  zwaartekracht in dit volume. Je zou dus kunnen zeggen dat zwaartekracht niet meer fundamenteel wordt beschreven door Einsteins theorie, maar door holografie en die theorie op de rand van de ruimtetijd. Einsteins beschrijving is daarmee slechts een effectieve beschrijving van zwaartekracht, iets waar we later nog op terug komen.

Bij entropische krachten zijn dus geen krachtvelden in het spel, zoals bij de elektrische of magnetische kracht; de oorsprong is uiteindelijk puur statistisch. Bij een vak klassieke mechanica leer je dat zwaartekracht ook door een krachtveld wordt beschreven, maar in het artikel van Verlinde wordt de oorsprong van zwaartekracht geherinterpreteerd door deze als een entropische kracht te zien. Met een entropie wordt in de thermodynamica echter een temperatuur  $T$  geasso-

ciëerd, dus we zullen eerst moeten begrijpen hoe die temperatuur in het verhaal terecht komt.

## Het Unruh-effect

Hiervoor wordt een effect aangehaald dat al in de jaren zeventig door verschillende mensen is aangestipt [3]. Dit *Unruh-effect* stelt het volgende:

*Een uniform versnellende waarnemer zal thermische straling waarnemen in een stuk ruimtetijd waar een inertiaalwaarnemer geen enkele straling zal waarnemen.*

De reden is dat inertiaalwaarnemers simpelweg een ander vacuüm definiëren dan versnellende waarnemers. Met vacuüm wordt de laagste energietoestand bedoeld. Wat een inertiaalwaarnemer een vacuüm noemt, zal dan voor een versnellende waarnemer juist een stuk ruimtetijd zijn waarin thermische straling met een temperatuur  $T$  voorkomt! De voorspelling van het Unruh-effect is dat deze waargenomen temperatuur  $T$  recht evenredig is met de versnelling  $a$ . Hoewel dit idee experimenteel nog niet duidelijk is aangetoond, zijn de meeste fysici overtuigd van de juistheid ervan. Nu kun je je afvragen: kun je dit Unruh-effect ook omdraaien? Impliceert een temperatuur ook een versnelling?

Volgens Verlinde is dit mogelijk, maar voordat we kijken wat de implicaties van deze omdraaiing zijn, hebben we een laatste ingrediënt nodig: het zogenaamde equipartitietheorema.

## Energie verdelen

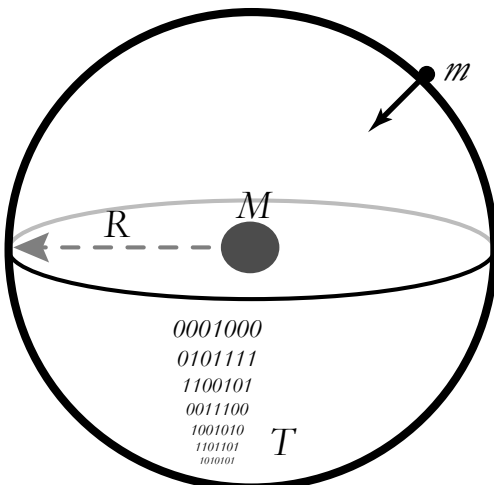
Het equipartitietheorema vertelt je hoe de energie van een systeem over de verschillende microscopische vrijheidsgraden wordt verdeeld. De temperatuur  $T$  speelt hierin een belangrijke rol. Voor een ideaal gas zegt het theorema bijvoorbeeld dat er met elke microscopische vrijheidsgraad een energie  $\frac{1}{2}k_B T$  gepaard gaat, waarbij  $k_B$  de Boltzmannconstante is. Een simpele toepassing hiervan is op een gas met  $N$  moleculen. Als een molecuul in drie richtingen kan trillen, dan heeft het

dus drie vrijheidsgraden. Per molecuul voorspelt het equipartitietheorema dan dat de gemiddelde energie  $\frac{3}{2}k_B T$  is, en de totale energie  $E$  wordt dan gegeven door  $E = N\frac{3}{2}k_B T$ . De temperatuur is zo dus een maat voor de gemiddelde energie per molecuul.

Nu hebben we alle ingrediënten om de logica van Verlinde's artikel [1] te bekijken!

### Zwaartekracht als entropische kracht

De redentie is als volgt. Stel je een systeem voor met een bepaalde massa  $M$  en energie  $E = Mc^2$ . Het holografische principe vertelt je dan dat je de microscopische vrijheidsgraden van dit systeem kunt beschrijven door een bol om dit systeem heen te leggen. Alle informatie over de microscopische vrijheidsgraden van het systeem kun je zo op die bol projecteren. Nu associeert



**FIGUUR 2** Het idee van entropische zwaartekracht. Informatie over massa  $M$  op een boloppervlak met straal  $R$  zorgt via het omgekeerde Unruh-effect voor een versnelling van massa  $m$  richting massa  $M$ .

het equipartitietheorema aan deze energie  $E$  en het aantal vrijheidsgraden een bepaalde temperatuur  $T$ , net zoals met de gasmoleculen. En wat Verlinde dan doet, is precies het Unruh-effect omdraaien: deze temperatuur zal voor een versnelling  $a$  zorgen! Het aardige is dat wanneer je de formules erbij pakt en dit allemaal invult, je precies op Newtons vergelijking voor de aantrekking tussen een massa  $m$  en een massa  $M$  met afstand  $R$  ertussen uitkomt:  $F = GMm/R^2$ . Ook Newtons bekende  $F = ma$  wordt op een soortgelijke manier afgeleid. De conclusie volgens Verlinde is dan ook: zwaartekracht is geen fundamentele kracht, maar een entropische kracht ten gevolge van het holografische principe!

### Omgedraaide logica

Het artikel is interessant omdat er logica wordt omgedraaid. De formules zijn allemaal al lang bekend, maar er wordt een ander uitgangspunt genomen: holografie. Deze manier van logica omdraaien is vaker toegepast in de wetenschap. Tijdens de opkomst van de kwantummechanica wist men bijvoorbeeld geen raad met de commutatierelaties tussen verschillende grootheden. Het maakte plotseling verschil of je eerst de positie van een deeltje ging meten en daarna de impuls, of andersom! Tegenwoordig worden deze commutatierelaties als uitgangspunt genomen wanneer je een klassiek systeem de regels van de kwantummechanica wilt opleggen.

Een ander voorbeeld is de golf-deeltjesdualiteit die De Broglie introduceerde in 1924. Daarvoor was al bekend dat je voor fotonen zowel een golf- als een deeltjesbeschrijving nodig had. De Broglie nam deze dualiteit als uitgangspunt in zijn proefschrift en poneerde dat deze dualiteit voor *elk* deeltje geldt, en niet alleen voor fotonen. Vervolgens probeerde hij uit te vinden wat de implicaties van deze boude stelling waren. Dit principe bleek een van de grondbeginselen van de kwantummechanica te zijn.

Hoewel De Broglie volgens de leescommissie van zijn proefschrift een goede verdediging gaf en uiteindelijk ook zijn titel kreeg, werd zijn idee niet gelijk

met open armen ontvangen [4]. In Verlinde's artikel [1] wordt eigenlijk het holografische principe op een soortgelijke manier uitgebreid; uiteindelijk geldt het niet alleen voor alleen zwaartekrachtssystemen, maar voor *alle* systemen.

## Implicaties en verder

Het is moeilijk in te schatten wat nu precies de implicaties zijn van het idee dat zwaartekracht entropisch is. Als het juist blijkt te zijn dan zullen we onze ideeën over zwaartekracht moeten bijschaven. In de snaartheorie bijvoorbeeld wordt zwaartekracht beschreven via 'gravitonen': trillingsmodi van gesloten snaren. Deze gravitonen zouden dan slechts een effectieve beschrijving zijn, en niet een fundamentele.

Een voorbeeld van zo'n effectieve beschrijving in de gecondenseerde materie is een fonon. Een fonon is het deeltje dat fysici associëren met trillingen in kristalstructuren van vaste stoffen. Door dit kwantummechanisch te beschrijven blijkt je deze trillingen te kunnen beschrijven als excitaties van deeltjes, maar deze trillingen kun je uiteindelijk herleiden tot fundamentele krachten zoals elektromagnetische interacties. Dit soort deeltjes noemt men ook wel 'quasideeltjes' [5], hoewel het in de literatuur nogal eens de vraag is wat men nu precies quasideeltjes noemt en wat het precieze verschil met reële deeltjes is. Gravitonen zouden dan ook een soort quasideeltjes zijn; we kunnen het gravitonformalisme gebruiken als effectieve beschrijving voor zwaartekracht. Maar uiteindelijk ligt het entropische principe ten grondslag aan het fenomeen zwaartekracht!

Tot nu toe is er alleen klassieke, Newtoniaanse zwaartekracht beschreven, maar in [1] wordt ook een opzet gemaakt om de Einsteinvergelijkingen van de algemene relativiteitstheorie op dezelfde manier af te leiden. Dat deze Einsteinvergelijkingen een diepe connectie lijken te hebben met de thermodynamica was al enige tijd bekend. Entropische zwaartekracht zou in elk geval effectief moeten kunnen worden beschreven via de Einsteinvergelijkingen in het algemene geval, dus daar ligt nog een uitdaging voor het idee.

Uiteindelijk zal de theorie van entropische zwaartekracht voorspellingen moeten gaan doen waarin het van de theorie van Einstein verschilt. Hiervoor wendde men zich de laatste paar maanden tot de kosmologie; wellicht zou de entropische beschrijving een verklaring geven voor wat wij 'donkere materie' en 'donkere energie' noemen en waarom het universum versneld lijkt uit te rijden. Ook zou de entropische aard van zwaartekracht misschien in de kosmische achtergrondstraling terug te vinden zijn. Deze ideeën staan echter nog in de kinderschoenen, maar het mag duidelijk zijn dat het idee ook voor kosmologie erg interessant is.

## Tot slot

Mocht je enige natuurkundige achtergrond hebben, dan is het zeker aan te raden om zelf eens het artikel van Verlinde te gaan lezen. Zoals al eerder werd aangegeven zijn de formules vrij eenvoudig. De toekomst zal moeten uitwijzen of het artikel een volgende stap is in ons begrip over de aard van zwaartekracht, ruimte en tijd of dat het een cirkelredenering blijkt te zijn. •



## Referenties

- [1] E. Verlinde, "On the origin of gravity and Newton's law", arXiv: 1001.0785
- [2] A.D.Sakharov, "Vacuum fluctuations in curved space and the theory of gravitation"
- [3] P. Duffel, "Quantum field theory in curved spacetime" (een pedagogische uitleg)
- [4] J. Mehra, H. Reichenberg, "The historical development of quantum theory"
- [5] en.wikipedia.org/wiki/Quasiparticle

# Je eigen supercomputer

DOOR PJOTR SVETACHOV

Vroeger had je supercomputers ter grootte van een gymzaal. En hoewel iedere natuurwetenschapper wel een supercomputer thuis wilde hebben, zou hij daar heel wat voor moeten opofferen. Tegenwoordig hebben veel mensen zonder het te weten een kleine supercomputer in huis: de videokaart.

**A**ls je de top-500 van supercomputers bekijkt, zie je helemaal onderin de lijst tien jaar oude supercomputers staan. Deze zijn enorm groot, produceren veel warmte en zorgen voor een heel hoge stroomrekening. Zou je zelf een computer samenstellen met 25 tot 30 videokaarten, dan zou je een grotere *peak performance* kunnen halen dan deze bakken. En door een lagere stroomrekening zou je het geld ook nog eens binnen paar maanden kunnen terugverdienen.

