

# perio\*diek

op regelmatige tijden terugkerend jaargang 2015 nummer 3



# Inhoud



## 6 Koude moleculen

Hoe zet je relatief zware moleculen stil, zodat je er vervolgens precisie metingen aan kan doen die de grondvesten van het standaard model kunnen testen.

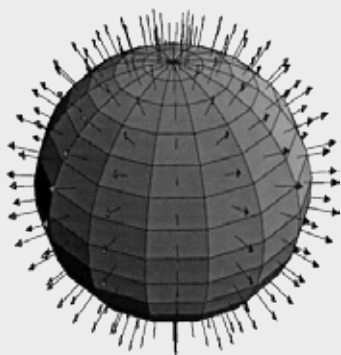


## 18 Computing beyond Moore's law

Het computerlandschap zal de komende jaren erg veranderen doordat het einde van Moore's law in zicht komt. Lees in dit artikel wat dit betekent voor hoe we dingen gaan berekenen.

## In deze Periodiek

- 4 In het nieuws
- 6 Koude moleculen
- 12 Van de extern
- 14 Osborne Reynolds
- 18 Computing beyond Moore's law
- 26 Waterstofproducerende zonnecel
- 30 Koken: Four French Baquettes
- 32 Topological Memory
- 38 Breinwerk



## 32 Topological Memory

In dit erg interessante artikel leer je hoe topologische deeltjes bekend als *Skyrmions*, erg veel potentie hebben voor een nieuwe generatie datadragers.

## Van de redactie

**H**et eind van dit college jaar komt steeds dichterbij en daarmee komt de vakantie ook steeds een stukje dichterbij. Dit is de ideale tijd om even tot rust te komen. Het maakt niet uit waar je naar toe gaat om uit te rusten. De één gaat naar het mooiste tropisch oord om daar een week lang van zon, zee en strand te genieten. Waar iemand anders alle grote festivals opzoekt om dan met behulp van dagen muziek te ontsnappen aan de realiteit. Tot slot zijn er ook mensen die genoeg nemen met een tentje op de hei. Maar wat al die vakantiegangers samenbind is dat het ontspannen toch allemaal een beetje prettiger gaat met het lezen van deze Perio\*diek.

Tijdens het lezen van deze Perio-diek, kun je je meteen oriënteren

op onderzoeken, hier op de faculteit, die je interessant lijken. Want met het eind van dit collegejaar komt het eind van je studie ook steeds dichterbij en daarmee ook het begin van je onderzoek. Ik spreek uit ervaring want volgend jaar moet ik beginnen met mijn masteronderzoek. De Periodiek helpt mij erg bij het uitzoeken van mijn onderzoek. Met het begin van mijn onderzoek komt het einde van mijn tijd in de redactie van dit fantastische blad steeds dichterbij. Daarom wil ik dit moment grijpen om jou te vragen of jij het in je hebt om de volgende hoofdredacteur van de Perio\*diek te worden. Geniet van je vakantie en maak tijd vrij om na te denken wat je volgend collegejaar wil doen.

— Douwe Visser

**Redactie** Derk Rouwhorst, Douwe Visser, Maïke Jaspers, Klaas Hakvoort, Walewein Noordam en Martine Schroor.

**Scribenten** Joost van den Berg, Steven Hoekstra, Ronnie Tamming, Maurits Silvis, Bruno Carpentieri, Matthijs Berghuis, Joop Hendriks en Maxim Mostovoy

**Adverteerders** Advertentie1 (p. 13), Advertentie2 (p. 24-25), Advertentie3 (p. 37), Advertentie4 (p. 40).

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

**Oplage** 1100 stuks

**Druk** Gildeprint

**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).

**FMF**

# In het nieuws

## Onderzoekers ontdekken hoe je thuis heroïne kunt maken

Suikerbieten en gist: de ingrediënten van nieuwe drugs die wellicht over enkele jaren in het criminele circuit verhandeld worden. Onderzoekers ontdekten per toeval dat de twee ingrediënten de mix kunnen vormen voor verslavende middelen.

“Over enkele jaren kan iedereen thuis een drug zoals morfine maken,” zegt bio-engineer John Dueber van de Universiteit van Californië. Een enzym uit suikerbieten kan in gist ervoor zorgen dat glucose verandert in morfine, codeïne en andere middelen die tot nu toe uit bepaalde papavers (bloemen) gemaakt worden. Onderzoekers uit de VS en Canada wisten de stof succesvol in een genetische vorm van gist te creëren. De bedoeling van wetenschappers was alleen niet om illegale drugs te produceren. Ze ontdekten de mix per toeval bij de ontwikkeling van nieuwe, goedkopere, meer effectieve en tegelijkertijd minder verslavende pijnstillers. “Nu moeten we ervoor zorgen dat deze kennis binnenkort niet misbruikt gaat worden,” zegt Dueber. De fine-tuning van deze ontdekking zal naar verwachting twee tot drie jaar duren. “Zodra dit gebeurt, kan iedereen in feite met het juiste recept in hun eigen keuken morfine maken. Door slechts een kleine hoeveelheid – misschien zelfs enkele milliliters – kun je dan high worden,” aldus Dueber.

Scientias

## Panda's kunnen bamboe niet goed verteren

Hoewel reuzenpanda's voornamelijk bamboe eten, kunnen ze dat voedsel niet goed verteren. Dat zou blijken uit een nieuwe studie van Chinese wetenschappers. De micro-organismen die in de maag van de panda voorkomen zijn vooral geschikt om vlees af te breken.

Mogelijk onttrekken de dieren daardoor relatief weinig voedingsstoffen aan de planten die ze nu in grote hoeveelheden eten. Dat melden Chinese onderzoekers in het wetenschappelijk tijdschrift *Mbio*. De nieuwe studie bewijst verder nog niet definitief dat panda's plantaardig voedsel slecht kunnen verteren. Volgens de Amerikaanse bioloog Jonathan Eisen van de Universiteit van Californië is het best denkbaar dat sommige micro-organismen in de maag van de reuzenpanda zich in de loop van evolutie hebben aangepast aan hun nieuwe dieet en inmiddels wel plantaardig materiaal verwerken. Meer onderzoek is volgens hem noodzakelijk. “Het is in ieder geval zeer interessant om te zien wat er gebeurt met het microbioom van een groep dieren die een heel ander soort voedsel is gaan eten dan hun voorouders”



Nu

## Ook wetenschapper heeft moeite met wiskunde

Denkt u dat u de enige bent die wat moeite heeft met ingewikkelde vergelijkingen? Welnee: wetenschappers vinden het ook lastig, zo blijkt. Ze laten onderzoeken van collega's met daarin veel wiskunde vaker links liggen.

Dat blijkt uit een onderzoek van de universiteit van Bristol. Voor elke extra vergelijking op een pagina bleek een paper al snel zo'n 28 procent minder vaak geciteerd te worden door andere wetenschappers. Papers met uitzonderlijk veel wiskundige vergelijkingen, werden over het algemeen vijftig procent minder vaak geciteerd dan papers zonder of met een klein beetje wiskunde. De onderzoekers beperkten zich met hun studie tot papers over ecologie en evolutie.

Bekende onderzoekers – waaronder de bekende Stephen Hawking – spraken eerder al het vermoeden uit dat het gebruik van wiskunde in hun papers invloed had op hoe groot de impact van die papers was. Nu is dat voor het eerst ook bewezen. “Dit is belangrijk, omdat bijna alle sectoren van de wetenschap gebaseerd zijn op wiskundige theorieën en experimenten,” legt onderzoeker Tim Fawcett uit. “Als nieuwe theorieën zo worden gepresenteerd dat andere onderzoekers afhaken, dan zal niemand cruciale experimenten herhalen om deze theorieën te testen. En dat vormt een barrière voor de wetenschappelijke vooruitgang.”

Scientias

## Laad je mobiel op met urine

Engelse onderzoekers van onder andere het Bristol Robotics Laboratory hebben een manier bedacht om mobiele telefoons op te laden met energie uit urine.

Het proces verloopt in biologische brandstofcellen, waarin bacteriën urine afbreken en elektronen genereren die elektriciteit produceren.

Door vier brandstofcellen te combineren, wisten de onderzoekers uit Bristol lang genoeg een spanning van 642 mV op te wekken om een mobiel te kunnen opladen.

Wetenschap in beeld

## Deeltjesversneller LHC vestigt nieuw record

De LHC, de deeltjesversneller van het CERN, heeft een record gevestigd door protonen bij maar liefst 13 TeV op elkaar te laten botsen, waarbij er hopelijk nieuwe, onbekende deeltjes ontstaan. Wellicht kunnen we er zo achter komen wat donkere materie is.

Om de duurzaamheid van de versneller te testen, hebben de onderzoekers van het CERN een paar dagen achter elkaar, steeds enkele uren lang het energieniveau op 13 TeV gehandhaafd. In juni beginnen volgens plan de metingen van de deeltjesbotsingen. De LHC zoekt dan naar sporen van donkere materie

Toen de LHC in 2012 het Higgs-deeltje ontdekte, was de botsings-

energie ongeveer 8 TeV. Met het hogere energieniveau hopen de natuurkundigen nieuwe, nog onbekende deeltjes te vinden.