Zes jaar geleden was videokaartrekenen nog iets voor onderzoekers en hobbyisten. Maar binnen een paar jaar hebben de grote videokaartproducenten, NVIDIA en ATI Technologies (nu overgenomen door AMD), zich volledig gestort op rekenen op deze wijze. Door nieuwe programmeertalen of betere integratie met oude programmeertalen is het voor veel consumenten makkelijk om zelf op zo'n supercomputer te programmeren.

## De videokaart

Waarom is de videokaart zo geschikt voor rekenen? Computers hebben toch al een processor (de CPU) en deze kon het rekenwerk toch prima verrichten? Om dit te verklaren, moeten we meer naar de werking van de videokaart kijken.

De videokaart was gemaakt om een deel van het werk van de CPU over te nemen. Om 3D-objecten op het scherm te tekenen zijn namelijk bepaalde berekeningen nodig. Dit zijn vooral simpele berekeningen zoals optellen, aftrekken en vermenigvuldigen met vectoren van vier elementen of  $4 \times 4$ -matrices. Hoewel de CPU deze berekeningen prima kan uitvoeren, bleek het veel efficiënter om een processor te maken speciaal

voor alleen deze berekeningen. Deze processor heet de *Graphics Processing Unit* ofwel de GPU. Het werk dat de GPU moest verrichten bleek ook nog eens goed paralleliseerbaar te zijn. De GPU bestaat daarom uit allemaal kleine processoren, ook wel *cores* genoemd. De nieuwste videokaarten hebben bijvoorbeeld 480 van deze cores.

Hoewel deze cores vroeger voorgeprogrammeerde operaties verrichtten, is het nu mogelijk om door middel van *shaders* deze cores zelf te programmeren. Heel simpel gezegd kun je de berekeningen die de videokaart maakt voordat een pixel getekend wordt, veranderen (voor een uitgebreide beschrijving van hoe shaders werken: zie *Uit het onderzoek* in *Periodiek* 2009-5). Deze functionaliteit was erg gering. Je mocht bijvoorbeeld niet zomaar naar elk geheugen schrijven: het enige 'geheugen' waar naar geschreven kon worden, was de pixel die berekend werd. Verder moest alle data in *textures* worden gecodeerd en dat is even wennen. Het was toen een echte kunst om een algoritme op de GPU te laten draaien.

Voor de GPU geschikte algoritmen moeten heel paralleliseerbaar zijn. Het heeft een groot voordeel als de berekeningen bestaan uit vector- en matrixberekeningen. Nog beter is het als de vectoren niet groter zijn dan vier elementen en de matrices niet groter dan  $4 \times 4$ . Moleculaire dynamica (MD) is een bekend gebruiker van dit type algoritmen. Bij MD gaat het om simulaties van interacties tussen moleculen. Deze interacties kunnen bijvoorbeeld bestaan uit bewegingsvergelijkingen zoals de wetten van Newton (zie ook *Op de schouders van Newton* op pagina 6). Door numerieke integratie kunnen deze gediscretiseerd worden over tijd. De Verlet-integratiemethode is bijvoorbeeld heel bekend binnen MD.



## Programmeren op de GPU

In 2007 lanceerde NVIDIA de *Compute Unified Device Architecture* (CUDA). Deze technologie maakt het mogelijk om de programmeertaal C te gebruiken om op de GPU te programmeren. Apple bracht samen met de Khronos Group in 2008 de *Open Computing Language* (OpenCL) uit en zowel NVIDIA als AMD ondersteunen OpenCL. Microsoft is onlangs met DirectX 11 gekomen wat een vergelijkbaar onderdeel genaamd *DirectCompute* bevat.

Welke technologie je wilt gebruiken, hangt af van je voorkeur. CUDA is bijvoorbeeld het oudste en hierover is het meeste materiaal te vinden, maar je zult moeten beschikken over een grafische kaart van NVIDIA. OpenCL en DirectCompute werken met zowel NVIDIA- als AMD-kaarten, maar zijn nog vrij jong; DirectCompute werkt bovendien alleen maar onder Windows.

Het concept van deze verschillende talen is hetzelfde. Waar je voorheen nog programma's moest schrijven die voor elke pixel uitgevoerd werden schrijf je nu *kernels*. Een kernel kun je zien als een programma dat op een core gedraaid kan worden. Dit lijkt al heel erg op hoe een programma voor een supercomputer geschreven wordt. Zo is het mogelijk om verschillende cores te laten samenwerken.

In principe schrijft men een kernel en geeft men daarna aan hoe vaak deze kernel gedraaid moet worden. Het werk wordt dan verdeeld over de beschikbare cores. Binnen een kernel kan men opvragen op welke core deze dan draait. Een videokaart heeft meestal meerdere chips en elke chip heeft meerdere cores. Elke chip heeft ook nog eens een klein stuk geheugen waar alleen de cores op die chip bij kunnen. Omdat dit extra geheugen heel goed ingezet kan worden, bieden de drie bovengenoemde talen methodes om erachter te komen waar de kernel precies op draait. In OpenCL bijvoorbeeld worden de kernels onderverdeeld in *work groups* en binnen deze work groups weer in *work items*.

## $\pi$ benaderen met OpenCL

Een makkelijk voorbeeld, dat informatici die de vakken APHPS of Parallel Computing hebben gevolgd bekend voor moet komen, is het benaderen van  $\pi$ . Dit wordt gedaan aan de hand van de integraal

$$\int_0^1 \frac{4dx}{1+x^2} = 4 \arctan(x) \Big|_0^1 = \pi$$

Deze integraal kunnen we benaderen door

$$\int_0^1 \frac{4dx}{1+x^2} \approx \Delta x \sum_{i=0}^{N-1} \frac{4}{1 + ((i + 0.5) * \Delta x)^2}$$

Door elke core een deel van de som te laten berekenen kunnen we zo  $\pi$  benaderen. Als we dit in OpenCL willen implementeren, beginnen we met het definiëren van de integrand hierboven:

```
#define F(d) 4.0f/(1.0f + (d)*(d))
```

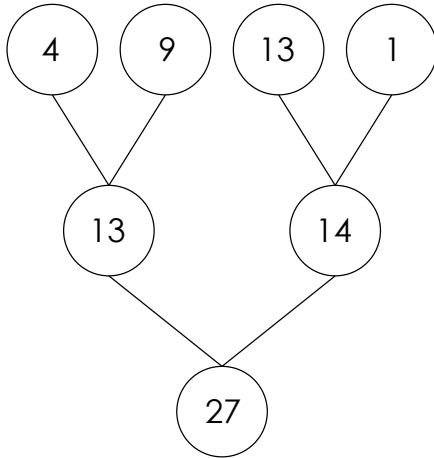
Daarna beginnen we met de functie pi die op elke core gedraaid gaat worden:

```
__kernel void pi(__global float* output,
                __local float* sdata)
```

Deze functie heeft twee parameters. De eerste geeft een globaal toegankelijke buffer aan waar de functie zijn uitvoer moet wegschrijven. De tweede is een lokale buffer die gedeeld wordt door de items binnen dezelfde groep.

We moeten nu eerst uitvinden om welke groep en welk item het gaat:

```
unsigned int tid = get_local_id(0);
unsigned int bid = get_group_id(0);
unsigned int localSize = get_local_size(0);
unsigned int groupSize = get_num_groups(0);
```



**FIGUUR 1:** Voorbeeld van het uitrekenen van een som van vier getallen door reductie.

Met deze gegevens kunnen we nu het werk onderverdelen. Als we de som hierboven in tien miljoen stukken hakken, dan kunnen we door middel van de code hieronder ervoor zorgen dat elke core een ander deel van de som berekent:

```

int N = 10000000;
float dx = 1.0f/N;
float sum = 0;
for(int i = tid; i < N; i += localSize*groupSize) {
    sum += F(dx*(i+0.5f));
}
sum *= dx;
  
```

Daarna moeten we alle antwoorden sommeren. Dit kan natuurlijk op de CPU, maar dat hoeft niet. In de wereld van parallelle computers bestaat er zoiets als een *reduce-operatie*. Dat gaat als volgt: omdat optellen commutatief is, kan men het optellen deels paralleliseren door steeds paarsgewijs twee getallen op te tellen. Dit is voor vier getallen in beeld gebracht in figuur 1. Hiervoor gebruiken we het gedeelde geheugen. Wat we eerst moeten doen is dus het bovenstaande deel van de som opslaan:

```
sdata[tid] = sum;
```

Daarna wachten we tot alle cores klaar zijn met behulp van een *barrier*. Deze methode zorgt ervoor dat we pas verder gaan als alle cores in dezelfde groep bij de barrier zijn:

```
barrier(CLK_LOCAL_MEM_FENCE);
```

We nemen nu de helft van de cores en hiermee sommeren we de getallen. Daarna nemen we daar weer de helft van en sommeren de antwoorden weer. Dit herhalen we:

```

for(unsigned int s = localSize / 2; s > 0; s /= 2) {
    if(tid < s) {
        sdata[tid] += sdata[tid + s];
    }

    barrier(CLK_LOCAL_MEM_FENCE);
}
  
```

Het laatste wat gedaan moet worden is dat elke groep zijn uitvoer wegschrijft naar een buffer. Deze buffer kan dan uitgelezen en gesommeerd worden. Omdat we meestal maar een paar groepen hebben gebeurt dit op de CPU.

```
if(tid == 0) output[bid] = sdata[0];
```

## Toekomst

Ik heb net laten zien wat er nu mogelijk is met een videokaart. De ontwikkeling gaat echter langzamerhand verder. Zo wordt er gewerkt aan wrappers voor verschillende talen zoals Python en Ruby om CUDA en OpenCL vanuit deze talen aan te spreken. Er zijn nu ook plugins voor Matlab die het rekenen op de GPU zo transparant mogelijk proberen te maken. Een paar jaar geleden moest je nog worstelen met pixels en textures, maar over een paar jaar zal je Matlabprogramma zomaar op de GPU draaien zonder dat je het merkt. •



# *Mijn fascinatie*

**Doelgericht innoveren.** Nieuwe producten, nieuwe diensten, nieuwe mogelijkheden creëren. Creatieve antwoorden vinden op de vragen die de samenleving stelt. Werken aan betere oplossingen: sneller, veiliger, slimmer, efficiënter. Dat is mijn fascinatie.

**werkenbijTNO.NL**



# Kokkerellen

DOOR ELLEN SCHALLIG

Voor deze aflevering van Kokkerellen eens niet een achtergrondverhaal bij een (obscuur) gerecht, maar gewoon twee heerlijke chocoladetaarten waarvan de foto's voor zich spreken. De een is met gemalen roze peperkorrels, de ander zónder toegevoegde suikers.

## Taart met pit Bereidingstijd: 45 + 45 + 20 minuten. Moeilijkheid: 🧑🍳🧑🍳🧑🍳🧑🍳🧑🍳

- TAART**
- 225 g extra pure (≥78%) chocola
  - 60 g poedersuiker
  - 120 g bloem
  - 2 tl vers gemalen roze peperkorrels
  - 110 g boter
  - 7 eieren

- GLAZUUR**
- 200 g frambozenjam
  - 2-3 tl whiskey
  - 175 g pure chocola
  - 90 g poedersuiker
  - 1 tl vers gemalen roze peperkorrels
  - 60 g slagroom

Klop in een vetvrije kom (tip: inwrijven met citroensap) de overgebleven eiwitten tot er zachte pieken ontstaan. Spatel dit voorzichtig door het chocolademengsel.

Giet het mengsel in het bakblik en plaats dit in een voorverwarmde oven (180-200 graden) ongeveer 45 minuten, totdat de taart stevig is.

Snijd de taart (wanneer die is afgekoeld) horizontaal doormidden. Verwarm de jam met de whiskey en smeer een flinke laag over de beide taartdelen. Zet de taartdelen daarna weer op elkaar.

Vet een bakblik in en bestuif dit met bloem. Smelt de chocola au bain marie en roer dan de gemalen peperkorrels erdoor.

Mix in een kom de boter met de poedersuiker tot een zachte crème. Scheid de eieren en voeg alleen het ei-eel toe. Mix daarna ook de gesmolten chocola door het botermengsel en zeef de bloem over het mengsel.

Laat voor het glazuur de chocola met de suiker, slagroom en peper au bain marie smelten. Roer goed door elkaar en giet dan het glazuur over de taart.

**AU BAIN MARIE** *De chocola in een pannetje boven heet water laten smelten. Laat geen condens bij de chocola komen, hierdoor kan het gaan schiften. Hoe hoger het cacao gehalte, des te groter dit risico.*







## Mudpie light

Bereidingstijd: 1 uur + minstens 1 uur opstijven. Moeilijkheid: 🧑🍳🧑🍳🧑🍳🧑🍳🧑🍳

- BODEM**
- 170-200 g neutrale biscuitjes (geen meergranen)
  - 125 g ongezouten boter
  - 1 tl kaneel

- VULLING**
- 300 g (extra) pure chocolade
  - 90 g boter
  - 4 à 5 el sterke koffie
  - 2 eieren
  - 200 ml slagroom

- AFWERKING**
- 2 el sterke koffie
  - 350 ml slagroom
  - cacao-poeder

Kruimel de biscuitjes en meng met de kaneel. Smelt de boter en voeg dit toe aan de kruimels. Bedek de bodem van een vorm met dit mengsel door er met je knokkels op te drukken en laat het in de koelkast opstijven.

Smelt de chocolade au bain marie met de boter en koffie. Haal van de warmtebron af en voeg de eieren toe.

Laat het mengsel afkoelen en meng dan de opgeklopte slagroom erdoor. Giet het mengsel in de vorm en laat de taart zeker een uur opstijven in de koelkast.

Klop de slagroom met de koffie stijf en smeer dit in een dikke laag over de taart. Bestuif met cacao-poeder voor een mooie afwerking. Eventueel kun je de taart nog in de koelkast zetten om verder op te laten stijven. Dek de taart dan niet af met plastic; dit zorgt ervoor dat de slagroom inzakt. •

### Originele recepten

- <http://ta.gd/pinkpeppercorn>
- <http://ta.gd/mudpie>

**EIWIT OVER? MAAK MERINGUES!** *Klop de 2 eiwitten in een schone, vetvrije kom tot er pieken ontstaan (en mix er dan 75 gram poedersuiker door). Leg daarna het eiwit in hoopjes op een plaat met bakpapier en laat ongeveer een uur in de oven (100 graden) drogen.*



# Regen op bestelling

DOOR SAMUEL HOEKMAN

Regenachtige dagen kennen we in Nederland maar al te goed. Daarom heeft de gemiddelde Nederlander de Buienradar wel tussen zijn bladwijzers staan. Maar zou het niet fijn zijn om ruim van tevoren te weten wanneer het wel of niet regent? Sterker nog, kunnen we de regen niet gewoon in Engeland achterlaten waar het thuishoort?

**E**euwen geleden dachten mensen al dat ze het weer of in ieder geval regen konden beheersen. De Cherokee-indianenstam in Noord-Amerika, de oude Egyptenaren en zelfs tot in de twintigste eeuw dachten mensen op de Balkan dat. Volgens een legende van de Cherokee konden zij regen oproepen door het uitvoeren van een zogenaemde regendans. De regen die zij oproepen zou bestaan uit de geesten van overleden stamleiders die op hun weg naar de aarde kwade geesten bestrijden in de overgangsfase van het aardse naar de eeuwige jachtvelden. Sinds 1946 is het echter ook technisch mogelijk om regen uit de lucht te laten vallen.

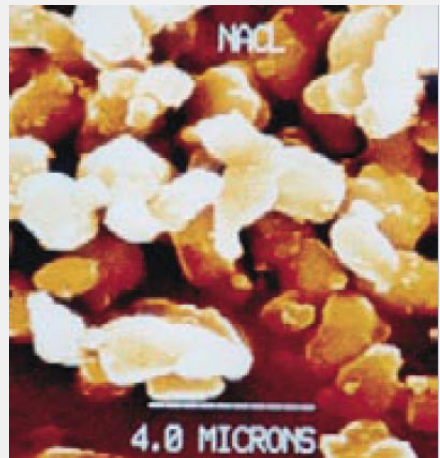
## Geschiedenis

Een manier om regen te induceren in wolken werd in 1946 door de Amerikaanse meteoroloog en scheikundige Vincent Schaefer ontdekt. Hij was een opmerkelijk figuur; Schaefer had nooit zijn middelbare school afgemaakt en was voor het grootste gedeelte een autodidacticus. Hij voorzag zichzelf en zijn familie in onderhoud door te gaan werken bij *General Electric*, het grootste techniekbedrijf ter wereld. Zijn hobby's waren van boomknuffelende aard: hij hield van natuurhistorie, archeologie en vooral van wandelen in het Amerikaanse Adirondack-gebergte. In de jaren twintig en dertig van de vorige eeuw vestigde hij zijn persoonlijke natuur(historisch-)wetenschappelijke bibliotheek en leerde zichzelf veel over scheikunde en meteorologie. In deze periode ontwikkelde hij ook opleidingen voor volwassenen in de natuurwetenschappelijke hoek.

Via-via kwam Schaefer in contact met Nobelprijswinnaar Irvin Langmuir die als wetenschapper werkte bij *General Electric*. Langmuir en Schaefer hadden vele gedeelde passies en dat was dan ook de reden dat het

tussen die twee zo goed klikte. Zij werkten samen op allerlei scheikundige onderzoeksgebieden en publiceerden veel. Niet onopgemerkt kan blijven dat Schaefer veertien patenten op zijn naam heeft staan, alle verkregen in zijn *General Electric*-dagen! In 1943 verschoof Schaefer's onderzoek naar de meteorologie, waar hij de natuurkunde van wolken, neerslag, ijsvorming bij vliegtuigen en ijskernvorming bestudeerde.

Op een warme dag in juli, tijdens een van zijn experimenten om ijskristalvorming te simuleren, vond hij zijn experimenteervat met supergekoeld water te warm voor het experiment. Vastberaden om zijn ex-



**FIGUUR 1** Beeld van experimenteel hygroscopisch (wateraantrekkend) poeder ter grootte van 2 tot 5  $\mu\text{m}$ , gemaakt door een rasterelektronenmicroscop. Het poeder is gebruikt in twee gelijktijdige experimenten in Israël en Texas.

periment voort te zetten plaatste hij een blok droogijs (vast  $\text{CO}_2$ ) op de bodem van het vat. Hij blies hierin om gemengde fases te verkrijgen, maar door zijn adem ontstond een wolk van lokaal verspreide waterdampdruppels. Hij observeerde de wolk met behulp van een stroboscoop om kleine deeltjes goed te kunnen zien, en zag dat er een blauwachtige nevel ontstond die meteen uiteenviel in miljoenen microscopische ijskristallen. Hij had een fundamenteel effect gevonden dat niet bij zijn andere experimenten merkbaar was: plotselinge verandering van temperatuur en luchtvochtigheid in gekoeld water leidt tot de productie van miljarden ijskernen. Na een aantal experimenten had hij deze techniek verfijnd tot iets wat heden ten dage *cloud seeding* wordt genoemd.

## Cloud seeding

Cloud seeding is natuurlijk nog niet het maken van regen. Het is wel een methode om de hoeveelheid of het type neerslag in een al bestaande wolk te veranderen. Cloud seeding is eigenlijk het verspreiden van een geschikte stof in de lucht of in het wolkenbed, waardoor de wolk gaat condenseren of ijskernen ontstaan. Dit kan als gevolg hebben dat er neerslag valt.

Opmerkelijk is dat de natuur deze techniek al lang gebruikt. Als het warmer weer is, laten bomen een stofje genaamd terpeen (een koolwaterstofverbinding) los waardoor een bepaald soort wolk ontstaat. Omdat wolken zonlicht reflecteren kan een bos op deze manier zijn temperatuur enigszins beheersen.

*Cloud condensation nuclei* (CCN), oftewel de cloud seeds, zijn de moleculen die de microfysische processen in een wolk kunnen veranderen. Voor de beeldvorming: een CCN is  $0,2 \mu\text{m}$ , een wolkdruppel (een stuk samengeklonterde wolk)  $0,02 \text{ mm}$  en een regendruppel  $2 \text{ mm}$  in diameter. Natuurlijke CCN zijn stof-, klei-,  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$ -, zeezout- en sulfaatdeeltjes. Niet-natuurlijke CCN zijn de eerder genoemde ijskernen, vloeibare propaan en zilverjodide. In hoeverre deze deeltjes water aantrekken hangt af van hun grootte en de exacte samenstelling. Sulfaat en zeezout

absorberen bijvoorbeeld water en de deeltjes met een koolstofcomponent absorberen geen water. Daarnaast komen deze deeltjes in een natuurlijke omgeving altijd gemengd voor en hangt het van de lokale temperatuur van de atmosfeerlaag af, die weer afhangt van de hoogte, of zo'n deeltje wel of niet als een goede CCN zal werken. Zo zullen sulfaat en organische koolwaterstoffen in de hogere luchtlagen betere CCN zijn dan in de lagere luchtlagen. Al met al is dit een complex proces waar op dit moment nog steeds veel onderzoek naar gedaan wordt.

## De theorie

Om te zien waarom cloud seeding neerslag kan genereren, moeten we kijken naar de manier waarop regen ontstaat in wolken. Hier schuilen twee bijzonder mooie statistisch-fysische processen achter: het *Wegener-Bergeron-Findeisenproces* en *coalescentie*.

De ontwikkeling van het fundamentele concept achter de precipitatietheorie, de theorie die het ontstaan van neerslag beschrijft, is een drietrapsraket geweest. In 1911 opperde Alfred Wegener een theorie voor het groeien van ijskristallen gebaseerd op het verschil in druk van verzadigde waterdamp tussen ijskristallen en supergekoelde, vloeibare waterdruppels. In 1935 voegde Tor Bergeron hieraan toe dat de deeltjesdichtheid (niet te verwarren met de massadichtheid!) van de ijskristallen veel kleiner moet zijn dan de deeltjesdichtheid van de waterdruppels. De versterkte groei

## Superkoel

Supergekoeld water is water dat gekoeld wordt tot onder het vriespunt, maar zonder dat het water bevroert tot ijs. Dat kan als er geen nucleï, bijvoorbeeld stofdeeltjes, in de buurt zijn om op te kristalliseren. De vloeibare fase kan dan een lange tijd gekoeld worden zonder te bevriezen. Puur water kan op deze manier tot minus  $42 \text{ }^\circ\text{C}$  gekoeld worden!

van ijskristallen in wolken met ijskristallen en supergekoelde vloeibare waterdruppels werd in 1938 door Walter Findeisen experimenteel bevestigd, en hiermee werd het Wegener-Bergeron-Findeisenproces het fundamentele concept achter het ontstaan van neerslag.