Deze keer zijn ze op zoek naar de donkere materie van het heelal, die, wellicht, uit zogeheten supersymmetrische deeltjes of WIMPs bestaat.



Wetenschap in beeld

## Efficiënter lopen met batterijloos exoskelet

Miljoenen jaren evolutie hebben ons perfect leren lopen, maar onderzoekers van de North Carolina State universiteit en Carnegie Mellon universiteit hebben recentelijk een batterijloos exoskelet ontwikkeld dat lopen nog net wat makkelijker maakt.

De lichtgewicht koolstofvezel constructie om het onderbeen imiteert de werking van de kuitspieren en achillespees. Tijdens het neerzetten van de voet slaat het energie op in een veer en een koppelingssysteem geeft deze vrij wanneer de voet wordt opgetild. Hiermee kan zo'n 7% energie worden bespaard, wat overeenkomt met een rugzak van zo'n 5 kg.

Militaire toepassingen liggen voor de hand, maar de onderzoekers zien vooral mogelijkheden voor mensen met een aandoening (spierproblemen na een beroerte, MS, etc.)



North Carolina State University

## Bedje verder gespreid voor Majorana-qubit

Wetenschappers van de Technische Universiteit Delft denken een materiaal te hebben gevonden waarin ze een Majorana-deeltje kunnen bewaren, stabiel houden én meten zonder het kapot te maken. Een qubit op basis van dit in Delft ontdekte deeltje is daarmee een stapje dichterbij.

Al jaren staat het exotische Majorana-deeltje in de belangstelling van natuurkundigen. Het is uniek omdat hij zijn eigen antideeltje vormt. En mogelijk nuttig omdat het in de toekomst namelijk kan dienen als geheugen- en rekeneenheid van een quantumcomputer, een zogenoemde qubit. Alleen dan moet de informatie die erin wordt gestopt ook weer uit te lezen zijn en dat lukte onderzoekers maar niet.

Volgens wetenschappers van de TU Delft biedt de supergeleider niobium-titanium-nitride die mogelijk wél. Ze onderzochten dit materiaal dat uiteindelijk als een plakje op een halfgeleidend nano-draadje moet komen te liggen en zo een Majorana-qubit huisvest.

# Koude moleculen

## *Afgeremde moleculen voor precisiemetingen*

DOOR J.E. VAN DEN BERG EN S. HOEKSTRA

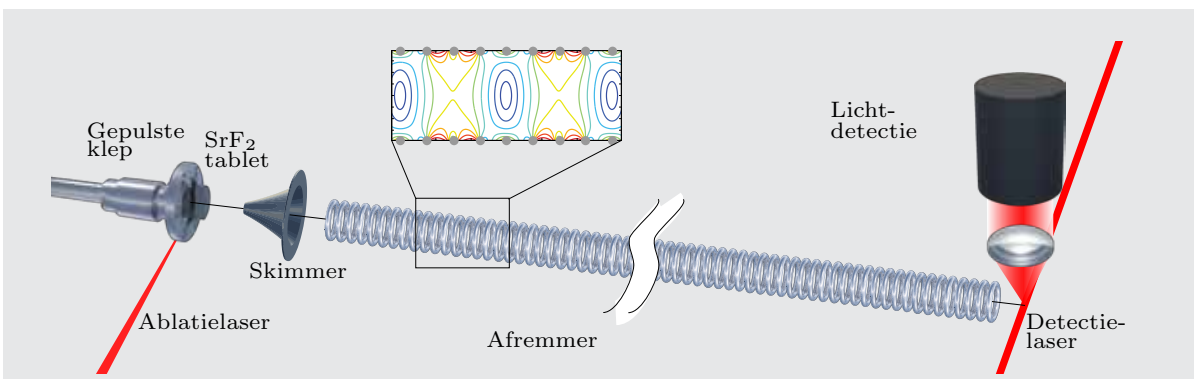
Het bouwen van een bijna vijf meter lange molecuulafremmer, bestaande uit duizenden onderdelen die op honderdsten van een millimeter precies moeten worden uitgelijnd, is geen eenvoudige opgave. Zo'n complexe machine is echter wel een van de weinige manieren om relatief zware moleculen in een vacuümkamer tot stilstand te brengen. Met die stilgezette moleculen kunnen we vervolgens zeer precieze metingen doen om te testen of het zogenaamde Standaardmodel van de deeltjesfysica wel klopt, of dat er uitbreidingen van dat model nodig zijn.

**H**et Standaardmodel beschrijft in één samenhangende theorie hoe alle elementaire deeltjes door middel van de zwakke kernkracht, de sterke kernkracht en elektromagnetisme met elkaar interacteren. Ook verklaart het dat de deeltjes massa hebben vanwege het onlangs ontdekte Higgsdeeltje. Hoewel het Standaardmodel zeer succesvol en extreem nauwkeurig is, weten we ook dat het niet alles in de natuurkunde omvat. Zo wordt de zwaartekracht er niet door beschreven, geeft het geen verklaring voor het nagenoeg ontbreken van antimaterie in het heelal, beschrijft het niet de donkere materie en verklaart het evenmin waarom sommige natuurconstanten de waarde hebben die ze nu eenmaal hebben. Inmiddels hebben theoretisch natuurkundigen talloze uitbrei-

dingen op het Standaardmodel voorgesteld, die een of meerdere van deze hiaten proberen op te vullen. Veel van die theorieën voorspellen het bestaan van extra fundamentele deeltjes die ook in experimenten te zien zouden moeten zijn. Zeer bekende experimenten die naar zulke nieuwe deeltjes zoeken worden uitgevoerd met de gigantische deeltjesversneller LHC bij CERN in Genève. Daar probeert men deeltjes met enorme energieën frontaal op elkaar te laten botsen en nieuwe deeltjes te ontdekken in de brokstukken.

### ...met stilgezette moleculen

Een molecuulafremmer is zo'n beetje het tegenovergestelde van een deeltjesversneller. Maar ook een afrem-



**FIGUUR 1** Een schematisch overzicht van het experiment. In werkelijkheid bevindt alles zich in een grote vacuümkamer. Voor een volledige uitleg, zie de tekst.



**FIGUUR 2** Een foto van de 4 meter lange opstelling in het lab. Rechts worden de moleculen in de bronkamer gemaakt, waarna ze naar links vliegen en door de afremmer worden afgeremd. Door de gebruikte lens lijkt de afremmer gebogen, in werkelijkheid is hij kaarsrecht.

mer kan gebruikt worden om naar afwijkingen aan het Standaardmodel te zoeken. Nieuwe deeltjes veroorzaken namelijk ook indirect zeer subtiele afwijkingen in de structuur van moleculen. Omdat die afwijkingen zo klein zijn, kun je ze alleen meten als je zeer precieze metingen doet die ongevoelig zijn voor allerlei versturende externe factoren. Juist door moleculen in vacuum stil te zetten, en ze heel koud te maken, kunnen de moleculen zo geprepareerd worden dat de gewenste precisie haalbaar wordt. Dat stilzetten is het doel en pas ongeveer vijftien jaar geleden is het afremmen van molecuulbundels voor het eerst gedemonstreerd in de groep van Meijer in Berlijn. Men gebruikte daar een type afremmer dat goed werkte voor lichte moleculen, maar problemen had met zwaardere, vooral bij langzame eindsnelheden. Juist die zware moleculen zijn het meest geschikt om precisiemetingen aan het Standaardmodel te doen, omdat ze een grote intrinsieke gevoeligheid hebben voor het bestaan van nieuwe fysica. Helaas is het afremmen lastiger, om twee redenen. Ten eerste zorgt de grotere massa, bij een gelijke beginsnelheid, voor een langere remweg, waardoor een langere afremmer nodig is. Ten tweede zorgt de

molecuulstructuur ervoor dat de maximale vertraging die bij het afremmen gebruikt kan worden vrij laag is, waardoor eveneens de afremmer langer dient te zijn. Een traditionele, geschakelde afremmer zou vanwege die lengte te veel verliezen kennen, en is daarom ongeschikt. Als alternatief werd, eveneens in de groep in Berlijn, een 50 cm lange lopendegolf-Starkafremmer gebouwd en gebruikt voor het afremmen van het lichte molecuul CO [2, 3]. Dit type afremmer kent in principe geen verliezen, waardoor een grotere lengte mogelijk is. Op die manier kunnen dus ook de gewenste zware moleculen worden afgeremd.

### Ons molecuul

Wij hebben eerst met computersimulaties aangetoond dat het mogelijk is om met een dergelijke lange afremmer zware SrF (strontiummonofluoride) moleculen af te remmen. We hebben SrF gekozen, omdat het goede eigenschappen heeft voor het afremmen, het verder afgekoeld kan worden met laserlicht en het gevoelig is voor pariteitschending. Pariteitsymmetrie, ofwel spiegelsymmetrie, wordt volgens het Standaardmo-

del geschonden door de zwakke kernkracht. Om deze schending te kunnen onderzoeken zijn zeer precieze metingen nodig, omdat het effect zo klein is. Met atomen zijn dergelijke metingen al verricht maar met moleculen nog niet, hoewel de gevoeligheid van SrF tot honderdduizend keer groter is. Op basis van deze eigenschappen lijkt SrF dus een uitstekend molecuul om af te remmen.