### Wegener-Bergeron-Findeisenproces

In een wolk die in gemengde fases van supergekoeld water en ijskristallen is, is er geen sprake van een thermodynamisch (druk)evenwicht bij gelijke temperatuur. De dampdruk van vloeibare waterdamp in evenwicht is namelijk groter dan de verzadigde dampdruk van de ijskristallen. Het vloeibare water is dus uit evenwicht en zal, om evenwicht te bereiken, verdampen en condenseren op de ijskristallen zodat die in massa toenemen tot er een evenwicht is bereikt.

Bij temperaturen tussen de  $-23$  en  $0$  °C bestaat een wolk grotendeels uit supergekoelde waterdruppels met een kleine deeltjesdichtheid ijskristallen. Bij een temperatuur van  $-13$  °C is de condensatie van waterdruppels op de ijskristallen het grootst omdat het verschil in dampdruk dan het grootst is. De ijskristallen worden groter waardoor ze onder invloed van de zwaartekracht naar beneden vallen.

Op hun weg naar beneden kunnen ze tegen andere ijskristallen of waterdruppels botsen. In het eerste geval kan een ijskristal door impulsbehoud in stukken breken of samenklonteren en in het laatste geval bevriest het water op het ijskristal. Deze twee effecten geven positieve terugkoppeling aan het systeem. Wanneer deze klonten tot het  $0$  °C-niveau behoren, smelten zij en vallen zij ter aarde als regen.

Overigens is het Wegener-Bergeron-Findeisenproces het dominante effect in de gebieden tussen de polen en de tropen. In de tropen is de temperatuur namelijk vaak niet toereikend. Meer hierover is te vinden in het boek *Atmospheric Science* van Wallace en Hobbs.

### Coalescentieproces

Het tweede effect is de coalescentie, het samenvloeien van kleinere waterdruppeltjes met verschillende afmetingen en dus massa's. De verschillende waterdruppeltjes in een wolk hebben verschillende snelheden ten opzichte van elkaar. De grotere druppels vallen sneller en zullen in hun baan op andere druppeltjes van gelijke grootte botsen en er mee samenvloeien. Kleinere druppeltjes worden echter door de luchtstroming van de grotere druppels aan de kant gedrukt en hier vindt dan geen coalescentie plaats.

De kans om waterdruppels in te vangen wordt voornamelijk bepaald door het snelheidsverschil van de druppels. Mits het watergehalte en de wolk groot genoeg zijn, zullen de grotere waterdruppels blijven groeien en als ze groot genoeg zijn zullen ze door de wolkenbasis heen kunnen vallen als, inderdaad, regendruppels.

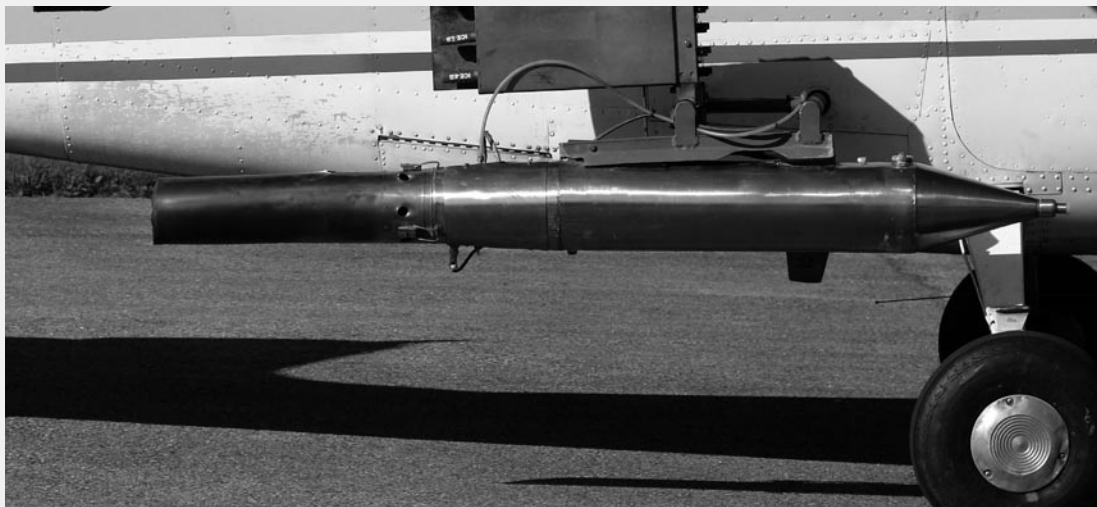
### De praktijk

Als we ervoor kunnen zorgen dat er in onze supergekoelde wolken voldoende ijskristallen zijn (maar dus niet te veel) dan zal het Wegener-Bergeron-Findeisenproces er dus voor zorgen dat er neerslag ontstaat. Van de genoemde niet-natuurlijke CCN wordt zilverjodide (AgI) het meest gebruikt vanwege de goedkope en makkelijke manier om te produceren en in de atmosfeer te verspreiden. Het vriespunt van zilverjodide ligt rond de  $-7$  °C en dat ligt dicht bij de optimale  $-13$  °C. Bovendien lijkt de kristalstructuur van AgI sterk op die van ijs.

Men kan op twee manieren zilverjodide in de wolken krijgen. De eerste is vanaf de grond; men gebruikt dan acetongeneratoren waarin een suspensie wordt gemaakt van aceton en zilverjodide. De aceton wordt vervolgens verbrand waardoor de rook via natuurlijke turbulentie in een wolk terecht komt. De tweede manier is om de zilverjodide in de wolk zelf te brengen door ofwel met een vliegtuigje een wolk in te vliegen en dan speciale zilverjodidefakkels te ontsteken, ofwel raketten met zilverjodide in de wolk te laten ontploffen.

### Modern gebruik





**FIGUUR 2** Vliegtuigjes kunnen worden gebruikt om CCN in een wolk te brengen.

In de Verenigde Staten wordt cloud seeding gebruikt om hagelstenen kleiner te maken in onweersbuien, om grote vliegvelden mistvrij te houden en natuurlijk om in droge gebieden regen op te wekken. De VS kent dan ook een aantal particuliere bedrijven die zich gespecialiseerd hebben in cloud seeding en die houden zich er al een aantal decennia mee bezig. Zo stelde de Oklahoma State University in 1972 het bedrijf Irving Krick & Associates uit Californië aan om cloud-seedingprojecten uit te voeren boven Lake Carl Blackwell. Dit meer is de hoofdbron van water voor het plaatsje Stillwater en het waterniveau was destijds gevaarlijk laag. Hoewel de watervoorziening voldoende hersteld werd, liep het project niet lang genoeg om de positieve invloed van cloud seeding te onderscheiden van natuurlijke variaties.

Aangezien China grote gebieden kent waar water schaars is, zal het je niet verbazen dat zij het grootste cloud-seedingsysteem ter wereld in gebruik hebben. De Chinezen gebruiken raketten met zilverjodide om regen te induceren. Dit geeft echter aanleiding binnen China en ook met omliggende gebieden voor politieke ruzie omdat men elkaar ervan beschuldigt elkaars regen te stelen. Het bekendste voorbeeld van

China's cloud seeding is tijdens de Olympische Spelen van 2008. China gebruikte het toen om de lucht vrij van vervuiling te maken.

Hoewel cloud seeding vandaag de dag veel toegepast wordt, blijven nog veel vragen open. Het is namelijk niet goed bekend wat de langetermijneffecten zijn op de natuurlijke watercyclus, hoe effectief de regenopbrengst is ten opzichte van natuurlijk ontstane regen en of het mogelijk is om ook zonder wolken regen te induceren. Hier ligt natuurlijk voor de fysisch een schone taak. Fysica van de wolken is een interessant en dynamisch onderzoeksgebied en niet alleen omdat er aardig fundamentele concepten achter zitten, er voldoende experimentele mogelijkheden zijn of omdat er nieuwe technologieën bedacht moeten worden om de ideeën te realiseren. Nee, het is eigenlijk gewoon een mogelijkheid om de natuur de baas te kunnen zijn. •



# Een cursusje verzekeren

## *Vrees je aansprakelijkheid!*

DOOR MARION DAM

Wij bèta's kunnen integreren en entropieën uitrekenen als de beste, maar hoe is het gesteld met de basiskennis van andere interessante, of anders wel nuttige, onderwerpen? Laten we eens iets bekijken wat iedereen wel heeft, maar waarvan vast lang niet iedereen weet waar het precies voor dient. En nee, dan worden niet colleges bedoeld. Laten we ons eens verdiepen in verzekeringen. Wat is verplicht? Wat wordt gedekt?

**V**erzekeringen zijn in te delen aan de hand van de gevolgen die aansprakelijkheid op je hebben. De regering helpt je al een beetje door sommige verzekeringen verplicht te stellen voor je. Zonder de verzekeringen die normaliter niet belangrijk zijn voor studenten komt dit op het volgende neer:

### Verplicht

- Zorgverzekering
- WA-deel van auto- of motorverzekering

### Aan te raden

- Aansprakelijkheidsverzekering particulieren (avp), ook wel bekend als WA-verzekering
- Inboedelverzekering

### Mogelijk

- Rechtshulp
- Tandarts
- Reis en annulering
- Diefstal
- Eigenlijk praktisch alles; je kunt zelfs het weer verzekeren

De verplichte verzekeringen zijn verplicht omdat als het mis gaat, er kosten kunnen ontstaan die nauwelijks iemand kan dragen. Stel, je komt in een rolstoel

of door een auto-ongeluk rijd jij iemand anders in een rolstoel. De kosten die dat met zich meebrengt zijn zo hoog dat je zonder verzekering heel diep in de schulden zou komen.

De zorgverzekering bestaat uit een basispakket dat praktisch alle vormen van zorg dekt: van ziekenhuiszorg tot de fysiotherapeut. Eventueel kun je dit uitbreiden met aanvullende verzekeringen, waar verschillende mogelijkheden voor zijn. In deze verzekering zit een deel eigen risico. Dit is minimaal €165 per kalenderjaar en houdt in dat je van een medische behandeling de eerste €165 zelf moet betalen. Verhoog je dit eigen risico, dan gaat de premie omlaag. Dat betekent dus dat je maandelijkse lasten iets lager zijn, maar dat je zelf meer geld moet betalen als je een been breekt. Het eigen risico geldt echter niet voor de huisarts of tandheelkundige zorg voor jongeren tot 22 jaar.

*Je bent op wintersport en loopt een blessure op. Je wordt naar de plaatselijke dokter gebracht die weliswaar onverschillig is, maar je goed behandelt. Wie betaalt er?*

Als je plotseling medische hulp nodig hebt in het buitenland moet je je Europese zorgkaart (EHIC) laten zien zodat de kosten meteen gedeclareerd kunnen worden bij je verzekeringsmaatschappij. Als je die niet bij je hebt, moet je zelf (een deel van) de kosten voor-

schieten. In sommige gevallen, zoals bij ziekenhuisopnames, moet je eerst contact opnemen met je verzekeraar zodat je de hoge rekening niet zelf voor hoeft te schieten. Nederlandse verzekeringsmaatschappijen zijn niet verplicht om iedere verzekerde automatisch zo'n kaart te verstrekken. Iedere verzekerde heeft er wel recht op, maar je moet hem zelf aanvragen. Er zit verschil tussen een zorgpas van je verzekeraar, die je bij je moet hebben als je naar een Nederlandse arts of apotheker gaat, en de EHIC. Controleer of je hem hebt voor je op vakantie gaat!

*Je kamer bevindt zich onder de badkamer. Tijdens de vakantie ontstaat daar ongemerkt lekkage en als jij na de zomer weer terug komt, blijkt je kamer nat en beschimmeld te zijn. Moet je nu al je zuurverdiende vakantiegeld opmaken aan nieuw behang en meubilair?*

Hier komt een inboedelverzekering van pas. Deze sluit je af om alles wat in je huis staat te verzekeren. Zo krijg je geld uitgekeerd bij eventuele schade door bijvoorbeeld brand, lekkage of storm. Hierbij moet je erop letten dat je het voor een realistisch bedrag verzekert: je telt de dagwaarde van alle spullen die je hebt staan bij elkaar op. Het kan zijn dat je dit niet goed inschat, of dat er nieuwe spullen in je huis komen waardoor je onderverzekerd bent. In dit laatste geval kan de verzekeraar niet worden verplicht meer schadevergoeding uit te betalen dan de verzekerde som. Een voorbeeld: iemand verzekert zijn huis voor €150.000 en krijgt te maken met een schade van €10.000. Na controle blijkt de werkelijke waarde van zijn huis €200.000 te zijn. Er wordt nu  $€10.000 \times 150/200 = €7.500$  uitgekeerd.

In het geval van dubbelverzekering of oververzekering wordt de regel gehanteerd dat de verzekerde niet in een betere positie mag komen dan voor de schade, door bijvoorbeeld dubbel te declareren.

*Op een feestje van een vriend val je per ongeluk op zijn gitaar. Terwijl je weer omhoog krabbelt met in beide handen een stuk gitaar, vraag je je af: hoe moet ik dit terugbetalen?*

Een aansprakelijkheidsverzekering voor particulieren (avp) dekt alle schades die jij aan derden toebrengt. De gitaar valt hier dus ook onder. Veel schades waarbij je van tevoren weet dat het risico groot is (een kind op schoot nemen vraagt om een kapotte bril), worden niet gedekt. Roekeloos leven en verwachten dat alles wel voor je betaald wordt, werkt dus niet. Het is bij twijfelgevallen altijd de verzekeringsmaatschappij die beslist of er wordt uitgekeerd.

Voor schades die tijdens het sporten ontstaan geldt dat het niet gedekt is als het gebeurt tijdens het normale spelverloop. Dus, als je tijdens het tennissen de bal op het gezicht van de tegenstander slaat, en zijn bril hierdoor kapot gaat, ben jij niet aansprakelijk. Gooi je echter in je woede een racket naar zijn hoofd waardoor de bril kapot gaat, wel.

Vaak wordt er een avp afgesloten met familiale dekking. Dat wil zeggen dat één persoon in een huishouden een avp heeft, waarmee alle mensen die bij hem of haar inwonen verzekerd zijn. Uitwonende ongehuwde (stief-/pleeg-)kinderen vallen hier ook onder.

Er bestaan verschillende verzekeringspakketten voor studenten, waar alles in zit wat noodzakelijk is voor een student. Deze worden vaak voor een vrij scherp bedrag aangeboden, maar deze kunnen ook een hoop dubbele verzekeringen opleveren: zo zit er vaak een WA-verzekering in, terwijl die misschien ook nog via je ouders loopt. Dat is natuurlijk zonde van je geld.

Kortom, alle verzekeringen vormen samen een oerwoud van voorwaarden. Waar de dekking van de één ophoudt, kun je een andere afsluiten om dat gat weer op te vullen. Het is in dit doolhof gemakkelijk om onder- of oververzekerd te zijn. Beide gevallen kunnen erg vervelend zijn; het is daarom aan te raden eens goed te bekijken hoe jij er qua verzekeringen voor staat. Een vuistregel voor het nut van een verzekering is: verzeker verliezen die je zelf kunt betalen niet! Zelf een spaarpot aanleggen is vaak gunstiger. Mocht je een nieuwe afsluiten: vergelijk verschillende verzekeraars met elkaar, en lees de polisvoorwaarden goed. •

# Spooky action at spacy distances

DOOR KEIMPE NEVENZEEL

In 1935 stelde Einstein een paradox op met drie mogelijke oplossingen: (i) de kwantummechanica is een onvolledige theorie; (ii) de natuurkunde geeft geen beschrijving van de werkelijkheid, maar alleen een wiskundig formalisme om meetuitkomsten te voorspellen en (iii) bepaalde effecten kunnen sneller reizen dan het licht.

De oplossing van deze paradox leidde tot fundamenteel nieuw inzicht in de natuur en technische toepassingen van de oplossing zullen de digitale wereld revolutioneren. Toepassingen van de oplossing door ESA en NASA in satellieten zorgen er misschien zelfs een tweede keer voor dat ons beeld van de natuur grondig moet worden herzien.

## Bohr versus Einstein

Kwantummechanica is bizar. Iedereen die een gevorderde introductie in deze richting van de natuurkunde heeft gehad zal dit beamen. Deeltjes zijn eigenlijk waarschijnlijkheidsgolven en grote groepen deeltjes vormen interferentiepatronen (ook als je de deeltjes één voor één afschiet), en zo heb je nog meer intrigerende concepten.

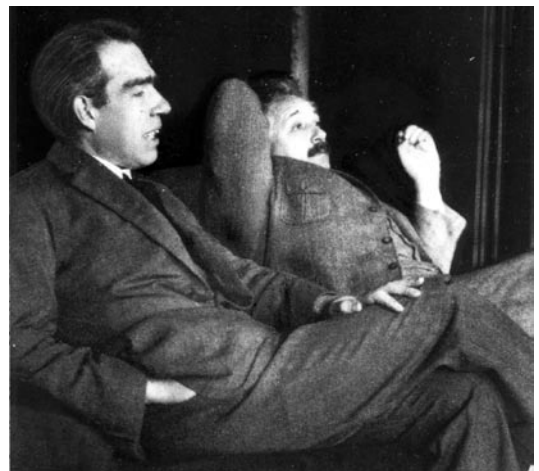
Wat moet je van al deze tegenintuïtieve aspecten denken? Niels Bohr, een van de vaders van de kwantummechanica, was geheel overtuigd van zijn theorie. In zijn ogen luidde de theorie een nieuw tijdperk voor de wetenschap in, niet alleen in fysisch maar ook in filosofisch opzicht. Het oude ideaal van de natuurkunde als beschrijving van een objectieve werkelijkheid was achterhaald. Fenomenologische wetten, wetten die waarnemingen wiskundig goed beschrijven maar niet op een fundamentele manier verklaren, zouden het hoogst haalbare zijn. Een van zijn voornaamste tegenstanders was niemand minder dan Albert Einstein, die tot zijn dood bleef geloven dat natuurkunde wel degelijk fundamenteel inzicht geeft over de objectieve werkelijkheid. De tegenintuïtieve en probabilistische aspecten van de kwantummechanica dichtte hij toe aan onvolledigheid. Een nog te ontdekken uitgebreidere versie van de kwantummechanica zou deze vreemde aspecten wel vanuit fundamentele principes verkla-

ren. De status van de kwantummechanica was een geregeld terugkerend onderwerp in lange discussies tussen Bohr en Einstein.

## De EPR-paradox

Het intellectuele gevecht tussen Bohr en Einstein duurde jaren en bereikte een hoogtepunt in een beroemd artikel geschreven door Einstein, Podolsky en Rosen uit 1935 waarin ze de 'EPR-paradox' introduceren. In dat artikel was hun gedachtegang ongeveer als volgt: beschouw een molecuul bestaande uit twee gekoppelde atomen  $A$  en  $B$ , beiden met spin  $\pm \frac{1}{2}$ , zodanig dat het molecuul als geheel spin 0 heeft. Dus als de spin van deeltje  $A$  gemeten wordt, is de spin van deeltje  $B$  ook bekend (min de spin van deeltje  $A$ ).

Vervolgens worden de atomen uit elkaar gehaald en naar de ver van elkaar verwijderde waarnemers Alice en Bob gebracht, dit alles zonder de spins te verande-



FIGUUR 1 Bohr en Einstein in discussie

ren. Als Alice de  $x$ -spin van haar deeltje zou meten is instantaan ook de  $x$ -spin van Bobs deeltje bekend (namelijk min de  $x$ -spin van deeltje  $A$ ). Hetzelfde geldt voor de  $y$ - en  $z$ -component. Deeltje  $B$  verandert instantaan door meting van deeltje  $A$ , en omdat de deeltjes ver uit elkaar liggen lijkt het er dus op dat in de deeltjes informatie over alledrie de spin-componenten ligt opgeslagen. Immers: een signaal van deeltje  $A$  naar  $B$  met “pssst, ik ben gemeten in de  $x$ -richting met uitkomst spin-up, word snel spin-down in de  $x$ -richting” kost tijd, terwijl de verandering instantaan was.

Klassiek is dat geen probleem: alle spin-componenten kunnen tegelijkertijd bekend zijn en de deeltjes kunnen dus van te voren een spin-waarde in een bepaalde richting hebben afgesproken. Kwantummechanisch ontstaat wel een probleem: de verschillende spin-componenten commuteren niet en kunnen dus niet alle tegelijkertijd bepaald zijn! Toch laten metingen zien dat Bobs deeltje altijd de tegenoverstelde waarde van Alice’ deeltje aanneemt. Ziehier de paradox: bij meting van Alice’ deeltje nemen de onbepaalde spin-componenten van Bobs onverstoorde deeltje toch spontaan een bepaalde waarde aan.

De paradox kan op verschillende manieren worden opgelost:

1. Bohrs oplossing: er is geen paradox. In de klassieke natuurkunde kan een onbepaalde eigenschap inderdaad niet spontaan een bepaalde eigenschap met een specifieke waarde worden, maar blijkens de experimenten kan dat in de kwantummechanica wel. Dit zegt niets over de werkelijkheid achter de kwantummechanica, want de kwantummechanica geeft slechts een wiskundige beschrijving van metingen en niet een beschrijving van de werkelijkheid.
2. Einsteins oplossing: de kwantummechanica is incompleet, een uitgebreidere versie van de kwantummechanica kan wel een verklaring geven.
3. De ‘niet-lokale’ oplossing: het deeltje van Bob verandert daadwerkelijk instantaan door Alice’ meting.

Bohr en Einstein zouden het gedurende hun leven nooit eens worden, maar over één ding waren ze het

## Kwantummechanica

De kwantummechanica beschrijft de natuur op atomaire schaal en kleiner. Drie kenmerkende aspecten van de kwantummechanica zijn:

1. Alle eigenschappen van fysische objecten worden beschreven door waarschijnlijkheidsgolven, die golf functies worden genoemd. De positie-golf functie van een proton geeft bijvoorbeeld de waarschijnlijkheid dat het proton zich op een bepaalde plaats bevindt.
2. Meting van een eigenschap zorgt ervoor dat de golf functie van die eigenschap ineen stort tot een delta-functie. Als bijvoorbeeld wordt gemeten dat de positie van het proton  $a$  is, dan verandert de positie-golf functie in een delta-functie op  $a$ .
3. Heisenbergs onzekerheidsprincipe: twee

waarneembare eigenschappen die niet commuteren kunnen niet tegelijkertijd volledig bekend zijn. Een voorbeeld hiervan zijn positie  $x$  en impuls  $p$ . Noteer de onzekerheid in beiden met  $\Delta x$  en  $\Delta p$ , dan geldt  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{1}{4\pi} h$ , met  $h$  de constante van Planck. Als de positie van een deeltje dus heel precies bepaald wordt, dan wordt de impuls geheel onbepaald.