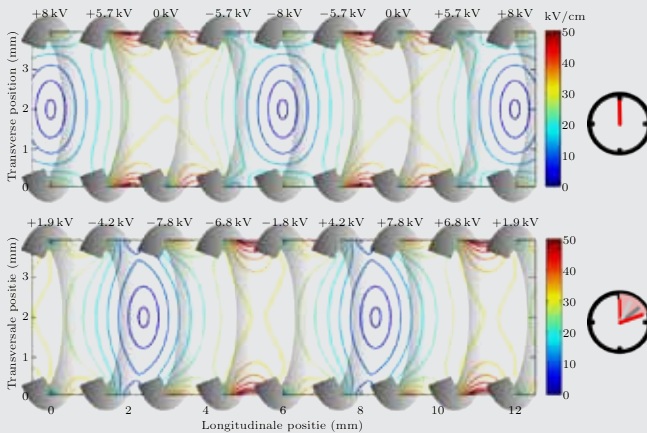
We hebben daarom een experiment gebouwd dat schematisch is weergegeven in Figuur 1. In het kort bestaat het uit een molecuulbron die pakketjes moleculen met hoge snelheid in de afremmer schiet. In de afremmer worden de moleculen bij elkaar gehouden en als pakketje afgeremd. Aan het eind van de afremmer worden de afgeremde moleculen gedetecteerd of verdere experimenten gedaan. We zullen nu eerst de werking van de afremmer uitleggen alvorens de verdere details en uitkomsten van het onderzoek te bespreken.

## Neutrale moleculen afremmen met het Stark-effect

Deeltjesversnellers kunnen efficiënt werken omdat ze gebruik maken van geladen deeltjes of ionen. Met elektrische en magnetische velden kunnen ionenbundels versneld en gestuurd worden. Wij zijn echter geïnteresseerd in neutrale moleculen, die geen lading hebben. We kunnen wel slim gebruik maken van de ladingsverdeling in het molecuul. Ieder lineair molecuul dat uit twee verschillende atomen bestaat heeft netto meer negatieve lading bij het ene atoom en netto meer positieve lading bij het andere. Zo'n molecuul heeft hierdoor een dipoolmoment. Wanneer zo'n molecuul in een elektrisch veld geplaatst wordt, zal het gaan draaien totdat het anti-parallel ligt aan de elektrische veldlijnen. Verder zorgen kwantummechanische effecten ervoor dat deze moleculen aangetrokken worden tot hoge of lage elektrische veldsterktes, afhankelijk van de toestand waarin de moleculen geprepareerd worden. Dat principe, het Stark-effect, zorgt voor een

energieverschuiving van de verschillende moleculaire rotatietoestanden als functie van het aangebrachte elektrische veld. Onze afremmer bestaat uit ringvormige elektrodes die in een lange rij achter elkaar geplaatst zijn. Op elk van die elektrodes wordt een elektrische hoogspanning gezet. Daardoor ontstaat er een elektrisch veld in de afremmer. In Figuur 3 is te zien hoe dat eruitziet.

In de afremmer ontstaan driedimensionale potentiaalputjes waarvan in het centrum het elektrische veld minimaal is. Als een laagveldzoekend molecuul eenmaal daarin belandt, kost het energie om daar weer uit te klimmen. Indien het putje diep genoeg is, dan zal het molecuul erin opgesloten blijven en niet kunnen ontsnappen. Omdat onze moleculen met ongeveer 300 m/s de afremmer binnenvliegen, moeten we de putjes ook met die snelheid laten be-



**FIGUUR 3** Een langsdoorsnede door de ringetjes van de afremmer op twee verschillende tijdstippen. Binnen de ringen zijn lijnen van gelijke elektrische veldsterkte getekend. De blauwe cirkels vormen een minimum van het elektrische veld, en zijn daarmee een soort driedimensionaal putje waarin laagveldzoekende moleculen gevangen worden. Door de spanningen in een golf over de ringetjes te laten lopen, bewegen de putjes naar rechts.



wegen om de moleculen te vangen. Als we ze eenmaal in de bewegende putjes gevangen hebben, kunnen we de moleculen gaan afremmen door de snelheid van de putjes geleidelijk omlaag te brengen. Hierbij geldt dat hoe dieper het putje is, hoe harder we ze kunnen afremmen.

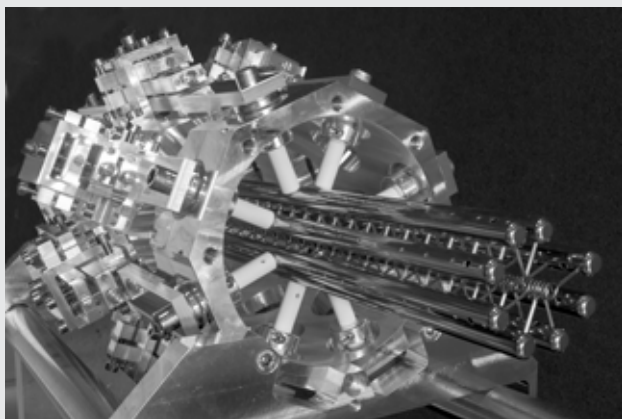
Te hard afremmen zorgt ervoor dat de moleculen uit de putjes vliegen en verloren raken voor het experiment. We bewegen de putjes door de hoogspanning over de ringetjes als een wisselspanningsgolf te laten lopen. Vandaar de term lopende-golf-Starkafremmer. De snelheid van de golf kunnen we regelen door de frequentie van de wisselspanning aan te passen tussen de 30 kHz en gelijkspanning voor stilstand.

*“Het blijkt mogelijk te zijn om SrF moleculen (...) in vijf meter af te remmen met een vertraging van 9000 m/s<sup>2</sup>.”*

De diepte van de putjes is ook afhankelijk van de gevoeligheid van de moleculen zelf voor de elektrische velden. De grootste uitdaging van de voor ons interessante moleculen is dat die gevoeligheid vrij laag is en zelfs afneemt als de elektrische veldsterkte wordt opgevoerd voorbij een bepaald punt. De natuur beperkt ons hier dus in de maximale vertraging die gebruikt kan worden voor het afremmen.

### Het afremexperiment

We hebben computersimulaties gedaan om te berekenen wat de maximale vertraging kan zijn en hoe lang de afremmer dan moet worden [1]. Het blijkt moge-

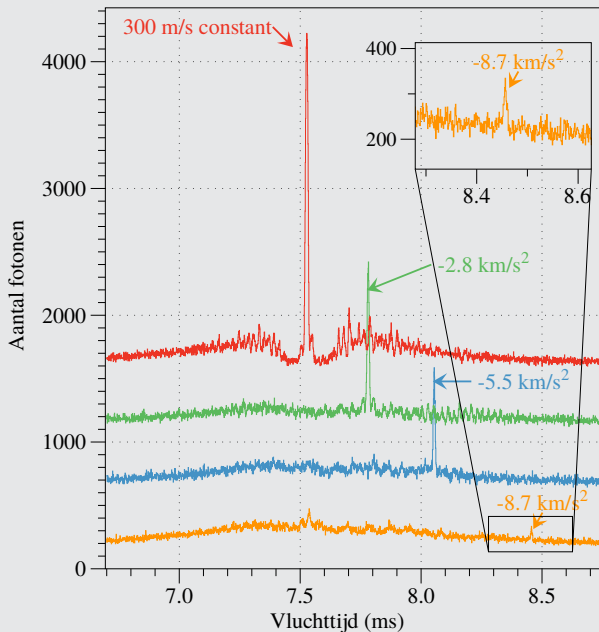


**FIGUUR 4** Een foto van één van de afremmodules. Te zien zijn de stangen met ringvormige elektrodes in een achthoekige behuizing. Aan de buitenkant bevinden zich verschillende instelmechanismen. De witte staafjes dienen als elektrische isolatie tussen de behuizing en de staven onder hoogspanning.

lijk te zijn om SrF moleculen die met een beginsnelheid van 300 m/s binnenvliegen, in vijf meter af te remmen met een vertraging van 9000 m/s<sup>2</sup>. De hele afremprocedure duurt dan 33 ms. De hoeveelheid SrF moleculen die succesvol kan worden afgeremd zonder in het proces verloren te gaan is ongeveer tien keer meer dan in andere soorten afremmers. We berekenden ook hoe de gevoeligheid voor een meting van pariteitschending verbeterd wordt door de moleculen na het afremmen in de stilgezette putjes vast te houden. Op die manier kan er langer, en dus preciezer, gemeten worden. In combinatie met verdere laserkoeling verbeterd de precisie van zo'n meting met een factor van een paar honderd ten opzichte van experimenten met snelle moleculaire bundels.

### Resultaten

De afgelopen jaren is een lange afremmer gebouwd. Allereerst moest er een bronkamer gebouwd worden. SrF moleculen zijn radicalen en zo reactief dat ze niet in een flesje verkrijgbaar zijn. Daarom moeten ze ter plekke in een vacuümkamer gemaakt worden. In de



**FIGUUR 5** De gemeten aankomsttijd van de moleculen voor verschillende vertragingen. Bij de hogere vertragingen worden de afremputjes ondieper, waardoor er minder moleculen afgeremd worden.

bronkamer maken we tien keer per seconde een molecuulwolkje door met een gepulste laser op een tablet van samengeperst  $\text{SrF}_2$  te schieten. Door het intense laserlicht wordt het tablet plaatselijk verhit waardoor er een wolkje  $\text{SrF}$  moleculen verdampt. Dit proces heet ablatie. Tegelijkertijd wordt er heel kort een gaslepje geopend waardoor xenongas de kamer binnen kan stromen. Dit xenongas botst vervolgens met het zojuist gemaakte wolkje  $\text{SrF}$  en neemt dit vervolgens mee op zijn weg naar de afremmer. Hierbij koelen de moleculen ook aanmerkelijk af: doordat het xenongas vanuit hoge druk vrij expandeert in het vacuüm wordt het kouder. De temperatuur van de moleculen is na de expansie ongeveer 10 graden boven het absolute nulpunt. Die lage temperatuur is belangrijk omdat alleen de echt koude moleculen elektrische laagveldzoekers zijn die we kunnen vangen in de afremputjes. Helaas heeft alles zijn prijs, want die lage temperatuur kan al-

leen gehaald worden als het xenongas zo snel mogelijk uit de klep vliegt. We kunnen door het koelen van de klep met koud stikstofgas de snelheid terugbrengen naar 300 m/s, waardoor het afremmen binnen de vijf meter moet lukken.

Het ontwerp van de afremmer en de toleranties daarop zijn vastgesteld op basis van de computersimulaties. Nagenoeg alle onderdelen van de afremmer zijn in de eigen instrumentmakerij van het KVI-CART gemaakt. De afremmer bestaat uit modules van 50 cm die achter elkaar worden geplaatst in de vacuumkamers. Uiteindelijk is er tot op heden een afremmer van vier meter gebouwd die voldoet aan alle ontwerpen.

Om de moleculen in de afremmer te detecteren hebben we laser- en detectiesystemen gebouwd. De  $\text{SrF}$  moleculen kunnen gedetecteerd worden door er met laserlicht van

een specifieke golflengte op te schijnen, waarna de moleculen oplichten. Het oplichten van de moleculen kan met een lichtgevoelige detector worden waargenomen. Door het detectiesysteem aan het eind van de afremmer te plaatsen, en de tijd te registreren wanneer het licht wordt waargenomen ten opzichte van de laserpuls die in de bronkamer de  $\text{SrF}$  moleculen maakt, kan de vluchtijd van de moleculen in de afremmer worden bepaald. Aangezien de lengte van de afremmer bekend is, volgt daaruit dan ook de gemiddelde snelheid.

De afgelopen jaren is er met een aantal promovendi, technici en een handvol afstudeerstudenten hard gewerkt aan de bouw van de afremmer. De resultaten van die arbeid worden nu steeds meer zichtbaar. Eerst toonden we aan dat het inderdaad mogelijk is om met de gekoelde klep de relatief langzame, koude  $\text{SrF}$

molecuulbundels te maken. Nadat de werking van de bron voldoende was aangetoond, hebben we als eersten het afremmen van SrF in dit type afremmer laten zien zoals te zien in Figuur 5 [5]. Bovendien was dit de eerste keer dat de goede werking van een modulaire afremmer gedemonstreerd werd. De eerste metingen aan het afremmen werden gedaan toen de afremmer nog maar twee meter lang was. Met deze twee meter afremmer konden we SrF afremmen van 300m/s naar 234m/s. Dat komt overeen met een reductie van 40% van de bewegingsenergie van de moleculen. We maten met de lichtdetectiede aankomsttijd van de moleculen en vergeleken die met computersimulaties. We vonden een goede overeenkomst tussen beide. Hieruit concluderen we dat we een goed begrip van de werking van de afremmer hebben.

### Vooruitblik

Op basis van de genoemde resultaten met de twee meter afremmer kan ervan worden uitgegaan dat het compleet tot

stilstand brengen van SrF moleculen in een vijf meter lange afremmer inderdaad gaat lukken. Tijdens het onderzoek zijn er punten aan het licht gekomen die verbeterd kunnen worden. Dit betreft met name de stabilisatie van de kleptemperatuur, de juiste overlap van de xenonpuls met de SrF wolk en het laservermogen dat gebruikt wordt in het ablatieproces. Met verbeteringen op die punten moet het mogelijk zijn om per schot duizend SrF moleculen tot stilstand te brengen.

Als de moleculen tot stilstand zijn gekomen zullen ze nog verder worden afgekoeld met laserlicht. De unieke combinatie van een afremmer en laserkoeling maakt het mogelijk om duizend ultrakoude SrF moleculen per schot te maken, een factor twee meer dan wat nu elders wordt gehaald door middel van directe laserkoeling.

Onze lange, modulaire lopendegolf-Starkafremmer is een uniek en veelzijdig apparaat. Het stelt ons in staat om zware, interessante moleculen die eerder niet voor afremmen in aanmerking kwamen, toch stil te zetten. Als voorbeelden noemen we SrF, YbF, PbO en grotere biomoleculen zoals benzonitril, maar ook lichtere moleculen zoals water. Doordat de lengte van vijf meter in de praktijk niet gauw overschreden zal worden, is het voor de zwaardere moleculen dan SrF wel noodzakelijk om de beginsnelheid van de moleculen aanzienlijk te verminderen. Dit kan door een cryogene bron te gebruiken, iets waar we zeer binnenkort aan gaan werken. Ook het vangen van de lasergekoelde SrF moleculen in een optische dipoolval staat op het programma. Er is dus meer dan genoeg te doen, en afstudeerstudenten zijn daarom altijd welkom!

*“De unieke combinatie van een afremmer en laserkoeling maakt het mogelijk om duizend ultrakoude SrF moleculen per schot te maken.”*

Nadat de afgelopen decennia atomen ultrakoud zijn gemaakt, is het nu de beurt aan langzame en koude moleculen. Met ultrakoude moleculen

kunnen ongekend precieze metingen verricht worden. Wereldwijd wordt hiernaar onderzoek gedaan in het kader van botsingen (astrochemie), fundamentele natuurkunde en vaste-stoffysica •

### Referenties

- [1] J. E. van den Berg, “Traveling-wave Stark deceleration of SrF molecules”, proefschrift (University of Groningen, 2015).
- [2] S. A. Meek e.a., Rev. Sci. Instrum. 82, 093108 (2011).
- [3] A. Osterwalder e.a., Phys. Rev. A 81, 051401(R) (2010).
- [4] J. E. van den Berg e.a., Eur. Phys. J. D 66, 235 (2012).
- [5] J. E. van den Berg e.a., J. Mol. Spectrosc. 300, Spectroscopic Tests of Fundamental Physics, 22-25 (2014).

# Van de commissaris-extern

DOOR RONNIE TAMMING

Het collegejaar is weer ten einde. Dit betekent dat ook mijn tijd als bestuurder er bijna op zit. Een druk, maar zeker ook leerzaam en leuk jaar met veel belevenissen! Gelukkig heb ik, voor het jaar voorbij is, nog net de kans om een stukje te leveren als lid van het bestuur aan dit mooie blad.

**M**ijn naam is Ronnie Roelof Tamming en ik zal na de vakantie beginnen aan mijn 5<sup>e</sup> jaar Technische Natuurkunde. Ik ben geboren en getogen in Bovensmilde (in de buurt van Assen voor de mensen die het niet kennen), maar woon inmiddels 3,5 jaar in Groningen. Opgegroeid naast de TT-baan in Assen heb ik altijd van motoren gehouden en ik heb dan ook zo snel mogelijk een eigen motor gekocht. Deze hobby deel ik met mijn broer en zus, die ook beiden in Groningen gestudeerd hebben.

In mijn eerste jaar kwam ik al bij de FMF. Zoals het altijd gaat, kwam ik er voor de gratis bapao en de koffie. Vervolgens werd ik gevraagd of ik naar de felicitatieborrel van de Titanen wou komen; dit was dan ook mijn eerste activiteit die ik bezocht. Tijdens het kerstdiner werd ik gevraagd voor de ledenweekendcommissie, waarop ik antwoorde dat ik het nog niet wist. Na de kerstvakantie keek ik in mijn Postvak In en werd ik verrast met een mailtje waarin stond dat ik in de commissie zat. Dit was het begin van het actief zijn bij de FMF.

Na 3 jaar studeren had ik alle vakken afgerond, op mijn bachelor scriptie na. Toen werd aan mij gevraagd of bestuur niet iets voor mij was en dat ik mijn scriptie er naast zou kunnen doen. Ik heb me laten overhalen en vandaar dat ik nu op de positie van commissaris-extern zit. Deze prachtige functie heeft als doel om het bedrijfsleven dichterbij de studenten te brengen en de studenten kennis te laten maken met de verscheidene arbeidsmogelijkheden.