De kwantummechanica heeft zware experimentele verificatie doorstaan en wordt dus als betrouwbare theorie gezien, maar op fundamenteel niveau zijn er belangrijke vragen. Eén hiervan is wat ineenstorting van de golf functie precies betekent: is de ineenstorting slechts een wiskundige beschrijving, of is er een echte fysische interpretatie (zo ja, wat dan?). Experimenten die de kwantummechanica over grote afstanden testen kunnen hier misschien nieuwe inzichten geven.

## Spin

De spin van een deeltje is min of meer de rotatie van het deeltje om zijn eigen as. Elementaire deeltjes hebben een karakteristieke spin, zo hebben elektronen spin  $\pm\frac{1}{2}$  en fotonen  $\pm 1$ , waarbij we plus spin-up en min spin-down noemen. De absolute waarde van de spin van een deeltje kan niet veranderen, maar het teken wel. Een deeltje heeft drie spin-componenten: de  $x$ -,  $y$ - en  $z$ -component, die elk spin-up of spin-down kunnen zijn.

Kwantummechanisch blijken de verschillende spin-componenten niet te commuteren! Effectief betekent dit dat als met een meting één van de spin-componenten wordt bepaald, de andere spincomponenten geheel onbepaald zijn.

wel eens: *spooky action at a distance*, zoals Einstein de derde oplossing noemde, diende verworpen te worden. Instantane veranderingen lijken in directe tegenspraak met de speciale relativiteitstheorie.

## Nature is spooky

Pogingen Einsteins paradox op te lossen leidde in 1982 tot een revolutie in ons begrip van de natuur: er werd experimenteel aangetoond dat 'spooky action at a distance' wel mogelijk is! Kwantummechanische bewerkingen kunnen twee deeltjes zo aan elkaar koppelen dat ze verstrengeld (*entangled*) raken. De golf-functie van een van de deeltjes kan dan nog alleen volledig worden beschreven door ook de golf-functie van het andere deeltje te beschrijven. Verstrengeling betekent in feite dat de natuurkundige eigenschappen van de deeltjes (bijvoorbeeld spin) sterkere correlaties vertonen dan klassiek mogelijk is. Verstrengelde deeltjes kunnen deze sterke correlaties in eigenschappen

behouden ongeacht de afstand tussen beide en daarom worden deze correlaties ook wel non-lokale correlaties genoemd.

Kun je met verstrengelde deeltjes sneller dan het licht informatie overdragen? Nee, want hoewel Bobs deeltje instantaan verandert als Alice haar deeltje meet, kan hij deze verandering alleen goed interpreteren met behulp van Alice' meetresultaten. Die meetresultaten moet Alice eerst op een klassieke manier (telefoon, internet, postduif) naar Bob sturen, wat de maximale overdrachtssnelheid van informatie dus beperkt tot de lichtsnelheid.

## Van klassieke bit naar qubit?

De sterke correlaties tussen verstrengelde deeltjes bieden ongeëvenaarde mogelijkheden voor dataverwerking. Ter illustratie: de klassieke data-eenheid is de bit, een deeltje dat up (1) of down (0) kan zijn. Een geheugen bestaande uit  $n$  klassieke bits kan dus in  $2^n$  verschillende toestanden zijn: 00...00, 00...01, 00...10, ..., 11...11.

De kwantumdata-eenheid is de qubit. Noteer up met 1 en down met 0, dan is een qubit een verstrengeld paar deeltjes met golf-functie

$$|\phi\rangle_{AB} = \alpha|10\rangle_{AB} + \beta|01\rangle_{AB},$$

waarbij  $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$  en  $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ . Een geheugen bestaande uit  $n$  qubits heeft als golf-functie

$$|\phi\rangle = \sum_{i=00\dots 0}^{11\dots 1} c_i |x\rangle,$$

met  $c_i \in \mathbb{C}$  en  $\sum_i c_i^2 = 1$ .

Doordat qubits dus in een veel hogere dimensie leven dan de klassieke bits kunnen computers gebaseerd op qubits, kwantumcomputers, bepaalde taken exponentieel sneller uitvoeren: in minuten in plaats van eeuwen. Denk hierbij aan wiskundige algoritmes, zoek-algoritmes en simulaties van kwantumsystemen.

Om echter enigszins voordelen te bieden ten opzichte van een klassieke computer heeft een kwantumcom-

puter circa vijftig qubits nodig, terwijl de huidige meest geavanceerde kwantumcomputers nog niet de helft van dit aantal hebben. Er is dus nog wel wat werk aan de winkel.

### Scotty, beam me up!

Bij klassieke computers worden voor informatieverwerking bits heen en weer gezonden. Evenzo moeten bij kwantumcomputers voor informatieverwerking kwantumtoestanden worden uitgewisseld. Stel dat Alice en Bob ver van elkaar verwijderd zijn en Alice wil de kwantumtoestand, bijvoorbeeld de spin, van deeltje *C* aan Bob doorgeven. Ze kan deeltje *C* zelf sturen, maar er is een grote kans dat de spin door interactie met de omgeving tijdens zijn reis van Alice naar Bob verandert. Ze kan ook de spin meten en deze informatie op klassieke wijze doorgeven, maar omdat de verschillende spin-componenten niet commuteren kan ze nooit een volledige beschrijving van de spin doorgeven. Als Alice en Bob een paar verstrengelde deeltjes *A* en *B* delen kunnen ze echter ook de niet-lokale eigenschappen van verstrengeling gebruiken om de kwantumtoestand van *C* te teleporteren. Hierbij moet je niet meteen aan Star Trek-achtige taferelen denken zoals mensen die direct vanuit een ruimteschip op de grond van een verre planeet belanden, maar aan een wat bescheidener schaal: het overbrengen van de kwantumtoestand van *C* *zonder* dat de informatie door een foton of een ander deeltje wordt overgedragen.

Naast de overdracht van informatie in kwantumcomputers heeft teleportatie nog een andere belangrijke toepassing: kwantumcryptografie. Een geteleporteerde kwantumtoestand legt nooit fysiek de afstand tussen Alice en Bob af en kan dus ook nooit worden onderschept. Kwantumcryptografie is daarmee de enige vorm van cryptografie waarbij de veiligheid door de wetten van de natuur zelf wordt gegarandeerd!

In tegenstelling tot kwantumcomputers, waarvan op het moment nog alleen prototypes bestaan, is kwantumcryptografie al experimenteel gerealiseerd. Het huidige afstandsrecord in de vrije lucht is 144 kilometer!

### Spacy quantum entanglement

Vanwege de grote voordelen van kwantumcryptografie wordt hard nagedacht over het opzetten van een globaal kwantumcommunicatienetwerk. Een belangrijke stap hierin is het mogelijk maken van kwantumcommunicatie via satellieten. Sinds een jaar of vijf besteden ESA en NASA daarom expliciet aandacht aan het ontwikkelen van ruimtewaardige kwantumcommunicatietechnologie. In 2007 begon ESA's Space-QUEST (*QU*antum *Entanglement for Space experimenTs*) programma, met als doel het installeren van een kwantumcommunicatiemodule aan boord van het ISS. Deze module moet paren verstrengelde fotonen creëren en versturen naar twee ver weg gelegen grondstations, bijvoorbeeld Groningen en Peking. Als beide grondstations één foton van een verstrengeld paar fotonen hebben ontvangen, delen de grondstations een verstrengeld paar en is kwantumcommunicatie tussen beide stations mogelijk! Als alles volgens plan gaat moet de module in 2015 op het ISS geïnstalleerd worden.

Naast gegarandeerd veilige communicatie is er vanuit wetenschappelijke hoek om heel andere redenen interesse in een kwantumcommunicatiemodule in het ISS: het creëert de unieke mogelijkheid om kwantummechanische effecten op grote afstand te testen. Dit geeft wellicht inzicht in enkele openstaande fundamentele problemen van de kwantummechanica zoals het ineenstorten van golf functies. Einstein gaf een verkeerde oplossing voor zijn paradox, maar zijn paradox an sich heeft wellicht voor de tweede keer grote gevolgen voor ons beeld van de natuur. •

### Referenties

- Nielsen, M.A. en Chuang, I.L. "Quantum Computation and Quantum Information." Cambridge University Press, 2000.
- Einstein, A., Podolsky, B. en Rosen, N. "Can quantum-mechanical description of Physical Reality be considered complete?" Phys Rev 47:777-780, 1935.
- Bennett, C.H. et al. "Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels." Phys Rev Let 70:1895-9, 1993.
- Ursin, R. et al, "Space-QUEST: Experiments with quantum entanglement in space." Proc. IAC, 2008.



# Tovenaar Tesla

DOOR RONNIY JOSEPH

Als kind speelde ik graag met Tesla's. Dat deed ik dan niet met miniatuurfiguurtjes, want de man zelf deed me weinig, maar met primitieve elektromagneten. Dat wil zeggen, een grote moer met daar omheen veel koperdraad. De eenheid gemeten in het aantal opgetilde paperclips vond ik namelijk vele malen spannender. Wat ik toen niet beseftte was dat de man méér voor ons had betekend.

**N**ikola Tesla (1856–1943) was een uitvinder als geen ander. Maar ondanks zijn vele bijdragen aan de wereld zoals wij die nu kennen, wordt hij niet geëerd zoals Edison of de gebroeders Wright. En dat alleen maar omdat hij in zijn laatste levensjaren geen recht meer had op zijn uitvindingen en met bizarre voorstellen kwam. Maar laten we eerst terugkeren naar zijn geboorteplaats Smiljan in het huidige Kroatië. Hier zag Tesla eerst het licht en daarna het gezicht van zijn vader Milutin Tesla, een priester in de orthodoxe kerk. Vervolgens werd hij in de armen gelegd van zijn moeder Đuka Mandić, ervan uitgaande dat zijn geboorte ging zoals in de gemiddelde dramaserie. Hij was het vierde kind van de vijf die de naam Tesla zouden dragen.

Tesla's geniale potentie liet zich al zien op het gymnasium. Hij rondde het zo snel af dat hij een jaar eerder klaar was dan zijn leeftijdsgenoten. Hij vervolgde zijn opleiding met een studie elektrotechniek aan de Technische Universiteit van Graz, maar vond niet de zin om de opleiding af te maken. Na ruim drie jaar hield Tesla het voor gezien en ging hij een jaar werken. Zijn vader overtuigde hem om weer te studeren, ditmaal aan de universiteit van Praag. Maar na het overlijden van zijn vader verliet hij de universiteit na voltooiing van slechts één semester.

## Edisons bedrog

Zonder diploma op zak liep Tesla verschillende baantjes af en langzaam bouwde hij zijn CV op. Hij kwam uiteindelijk terecht bij de Continental Edison Company in Parijs als technicus. Zijn werk bestond uit het perfectioneren van de apparatuur die verscheept werd van het moederbedrijf van Thomas Edison. Na

een tijdelijke tegenslag in zijn privé-leven, het overlijden van zijn moeder, mocht Tesla in Amerika direct onder de man zelf gaan werken. Hij zou werken aan het herontwerpen van Edisons gelijkstroommotoren. Hiervoor werd de flinke som geld van vijftigduizend dollar beloofd. Toen Tesla echter bij Edison aanklopte voor het geld, wuifde hij het weg als een Amerikaans grapje. Zo bleek maar weer dat we voor goede humor bij de Britten moeten zijn. Toen Tesla bovendien geen loonsverhoging kreeg, besloot hij ontslag te nemen.