Het leuke aan mijn functie is het bezoeken van bedrijven. Het is steeds weer een uitdaging om de wensen van het bedrijf goed in te schatten en daarop in te spelen. In dit jaar heb ik veel geleerd over de bedrijven en daarom kan ik een goede inschatting maken wat bij

mij past. Ook heb ik dit jaar geleerd om actiever achter dingen aan te gaan; sommige bedrijven zullen niet vanuit zichzelf contact opnemen. Het was een hele ervaring om hier een jaar mee bezig te zijn.

Dit jaar heb ik, als kers op de taart, ook het geluk gehad dat ik mee mocht op GBE naar Singapore en Indonesië. Met deze reis heb ik dingen gedaan die normaal niet mogelijk zijn. Voorbeelden zijn: Rijden in/ op een pantservoertuig, een jungletocht, waarbij we in iemands huis sliepen, en een skybar, waar we naar binnen kwamen, omdat we op de gastenlijst stonden. Het was een heerlijke onderbreking van het bestuursjaar, waarna ik met volle moed weer verder kon.

Maar net als het jaar bestuur komt ook aan dit artikel een einde. Ik hoop dat jullie net zo hebben genoten van afgelopen jaar als ik en dat volgend jaar net zo'n succes mag worden! •





**PHILIPS**

# Osborne Reynolds

## *On the phenomenon of turbulence*

BY MAURITS SILVIS

Osborne Reynolds can be seen as one of the founding fathers of modern turbulence research. During his almost-40-year-long academic career he worked on a wide range of physics and engineering problems, publishing more than 70 papers along the way. Two of these papers have had a very profound impact on the way we think about turbulence, and we'll look into these in the current article.

Osborne Reynolds was born in a well-established family in Belfast, Ireland, in 1842. Soon after, he and his family moved to the area of Essex, not far from Cambridge, where Reynolds grew up. His father, who was a reverend, was very much interested in mathematics and mechanics, and he took upon him the early education of his son. After being an apprentice in an engineering workshop, Reynolds decided to go to the University of Cambridge to study Mathematics. Not long after his graduation in 1867, Reynolds was appointed as a professor at Owens College in Manchester. He was only 25 at the time! He remained in Manchester until his retirement.

### Turbulence and the Reynolds number

In his 1883 paper titled "An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and



**FIGURE 1** Osborne Reynolds (1842-1912).

of the Law of Resistance in Parallel Channels" [2] Reynolds writes:

*"The internal motion of water assumes one or other of two broadly distinguishable forms - either the elements of the fluid follow one another along lines of motion which lead in the most direct manner to their destination, or they eddy about in sinuous paths the most indirect possible."*

In present-day terminology we call "direct" motion laminar, or layered. This is a state in which the behavior of a fluid is very regular. The sinuous paths Reynolds refers to are not sinusoidal (periodic) motions. Instead, they are

the ones "having many curves and turns", being very irregular. Flows showing such behavior are called turbulent flows now.

Reynolds goes on to describe how one can distinguish these two flow types experimentally in a transparent medium like water:

*“This [flow behavior] may be shown by adding a few streaks of highly coloured [sic] water to the clear moving water. Then although the coloured streaks may at first be irregular, they will, if there are no eddies [vortices], soon be drawn out into even colour bands; whereas if there are eddies they will be curled and whirled about in the manner so familiar with smoke.”*

With his experimental investigations he aimed to find out which quantities determine this distinction in flow behavior. Furthermore, he tried to explain what causes a flow to transition from a laminar to a turbulent state.

As a first step, Reynolds notes that it is possible to rescale the Navier-Stokes equations, the equations describing the motion of fluids, in such a way that only a single dimensionless parameter, now called the Reynolds number, is involved. Denoting the rescaled (dimensionless) components of the velocity field by  $u_i$  and the rescaled pressure field by  $p$ , we may write

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}.$$

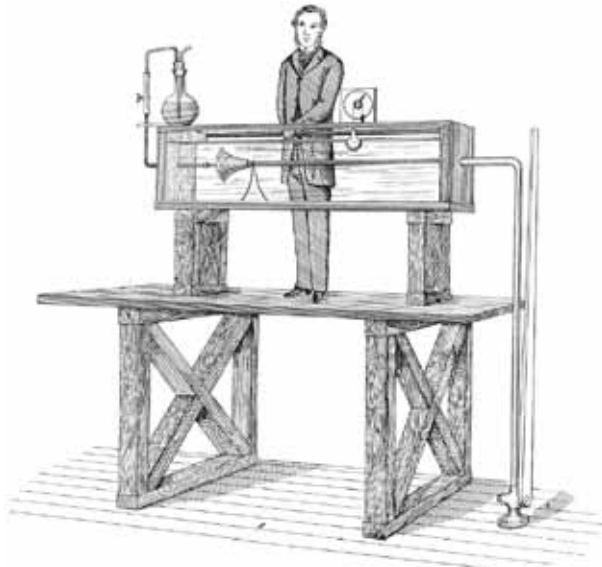
According to the Einstein summation convention repeated indices imply a sum, here over the three directions of space. The Reynolds number,  $Re$ , depends on length ( $\mathcal{L}$ ) and velocity ( $U$ ) scales that are typical for the flow at hand. The Reynolds number also depends on the kinematic viscosity ( $\nu$ ) of the fluid,

$$Re = \frac{U\mathcal{L}}{\nu}.$$

Reynolds hypothesized that there is a critical flow velocity,  $u_c$ , that marks the transition between laminar (for flow velocities smaller than the critical velocity) and turbulent flows (for flow velocities larger than the critical velocity). Characterized by a critical Reynolds number,  $Re_c$ , it was thought to scale with the diameter of pipes used in experiments,  $d$ , and the fluid viscosity as

$$u_c = Re_c \frac{d}{\nu}.$$

The experimental setup that Reynolds used to verify his hypothesis is schematically shown in figure 2. It consisted of a large tank of water in which a glass tube



**FIGURE 2** Schematic overview of the experimental setup that Reynolds used to verify his hypothesis.

*“Osborne Reynolds made  
very important contributions  
to the understanding  
of turbulent flows”*

could be placed. Water could flow from the tank into the tube via a large mouth piece, but only when the valve at the other end of the tube

was opened. Using the valve, Reynolds set the rate at which water would flow through the tube. When the water was flowing, a dye would be ‘pulled’ inside the tube, working as a tracer of the fluid motion.

Reynolds separately varied the flow velocity, the tube diameter and the temperature of the water (effecting only the viscosity) to conclude that indeed there is a critical Reynolds number that determines if laminar or turbulent fluid motion was observed. Although Reynolds doesn’t mention it in his paper, this critical Reynolds number was later estimated to be of the order of 2000.

### Understanding turbulence

While establishing the role of the Reynolds number in his flow experiments, Reynolds remarks that his experimental results were very sensitive to initial disturbances in the flowing fluid:

*“The critical velocity was very sensitive to disturbance in the water before entering the tubes; and it was only by the greatest care as to the uniformity of the temperature of the tank and the stillness of the water that consistent results were obtained. This showed that the steady motion was unstable for large disturbances long before the critical velocity was reached.”*

Also, he observed that, around the critical velocity, eddies would appear and grow rapidly, leading to a turbulent state in a very short time. He contrasts this with experiments in which he lets two streams flow in opposite directions in the same tube. In that case one can observe what is called a Kelvin-Helmholtz instability (refer to the video [3]), during which vortices appear and grow gradually, seemingly independent of initial disturbances in both fluids.

Thus, Reynolds already noted that the mechanism by which vortices appear must be different in both experiments, and that the

magnitude of disturbances plays a key role in causing turbulence, a remarkable observation given the fact that Reynolds lived over a 100 years ago. In present-day terminology the Kelvin-Helmholtz instability is called a linear instability. To indicate that the mechanism by which turbulence arises in regular pipe flow (a stream in one direction) is different, this latter mechanism is called a bypass transition. It is currently believed that this bypass transition can be ‘delayed’ almost indefinitely, by using smoother and smoother pipes and more regular in-flow of fluid. Experiments confirm this feeling: laminar flows have been observed at Reynolds numbers as high as  $10^5$ .

The attentive reader will notice that these ideas obfuscate the role of the Reynolds number as a precise indicator of the state of a flow. Indeed, it cannot be generally said that there is a single Reynolds number that marks the transition between laminar and turbulent flows, particularly if different flow geometries are considered. In practice you will therefore often find that the Reynolds number is only listed as a rough indication of flow behavior. Taking perturbations arising from initial and boundary conditions into account, we can say it has more power than that, however. If two flows have similar initial and boundary conditions (after making them dimensionless using typical length and velocity scales) and have a similar Reynolds number, then these flows can be expected to show the same behavior.

### Predicting turbulence

In a follow-up paper titled “On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion” [4] Reynolds aims to theoretically explain, on the basis of the Navier-Stokes equations, when a fluid flow is laminar and when it can become turbulent.



Unfortunately, the paper is very hard to read and confusing in its terminology. Even Sir George Gabriel Stokes, who was one of the eminent scientists reviewing the paper, found this, as can be deduced from a letter he wrote [1]:

*“Lensfield Cottage, Cambridge, 31 Oct. 1894*

*Dear Lord Rayleigh,*

*I must plead guilty to not having digested Professor Osborne Reynolds’s paper, though much time has passed since it was referred to me.*

*I find it very difficult to make out what the author’s notions are. As far as I can conjecture his meaning, I must say I do not think he has made out his point. He is however an able man, and in his former paper did very good work [...]. The fact that the author has gone to the expense of printing the paper shows that he himself considers it as of much importance. I confess I am not prepared to endorse that opinion myself, but neither can I say that it may not be true.*

*[...]*

*Yours very truly,*

*G. G. Stokes”*

Despite this review, Reynolds’ paper was published and it is now seen as a landmark contribution to the field of fluid mechanics, and particularly to the research relating to the behavior of turbulent flows. In the paper, Reynolds proposed to take the Navier-Stokes equations as a starting point to derive equations for the evolution of the mean, or average, velocity field. Furthermore, he obtained equations for the evolution of the kinetic energy contained in the mean velocity field, and for the energy contained in the small fluctuating motions. Reynolds argued on the basis of these equations that a flow would be laminar if the energy contained in the small-scale motions does not increase, that is, if at least as much energy is dissipated due to friction (viscosity) as is transported from the

large to the small motions. For a flow between two parallel plates, he then shows that laminar flow can be expected for all Reynolds numbers less than 517.

This result is not currently seen as the most important result of that paper. The procedure in which the velocity field is decomposed into a mean and a fluctuating part is. It is now referred to as Reynolds averaging. Although in a slightly modified form, it constitutes the basis for modern simulation techniques like the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) approach and large-eddy simulation (LES). There, one of the chief problems is that the evolution of the mean velocity field, or of the larger scales of motion within a flow, is not independent of what happens on small scales. But that’s a story I’ll leave for some other time.

## Conclusions

During his life, Osborne Reynolds made very important contributions to the understanding of turbulent flows. In the current article we looked at his experimental work, in which he discovered a single dimensionless quantity that characterizes flow behavior as laminar or turbulent - although disturbances caused by initial and boundary conditions play an important role also. In the theoretical paper we subsequently discussed, Reynolds aimed to find an explanation for his observations. Although that goal may not have been reached, he did provide the basis for simulation techniques used in modern turbulence research. Furthermore Reynolds addressed a few fundamental questions relating to the mechanisms behind and the causes of turbulence, some of which have still not been fully answered today •

## References

- [1] Jackson, D. and Launder, B. (2007), Annu. Rev. Fluid Mech. 39, 19-35
- [2] Reynolds, O. (1883), Phil. Trans. R. Soc. Lond. 174, 935-982, <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/174/935>
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=UbAfvaYr00>
- [4] Reynolds, O. (1895), Phil. Trans. R. Soc. Lond. 186, 123-164, <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/186/123>

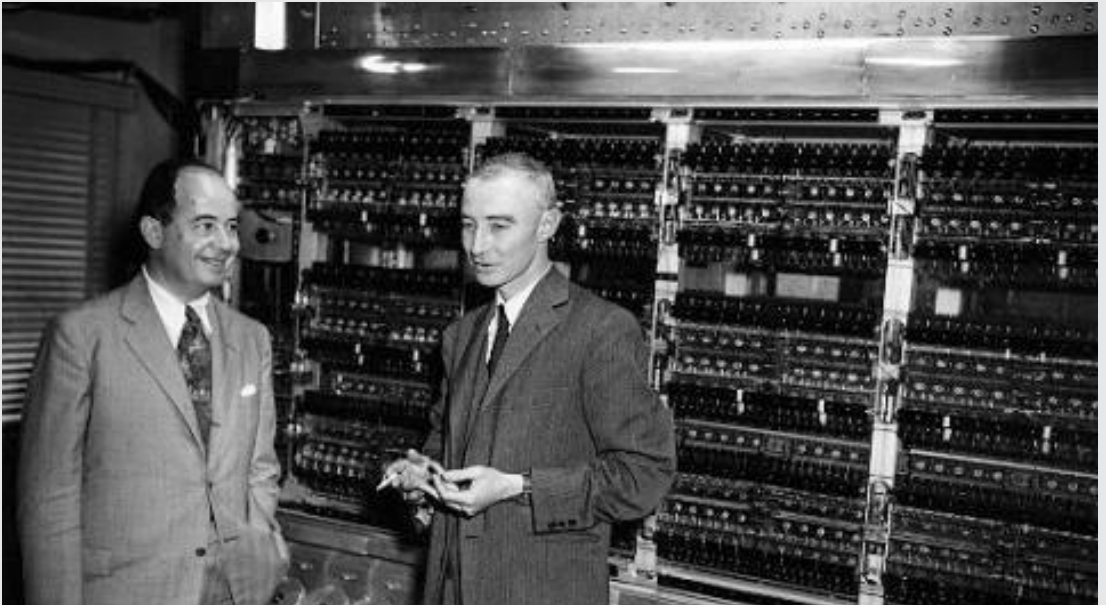
# Computing beyond Moore's law

BY BRUNO CARPENTIERI

In my research as an applied mathematician, I develop numerical linear algebra methods for solving applied computational science problems. In this article, I outline how recent developments in high-performance computing are radically changing the way we do numerics.

All of us, whether we are supercomputing experts, big data analysts, or just use some computing technology occasionally for surfing the web, social networking, listening to music, and storing photos in the cloud, are using the same basic technology that was developed during the second world war for building nuclear weapons. The origins of computing are in the Manhattan project that designed bombs from 1942 to 1946 at the Los Alamos laboratory, directed by Julius Robert Oppenheimer, and the work done in England by Alan Mathison Turing on crypto analysis for breaking German ciphers, enabling the Allies to defeat the Nazis in crucial encounters.

In sixty years of computing we went from the bomb to the cloud, using electronic digital computers built on semiconductor technology and integrated circuits described in 1945 by the mathematician and physicist John von Neumann, with some technological innovation. For an incredibly long time we could get exponential performance growth from von Neumann architectures thanks to Moore's law. This is the reason for this remarkable longevity. In 1975, Gordon Moore, co-founder of the Intel Corporation, predicted a doubling in the number of transistors in a dense integrated circuit approximately every two years. His prediction has proved to be accurate to date. Com-

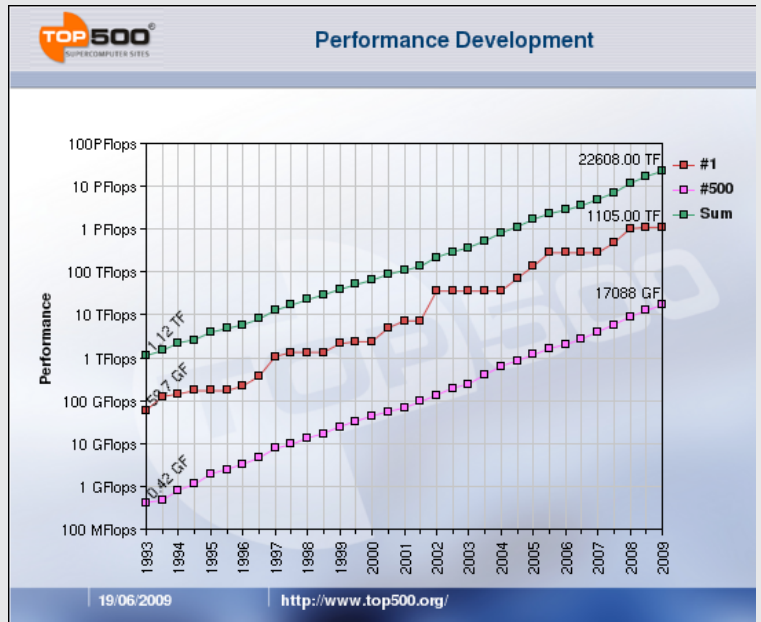


**FIGURE 1** Julius Robert Oppenheimer and John von Neumann in front of MANIAC, the first digital computer, at the Institute for Advanced Study, Princeton, 1952.

puters became faster and faster over the years, and we never had to rethink the original von Neumann model.

In 2008, we entered the petascale era. The IBM Roadrunner was the first supercomputer in the world to hit petascale speed, a million billion floating point operations per second. Today petaflops computing is a fully established technology, counting 50 machines in the top 500 supercomputing list <http://www.top500.org/>. Meanwhile, high-performance computing (HPC) has become a thriving business, with the United States and China engaged in a compelling ride to build ever-larger and ever-more-powerful systems, Europe establishing a Partnership for Advanced Computing in Europe (PRACE) to enable high impact scientific discovery and engineering research and development in the field of HPC, and other countries such as Japan and new emerging markets approaching it fast.