## AC/DC

Met minimaal kapitaal op zak richtte Tesla dan maar zijn eigen bedrijf op: Tesla Electric Light & Manufacturing. Terwijl hij hiermee geld verdiende, of eigenlijk terwijl de investeerders hiermee geld verdienden, ging hij zijn idee van de inductiemotor uitwerken. Een idee dat zijn investeerders niet beviel, want gelijkstroom domineerde toen de markt, terwijl een magnetische inductiemotor werkt op wisselstroom. Tesla werd uit zijn eigen bedrijf gezet.

Wat dat betreft hadden de investeerders gelijk. Waarom zou je een inductiemotor ontwerpen als er toch gelijkstroom uit de stopcontacten komt? Maar het was juist Tesla's idee om de wereld kennis te laten maken met wisselstroom. Uiteindelijk wist hij in zijn eentje een inductiemotor te bouwen waarmee hij naar George Westinghouse ging. Westinghouse was een Amerikaanse ondernemer en wat stroom betreft een van Edisons grootste concurrenten. Samen met Tesla en zijn inductiemotor maakte hij de weg vrij voor een netwerk dat wisselstroom vervoerde over nog grotere afstanden dan het gelijkstroomnetwerk van Edison. Wisselstroom kan namelijk getransformeerd worden naar hogere



spanningen en dus lagere stroom, wat leidt tot minder energieverlies. Gelijkstroom kan niet getransformeerd worden, dus moesten de generatoren pal naast de afnemers staan: erg onpraktisch. Nu was het alleen zaak om Edisons reclamecampagne te dwarsbomen en wisselstroom in een beter daglicht te zetten. Edison wilde zijn geesteskind namelijk niet zomaar opgeven en zette een propaganda in die alle gevaren van wisselstroom uitvergrootte. Maar zoals we om ons heen zien, heeft wisselstroom de strijd uiteindelijk gewonnen.

### Draadloze stroom

Met het geld dat Tesla van Westinghouse ontving ging hij weer verder experimenteren. Tesla begon steeds exotischer apparaten te bouwen. In 1891 beweerde hij een mechanische oscillator gebouwd te hebben waarmee hij bijna zijn eigen laboratorium had laten instorten. Een herhaling van het experiment is er niet van gekomen, behalve bij Mythbusters natuurlijk. In deze tijd werkte hij ook aan zijn welbekende *Tesla coil*.

De Tesla coil is een transformator die wisselstroom transformeert naar een hoog voltage, met een lage stroom, en een hoge frequentie. De bekendste versie van het apparaat kennen we allemaal van de supervonken die ons doen denken aan bliksem. Tesla was op dat moment bezig met een andere versie van de Tesla coil; de zogenaamde *magnifying transmitter*. Hiermee deed hij experimenten op het gebied van radiotelecommunicatie en draadloos vervoer van elektrische stroom! Het was hem gelukt om stroom om te zetten naar elektromagnetische straling die opgevangen werd door een ontvanger. Zodoende wist hij elektrische energie te verplaatsen, wat ook gebeurt in de doorsnee radio. De hoeveelheid stroom in de ontvanger was helaas niet hoog genoeg voor een rendabel vervoerssysteem, maar om zijn pogingen te eren wordt een dergelijke energieverplaatsing nog steeds het Tesla-effect genoemd.

### To oblivion and beyond

Tot nu toe klinkt Tesla's leven als dat van de gemiddelde Willie Wortel, die geniale uitvindingen doet. Dan rest alleen de vraag nog: waarom kennen we Tesla niet zoals

we Edison kennen? [Misschien omdat Willie Wortels uitvindingen altijd flopten? – red.] Nikola Tesla was overduidelijk geen doorsnee wetenschapper. Hij beweerde apparaten in zijn hoofd te kunnen bouwen en uit te kunnen denken hoe ze zouden werken. Een ideale manier om papier te besparen, maar hierdoor had hij in zijn leven ook last van enkele zenuwzinkingen waarbij hij sterke visioenen had bij bepaalde woorden. Dit fenomeen staat ook bekend als synesthesie.

In zijn latere jaren begon hij ook dwangneurotische symptomen te vertonen, iets wat zijn populariteit niet ten goede kwam. Deze symptomen toonden zich vooral nadat zijn laatste experiment op het gebied van draadloze stroom geen goedkeuring had gekregen. Nu hij zijn droom voor de toekomst niet meer kon voltooien, besloot hij werk te verrichten op een gebied waar hij nog enige affiniteit mee had. Hij ging zich bezighouden met radartechnieken, waarvoor hij de basisprincipes ontwikkelde. Maar hoewel hij een genie was op het gebied van elektronica, was hij niet in staat zijn financiën te regelen. Hij begon langzaam in de schulden te raken tot hij uiteindelijk moest verblijven in het New Yorker Hotel.

Terwijl hij in de schulden zat en op het punt stond om te sterven was hij nog met één ding bezig: de doodstraal. Hij beweerde een doodstraal te hebben ontworpen waarmee hij atomen tot hoge snelheden kon versnellen. Dit wapen zou dan in staat zijn geweest om vijanden op grote afstanden te decimeren. Maar op de een of andere manier wist Tesla dit superwapen niet aan de man te brengen.

Uiteindelijk stierf Nikola Tesla aan hartfalen. Hij had al zijn patenten verkocht en bleef over met enkele ontwerpen waarin niemand meer geïnteresseerd was. •

### Referenties

- [1] Tesla, N. "My Inventions: The Autobiography of Nikola Tesla." [www.teslaplay.com/autobody.html](http://www.teslaplay.com/autobody.html)
- [2] [scienceworld.wolfram.com/biography/Tesla.html](http://scienceworld.wolfram.com/biography/Tesla.html)
- [3] [www.pbs.org/tesla/II/II\\_warcur.html](http://www.pbs.org/tesla/II/II_warcur.html)
- [4] [www.pbs.org/tesla/res/res\\_art12.html](http://www.pbs.org/tesla/res/res_art12.html)

# Herrie in de huiskamer

DOOR MICHEL SCHALLIG

Geluid is een vloek en een zegen. Muziek, vaak een aangename vorm van geluid, is duidelijk een zegen, het geluid van een drillboor is dat meestal niet. Een wezenlijk aspect van geluid is welke reactie dit bij de luisteraar teweeg brengt. Geluid kun je pas evalueren als je bron en luisteraar als één systeem beschouwt.

**H**mm, klinkt als psychologie; wat doe ik nu in de Perio, een blad voor bètanerds? Maar goed, dit blad is tegenwoordig ook voorzien van een kookrubriek. Het huishouden sluipt de Perio binnen...

Ik werk bij Philips, aan het geluid dat onze apparaten voortbrengen. Ik bedoel dan niet audio- of video-apparatuur, maar stofzuigers, scheerapparaten, keukenmachines en dergelijke. Het geluid dat dus als bijproduct tijdens de werking van een apparaat wordt gemaakt.

Door de eindgebruiker (dat zijn jullie) centraal te stellen, probeert Philips apparaten te ontwerpen die beter bij de behoeftes van de eindgebruiker aansluiten. Beter in vergelijking met de apparaten van onze concurrenten. Die benadering wordt *experience* genoemd en alle grote bedrijven pakken tegenwoordig op die manier hun productontwikkeling aan. Kijk maar naar de autoindustrie als lichtend voorbeeld. Daar verkoopt BMW *driving experience* in plaats van auto's. Geluid is duidelijk een onderdeel van deze *experience* en heeft dan ook vele facetten die openstaan voor onderzoek. Laat ik eens een aantal aspecten aanstippen.

## Wat is geluid?

Dit is een vraag die ik voor verschillende toehoorders verschillend beantwoord. Ik houd de volgende definitie aan, maar er zijn meerdere mogelijk:

*Geluid is een drukvariatie in de lucht, die door je oren wordt opgevangen en die je in je hersenen waarneemt.*

Dus per definitie sluiten we onderwatertrillingen en trillingen in de vaste materie uit als geluid. De definitie bevat relatief weinig fysica en benadrukt de interpretatie en de evaluatie. Deze definitie is van belang, omdat in een grote organisatie mensen met verschillende achtergronden de definitie moeten kunnen begrijpen. Dan bedoel ik bijvoorbeeld mensen die in de marketing werken en niet altijd technisch zijn opgeleid.

Toch, geluid heeft ontegenzeggelijk een aspect dat sterk gegrondvest is in de fysica. Geluid in een medium dat alleen drukvariatie toestaat (een fluïdum) en geen afschuiving (shear) kent, kan worden beschreven met een tijdsafhankelijke Helmholtz-vergelijking. Sla Wikipedia er maar eens op na!



Het geluid dat onze oren exciteert, zijn trillingen in de lucht. Het zijn bijzonder kleine drukvariëaties, in de orde van millipascals. Het plaatje op pagina 37 laat een druk-tijd-diagram zien van een fluit. Duidelijk is dat het een oscillerend signaal is, dat de variëaties typisch in de orde van millipascals zijn, en dat het een repeterend karakter heeft.

Een constant geluid, dat wil zeggen een geluid dat nadat het is aangezet geen herkenbare tijdsafhankelijke structuur bezit, kun je beschrijven met drie verschillende termen:

- Luidheid; dit wordt beschreven met begrippen als hard en zacht.
- Pitch of tonaliteit; dit beschrijft of het geluid hoog of laag is.
- Timbre; dit omvat de rest, dus alles wat niet luidheid of toonhoogte is.

In de praktijk blijken deze drie begrippen vaak voldoende te zijn om een heel scala aan geluiden van apparaten te kunnen beschrijven.

De fysica kan ons helpen om meetbare grootheden die een relatie hebben met de bovenstaande aspecten te koppelen aan het gemeten akoestische druksignaal. Psychofysica, of meer toegespitst: psychoakoestiek, is het vakgebied waarin de relatie tussen meetbare fysische grootheden en de menselijke ervaring systematisch bestudeerd wordt. Laten we daar vooral gebruik van maken!

Voor luidheid wordt als schatter vaak geluidsdruk genomen. Dit wordt gewogen met een bepaald frequentiefilter dat de spectrale gevoeligheid van het oor 'verrekent'. Deze geluidsdrukschatter correleert redelijk goed met luidheid, zeker als geluiden van hetzelfde type worden vergeleken. Het is een relatief makkelijk te implementeren grootheid, die veel in de industriële praktijk en de maatschappelijke wetgeving gebruikt wordt. Pitch is al moeilijker; het heeft iets te maken met frequentie-inhoud. Als er duidelijke spectrale pieken in een frequentiespectrum voorkomen, dan houdt de verschuiving van die pieken verband met een verschil in de toonhoogte-ervaring. Het menselijke oor kan echter ook pitch ervaren die niet fysisch in het geluid aanwezig is; het oor (of brein) extraheert die ervaring uit de structuur in het spectrum. Dit wordt ook wel 'virtuele pitch' genoemd.