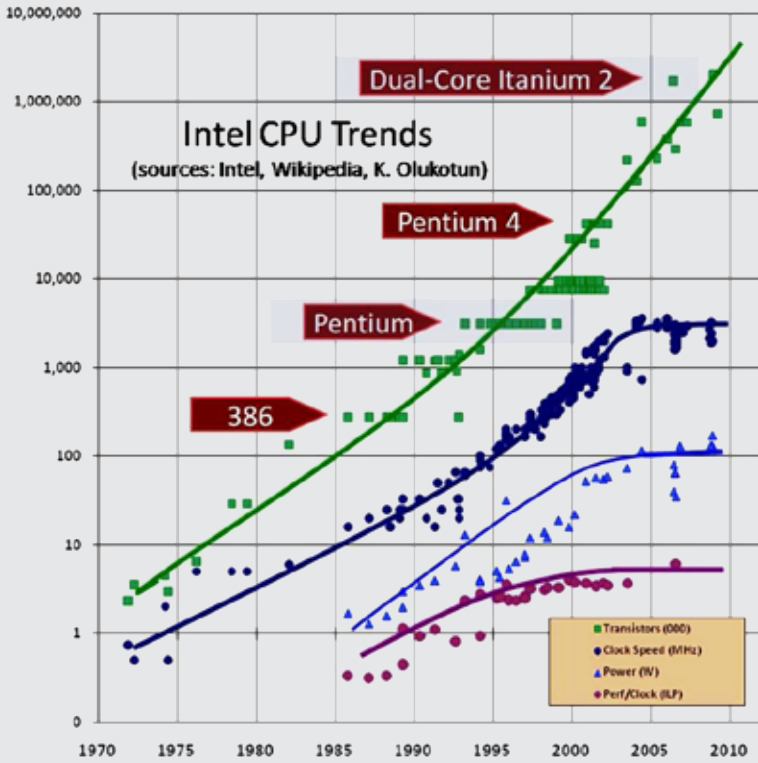
Why do we need this level of computing power? The benefits reach virtually every sector of science, from energy to life science, to health, the environment, industrial manufacturing, information technology, and even entertainment. Petascale computing may open up unprecedented opportunities for research in computational science, promising discoveries at scale which can provide tangible benefits for science and society, enhance national security, and leverage economic competitiveness.



**FIGURE 2** Development of supercomputer performance according to the top-500 list <http://www.top500.org/>.

*“Petascale computing may open up unprecedented opportunities for research in computational science.”*

The next big thing in supercomputing is to develop useful exascale-class machines that are hundreds of times faster than the current top-class supercomputers. The cost of building an exascale-class system by, say, 2020 is estimated at about US\$ 200 million for the actual machine, with the cost of operating such a system put at US\$ 400 million per year as this technology would lead to systems with 100 MW or more power requirements. Due to the problems of power consumption and the stagnation of government funding with a consequent lack of investment and competition, several indicators predict that we will soon hit the end of Moore’s law. We may need better technologies and, probably for the first time, to restructure the von Neumann architecture substantially; nowadays, two new technologies in particular, quantum computing and neuromorphic



**FIGURE 3** Intel CPU introductions by clock speed and number of transistors.

computing, are given due consideration. Light will not get any faster, and clearly, exponential growth cannot continue forever before we reach the limits of physics [1].

Figure 3 graphs the history of Intel chip (CPU) introductions by clock speed and number of transistors. We see that the number of transistors has continued to rise over the years. However, around the beginning of 2003, a sharp flattening appears in the previous trend toward ever-faster CPU clock speeds. It has become harder and harder to produce faster processors due to too much heat, too high power consumption, and current leakage problems. On Intel chips, we reached 2GHz in August 2001. According to CPU trends before 2003, we should have seen the first 10GHz chips in early 2005. Today, the clock speed on the fastest Intel Core (i7-4790K) is around 4GHz. The clock race is

over, at least for now. And that puts us at a fundamental turning point in software development.

### The free performance lunch is over

For around 30 years we have left computer architecture alone, and the same with written software. Computer vendors achieved performance gains by increasing the clock speed (doing the same work faster), optimizing execution flow (doing more work per CPU cycle), and increasing the size of the on-chip cache memory (data closer to the processor is much faster to access than the slow main memory). Speed-ups in any of these areas accelerated both non-parallel and parallel codes almost automatically, by simply recompiling the application on the new

machine to take advantage of the latest generation CPUs. That was a nice technological world to live in. Unfortunately, that world has already disappeared.

The new performance drivers are termed hyperthreading, multicore, and cache. Only one of these, cache, is the same as in the past. Hyperthreading enables us to run more instructions in parallel inside a single CPU and may offer a 5%-15% performance boost, sometimes more. Multicore means running two or more actual processors on one chip. The Intel Xeon Phi coprocessor architecture can have 60+ cores on a single slab of silicon; this means that a single-threaded application can exploit only 1/60 of Intel Xeon Phi's potential throughput. On-die cache sizes will continue to grow in the near future, and all application software can benefit vastly from it because accessing the main memory is typically 10 to 50 times slower than re-

trieving the same data from the cache: cache is speed on modern machines.

The free performance lunch is over. Petascale supercomputing can run hundreds of thousands of simultaneous processes, regardless of processor technology. If we want our application to benefit from the continued performance growth, it will need to exploit a high degree of concurrency. After object-oriented programming, concurrency may be considered the next major revolution in software development. It is not a new concept in computer science; the daunting levels of concurrency required on today's petascale systems is radically new.

Nothing on the horizon indicates that writing performant software for the next generation of parallel machines will get easier. Concurrent programming may have a steep learning curve, systems can be heterogeneous architectures with different parallel programming models that require a significant level of understanding of the hardware to optimize performance. Today's programming languages do not yet offer a higher-level programming model for concurrency. Additionally, not all problems are inherently parallelizable. It takes one woman nine months to produce a baby, but nine women cannot produce one baby in one month. However, if the goal is to produce many children, the human baby problem is an ideally parallelizable problem. We may need to redefine the goals when we parallelize software. The good news is that for many classes of applications the extra effort is worthwhile in terms of performance gains. But what does this matter to mathematics?

### Petascale algorithms and applications

Computational science, the scientific investigation of physical processes through modelling and simulation on computers, which may be considered the third pil-

lar of science complementing theory and experimenting, is built upon the problems of continuous mathematics involving real or complex variables. Numerical analysis is the field of mathematics that designs and analyzes algorithms for solving such problems. Much computation in numerical analysis depends on linear algebra problems, such as solving systems of linear equations and least squares problems, computing eigenvalues and singular values of matrices. Take an integral or a partial differential equation, make it discrete, work with vectors and matrices. These problems arise so often in engineering and scientific practice that they occupied the minds of many mathematicians of the last century, from von Neumann to Turing. Without efficient numerical methods, computational science and engineering as practiced today would slow down sharply and maybe quickly halt.

Real and complex numbers cannot be represented exactly on computers. Approximation of quantities (numbers, functions, etc.) and rounding errors are an important part of the business of numerical analysis. To understand Gaussian elimination for solving linear systems, it is necessary to know floating point arithmetic, propagation of rounding errors,

and the concepts of stability, conditioning, and backward error analysis. For example, Gaussian elimination with partial pivoting has very intricate stability properties. For some special  $n \times n$  matrices, the algorithm is explosively unstable and useless as it amplifies rounding errors by a factor of order  $2^n$ . However, for all practical problems it is backwardly stable; it finds the true solution to a nearby problem. In fifty years of matrix computation, no problems that excite such an explosive instability are known to have arisen under natural circumstances [2]. John von Neumann's paper on the complicated stability properties of Gaussian elimination in finite precision arithmetic is considered the first modern paper in numerical analysis.

*“If the goal is to produce many children, the human baby problem is an ideally parallelizable problem.”*

Linear systems are somehow exceptional, because most other problems in numerical analysis cannot be solved exactly by a finite algorithm, even working in exact arithmetic. Abel and Galois showed that no finite algorithm can compute eigenvalues of matrices having a size bigger than  $4 \times 4$ . The same conclusion extends to problems that include a nonlinear term or a derivative, e.g. root finding, differential and integral equations, quadrature, optimization problems. The aim is to find a fast and convergent algorithm. Hence, numerical analysis is concerned with rounding errors and also with all the different kinds of approximations errors such as iteration, truncation, and discretization errors. All of this work is applied successfully every day to solving thousands of challenging real-world problems.