Nu is het zo dat geluidsdruk wordt gemeten in Pascal, maar dat lees je nooit zo in verhaaltjes over geluid; het gaat altijd over decibellen. Dat is een typisch akoestische gewoonte: in de akoestiek wordt alles een dB. Immers, de dB is een dimensieloze grootheid, je kunt er dus alles in uitdrukken. Voor luchtgeluid is de definitie van dB (eigenlijk van het geluidsdrukniveau) gecombineerd met de gestandaardiseerde referentiewaarde:

$$L_p = 10 \cdot \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 \text{ met } p_0 = 20 \mu\text{Pa}$$

De geluidsdruk die apparaten veroorzaken, is het resultaat van het akoestische vermogen van dat apparaat, met de akoestische eigenschappen van de omgeving waarin de luisteraar en apparaat staan. Dit is volstrekt analoog met het thermische geval: de temperatuur is het resultaat van het thermische vermogen, tezamen met de thermische omgeving van de bron en thermometer (omringende isolatie, thermisch lek, etcetera). Om nu uit te drukken hoeveel geluid een apparaat maakt, moeten we daarom het geluidsvermogen meten, en niet de geluidsdruk. Uiteraard drukken we geluidsvermogen ook uit in dBs, nu met 1 picowatt als referentievermogen.

$$L_w = 10 \cdot \log \left( \frac{P}{P_0} \right) \text{ met } P_0 = 1 \text{pW}$$

De tabel laat zien dat er een enorme verhouding bestaat tussen de vermogens die in de apparaten rondlo-

Apparaat	Geluidsvermogen (Watt)	Geluidsvermogen (decibel)	Typisch vermogen (Watt)	Akoestisch vermogen / typisch vermogen
Koelkast	$3 \cdot 10^{-8}$	45	100	$3 \cdot 10^{-10}$
Scheerapparaat	$1 \cdot 10^{-6}$	60	1	$1 \cdot 10^{-6}$
Stofzuiger	$3 \cdot 10^{-5}$	75	1000	$1 \cdot 10^{-8}$
Blender met ijs	$3 \cdot 10^{-4}$	85	100	$1 \cdot 10^{-7}$
Kettingzaag	$3 \cdot 10^{-3}$	95	3500	$1 \cdot 10^{-6}$

pen en de energie die als geluid wordt uitgestraald. Er is weinig vermogen nodig om veel geluid te maken! We meten geluid overigens met een microfoon. In feite is een microfoon een gevoelige druksensor die erg goed de drukvariaties kan meten; we meten kortom altijd geluidsdruk. Door ermee te gaan rekenen, kunnen we tot geluidsvermogens komen.

Ons gehoor heeft een logaritmisch gedrag wat betreft luidheid (wet van Weber-Fechner). Dit houdt in dat een gelijke verandering in dB's eenzelfde stap in harder of zachter ervaren betekent. Ook voor de pitch werkt ons oor logaritmisch. De piano is gestemd in octaven (elke keer een verdubbeling in grondfrequentie) en niet in een lineaire schaal. In de akoestiek worden daarom naast *FFT-analysers* (*Fast Fourier Transform*) ook *CPB-analysers* (*Constant Percentage Bandwidth*) gebruikt. Deze analysers zijn te beschouwen als een set van smalbandige filters, waarbij de bandbreedte en de centrumfrequentie als een geometrische reeks oplopen.

## Ontwikkelen

Hoe gaan we een apparaat ontwikkelen ten aanzien van geluid? De eerste vraag is: wat moet het worden? Vervolgens: wat zijn de eisen vanuit het perspectief van de eindgebruiker? Hoe luid mag het worden c.q. hoe stil moet het zijn? Hoe zit het met timbre en met temporele aspecten? Er zijn nogal wat apparaten die een hele reeks van acties doorlopen en zo een akoestisch verhaal vertellen. Snappen mensen dat verhaal?

Een belangrijk gegeven is op welke technische wijze een bepaalde functie wordt ingevuld; vrijwel alle technische subsystemen hebben akoestische effecten. Denk aan motoren, tandwielen, luchtstroming of ventilatoren. Dit zijn typische bronnen van geluid, en het onderkennen van deze subbronnen is van wezenlijk belang; een sterke subbron zal meer aandacht nodig hebben dan een zwakke subbron. Bij het 'optellen' van subbronnen staat ons nog een verrassing te wachten. Als we twee (incoherente) subbronnen hebben, dan moeten we de bronsterkten optellen om

de totale bronsterkte te krijgen. Stel dat de bronnen ieder voor zich 60 dB zijn, dan zijn beide bronnen tezamen 63 dB; toevoegen van een derde bron van 50 dB levert een totaal van nog steeds ongeveer 63 dB. Dit komt omdat we niet het dB-niveau, maar de energie moeten optellen. Toch is dit verrassend in de praktijk. Immers, als je omgekeerd een systeem hebt met twee even sterke dominante subbronnen, en je er één volledig uitschakelt, dan reduceer je het geluidsniveau met slechts 3 dB! Als vuistregel kun je hanteren dat een verdubbeling van de ervaren luidheid (dus niet het energieniveau) een niveauverhoging van 8–10 dB impliceert. Een verschil van 1 dB is niet waarneembaar (zelfs in directe vergelijking), een verschil van 3 dB is in directe vergelijking zeer goed hoorbaar. Een verschil van 3–6 dB is nog goed hoorbaar als je de verschillen op twee opeenvolgende dagen hoort.

In het onderkennen, beschrijven en combineren van subbronnen tot een completer systeem zit heel veel fysica verstopt. Het totale systeem is wat de eindgebruiker ervaart. Op die ervaring kun je heel veel invloed uitoefenen door de werking van verschillende subbronnen en transmissiepaden te balanceren. Het vertalen van de wensen van de eindgebruiker naar fysisch meetbare grootheden en de verdeling ervan over de verschillende subsystemen vormt de allerbelangrijkste ontwikkelingsstap. Daarna moeten die doelstellingen natuurlijk nog wel worden gerealiseerd, wat op zichzelf ook een uitdaging van formaat kan zijn.

Er bestaan twee verschillende methoden om zo'n compleet systeem op te bouwen: een experimentele en een theoretische. Bij de experimentele methode ligt de nadruk sterk op het doen van metingen om tot bronbeschrijvingen te komen. De theoretische methode gaat uit van veelal numerieke simulaties. Beide hebben hun voor- en nadelen, waarvan ik er twee wil noemen. Experimentele methodes moeten een werkend model hebben om aan te kunnen meten. Afhankelijk van de industrie kan dat heel duur zijn (auto's, vliegtuigen) of redelijk betaalbaar (zoals bij ons). De numerieke methodes hebben als probleem dat er niet meer fysica

uitkomt dan er in gestopt is. Als magnetostrictie een bronmechanisme is, dan moet dat wel in de modellering zitten. Bij bestaande producten is dat natuurlijk bekend; bij nieuwe producten of bij geheel nieuwe toepassingsgebieden zijn die bronmechanismen vaak niet zo bekend. Het blijkt dat simulaties dan vaak de halve waarheid vertellen. Verder is het zo dat lang niet alle bronmechanismen zich snel en doeltreffend laten simuleren. De combinatie stroming en geluid, bijvoorbeeld, is lastig te simuleren en kan zeer veel reken- en modelleringstijd vragen. Het kan dus simpeler zijn om te gaan meten. Alle fysica zit immers al in het model en de kunst wordt dan om het te herkennen.

In werkelijkheid is er natuurlijk een compromis: reken uit wat redelijkerwijs kan en vergeet vooral niet te verifiëren en te zoeken naar onverwachte bronmechanismen in werkende prototypen.

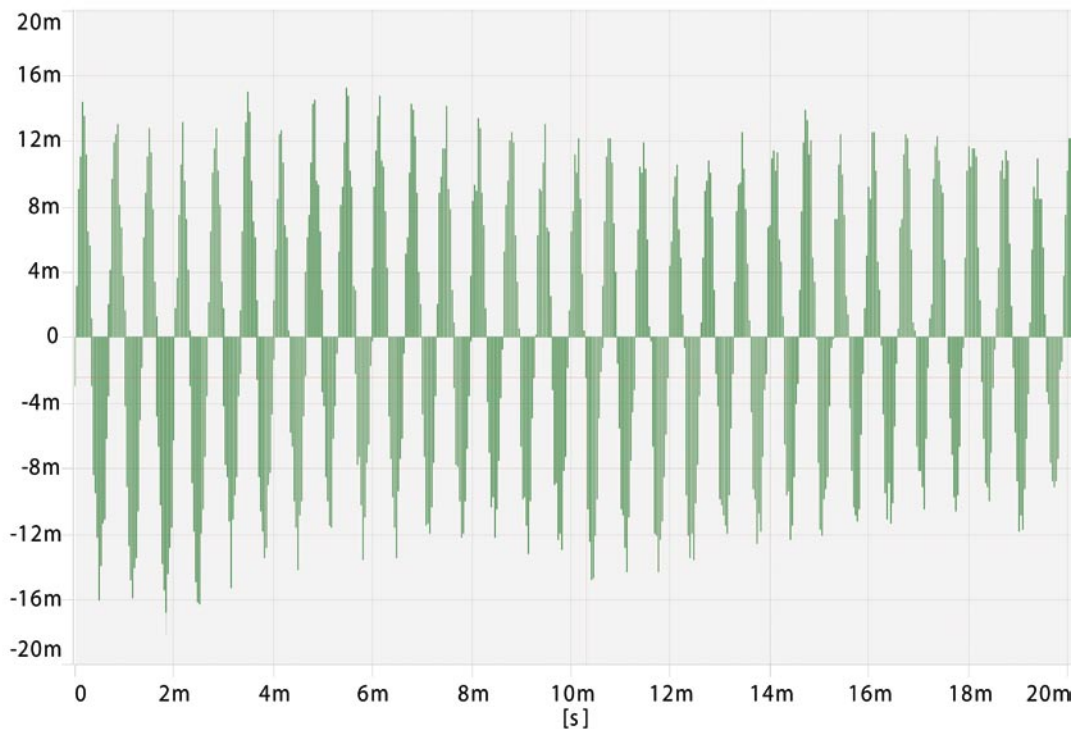
Dan resteert alleen nog de vraag: is dat, wat uiteindelijk bedacht is, ook een miljoen keer te maken tegen redelijke kosten en met behoud van performance voor alle individuele producten? Dat massafabricage-aspect maakt het geheel nog weer wat moeilijker.

Toch wel apart: door goed te luisteren naar de wensen van enkele eindgebruikers probeer je iets te maken dat door een miljoenenpubliek wordt gewaardeerd. •

### Over de auteur

Michiel Schallig was FMF-lid van 1976 tot 1984 en studeerde experimentele natuurkunde aan de RUG. Hij werkt nu bij Philips Consumer Lifestyle op de afdeling Advanced Technology Drachten: Acoustics and Dynamics.

[Pa]



# Waarin de student zich er makkelijk van afmaakt.

Geen beter leven dan een studentenleven. Leuke vrienden, een feestje hier, een reisje daar. En, oh ja, je moet ook nog een beetje studeren natuurlijk. Kortom: je hebt het druk met van alles en nog wat.

Het regelen van je studieboeken is dan misschien wel het laatste waar je je druk over wilt maken. Gelukkig bestel je via [selexyz.nl](https://selexyz.nl) snel en gemakkelijk al je studieboeken en ben je verzekerd van de complete en **up-to-date boekenlijsten** van de meeste studies in Nederland. Bovendien profiteer je ook nog eens van allerlei leuke en aantrekkelijke acties. Goed geregeld toch?

Al je studieboeken compleet en up-to-date  
op [selexyz.nl](https://selexyz.nl)



**selexyz**

**De boekwinkel met een verhaal.**