Some years ago the discussion would have stopped at this point. However, the algorithms of numerical analysis are implemented on computers, and the characteristic of the machine plays an important role. The recent development in high-performance computing is radically changing the way we do numerics as applied mathematicians. The gaps between fast and slow algorithms are rapidly growing. Nowadays, there is often evidence that an infinite algorithm is better than a finite algorithm, even if the latter exists for a given problem. Infinite iterative methods for linear systems are more and more appealing to use than finite direct methods as computers become faster, matrices grow larger and very sparse, because we are solving three-dimensional problems, and the cubic computational cost of conventional Gaussian elimination is no longer affordable. The faster the computer, the more important the speed of algorithms. Multigrid methods and Krylov subspace methods with preconditioning are based on the idea of infinite iteration. They are considered two of the most important developments in numerical computation in the last twenty years. The class of Krylov subspace methods in particular is listed as one of the top ten algorithms of the 20th century because of

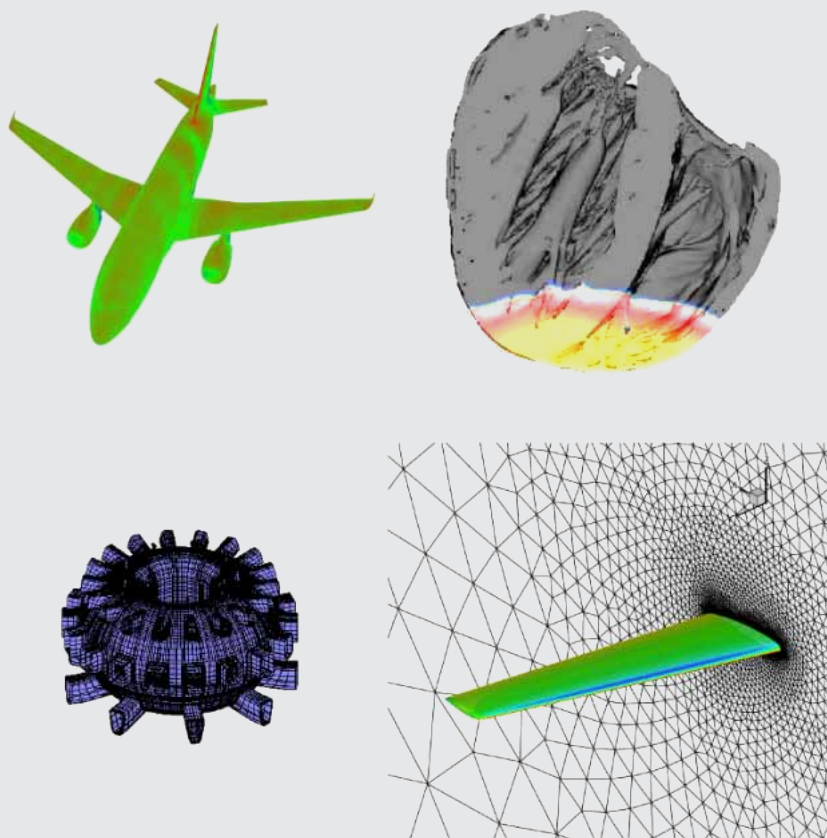
*“Trends indicate that opportunities in this field will continue to grow.”*

their great influence on the development and practice of science and engineering in the 20th century. Another famous example arises in linear programming. Linear programming problems are mathematically finite. For decades people solved them by the simplex method, which is a finite algorithm, until in 1984, Karmarkar showed that iterative algorithms are sometimes better.

We will be solving much bigger problems. Methods that do more operations per grid node, cell or element naturally will be preferred to more traditional and established techniques (e.g. higher-order discretization schemes, spectral element methods, discontinuous Galerkin discretization against conventional finite element discretization schemes). Novel classes of highly parallel numerical methods will need to be found. Structured data (e.g. regular Cartesian grids) are already coming back, as they may achieve better load balance than unstructured grids on computers with hundreds of thousands of processors. Only algorithms with linear or almost linear complexity will be of interest, as their computational cost for the solution increases linearly

with respect to the number of unknowns, which is expected to grow very large in the future. The numerical discretization of partial differential equations typically leads to large and sparse linear systems, whose solution may take up to 90-95% of the whole simulation time. Very few sparse matrix solvers scale efficiently on a very large number of processors. The development of new techniques in this area of research, alongside their efficient parallelization, will receive a growing interest in the coming years.

The use of more powerful (but also more complex) computing facilities should help in the search for additional speed, but this will also mean there will be even more factors that need to be considered when attempting to identify the optimal solution approach in the future. This emphasizes the continuing need for close cooperation between experimental physicists,



**FIGURE 4** Examples of computational science problems from the author's research in electromagnetics, electrophysiology, fusion research, and fluid dynamics applications.

mathematicians, and computer scientists since it is very unlikely that any one person will be able to acquire all of the necessary skills. The rising skills gap in computational science has implications for both scientists, and also for the company that needs these skills, which sometimes by necessity have to hire candidates from outside the specific application domain. Examples come from finance, oil, pharma, and aerospace research, to name but a few [3, 4]. There are jobs for students in computational science and engineering who have a compelling interest in high performance computing and numerical analysis. Trends indicate that opportunities in this field will continue to grow •

## References

- [1] H. Simon. Why we need exascale and why we won't get there by 2020. In AASTCS 2: Exascale Radio Astronomy Meeting Monterey, California, 2014.
- [2] L.N. Trefethen and David Bau, III. Numerical Linear Algebra. SIAM Book, Philadelphia, 1997.
- [3] R. Bordas, B. Carpentieri, G. Fotia, F. Maggio, R. Nobes, J. Pitt-Francis, and J. Southern. Simulation of cardiac electrophysiology on next-generation high-performance computers. *Physiol. Trans. A*, 367(1895):1951-1969, 2009.
- [4] B. Carpentieri, I.S. Duff, L. Giraud, and G. Sylvand. Combining fast multipole techniques and an approximate inverse preconditioner for large electromagnetism calculations. *SIAM J. Scientific Computing*, 27(3):774-792, 2005.



## Judie Ibrahim

Student Aviation Studies,  
Hogeschool van Amsterdam, 23 jaar

"Toen ik op zoek was naar een stage heb ik veel bedrijven aangeschreven, van drie bedrijven kreeg ik een aanbieding. Ik koos voor Thales omdat het een internationaal georiënteerd bedrijf is met meer dan 85% export. Tijdens mijn opdracht bij Thales hield ik mij bezig met het analyseren van het kostprijscalculatie proces en onderzocht ik waar dat mogelijk te verbeteren. Aangezien ik bij Aviation Studies mij vooral bezig houd met techniek zocht ik juist een stage waar ik mij bezig kon houden met bedrijfskundige processen. Het onderwerp van de opdracht bij Thales was mij onbekend, maar juist daarom wilde ik ermee aan de slag en zag ik het als een uitdaging.

Ik ben van mening dat je met een oprechte interesse theorie wel eigen kunt maken. Toen ik bij Thales aan de slag ging was ik verrast over de open cultuur. Je kunt iedereen aanspreken en er wordt tijd voor je vrijgemaakt om je verder te helpen. Als je zelf initiatief neemt dan liggen er veel kansen. Na mijn advies te hebben geïmplementeerd ben ik van plan om in september te beginnen met een de Master Business Administration aan de UvA in Amsterdam.

Ik denk dat dat de combinatie van een technische Bachelor met een Bedrijfskundige master je helpt om met twee verschillende brillen naar oplossingen te zoeken. Ik onderhoud contact met mijn stagebegeleider en hoop dat ik na mijn master bij Thales aan de slag kan."

"Als student is je grootste angst dat je afstudeeronderzoek in een lade verdwijnt. Bij Thales word je echt serieus genomen en is er vertrouwen in je. Zo wordt mijn advies omtrent een nieuwe methode van kostencalculatie zelfs in 2016 geïmplementeerd."

**Op zoek naar een stage, af  
Start jouw carrière bij Thales. K**



“Tijdens mijn studie was ik mij al aan het oriënteren op de arbeidsmarkt. Ik was op zoek naar een technisch bedrijf met een interessant product waar ik mijn natuurkunde achtergrond zou kunnen inzetten. Op de BètaBedrijvenBeurs in Nijmegen kwam ik in gesprek met een recruiter van Thales. Zij nodigde me uit op het hoofdkantoor om samen de mogelijkheden bij Thales te bespreken. Eén van de vacatures sprong er voor mij meteen uit, namelijk die voor de functie van Trial Conductor. Hiernaar heb ik gesolliciteerd en na een paar gesprekken werd ik aangenomen. Inmiddels werk ik al een paar maanden met veel plezier bij Thales.

Als Trial Conductor bouw ik voort op de tijdens mijn studie opgedane kennis. Regelmatig zal ik met een team naar het buitenland gaan om onze radarsystemen op marineschepen te testen. Daar laten we op zee aan de klant zien dat het systeem inderdaad zo goed is als beloofd in het contract. Dit doen we door middel van allerlei scenario's. Zo laten we bijvoorbeeld een F-16 invliegen om te zien wanneer de radar deze voor het eerst detecteert.

Tijdens mijn sollicitatie kreeg ik ook een aanbod van een ander technisch bedrijf, maar de goede sfeer bij Thales was voor mij doorslaggevend. De mensen hier zijn erg behulpzaam en nemen de tijd om je iets uit te leggen. Thales voldoet zeker aan het beeld dat ik ervan had: een high tech bedrijf met een fijne werksfeer.”

**“Als Trial Conductor bouw ik voort op de tijdens mijn studie opgedane kennis. Regelmatig zal ik met een team naar het buitenland gaan om onze radarsystemen op marineschepen te testen.”**



## **Annelot Schuring**

Afgestudeerd in Natuurkunde,  
Radboud Universiteit Nijmegen, 24 jaar

**studeerplek of eerste baan?**  
**ijk op [www.thalesgroup.com/nl](http://www.thalesgroup.com/nl)**

# Waterstofproducerende zonnecel

DOOR MATTHIJS BERGHUIS

In de luchtsluis hul je je in een stofvrije overall en stap je een ruimte binnen vol brommende ventilatoren en vacuümpompen. Allemaal met als doel de ruimte stofvrij te houden. Er worden in deze cleanroom zonnecellen gemaakt van slechts 100 nm dik. Laagje voor laagje wordt met veel precisie een oplossing van quantum dots en polymeren op een elektrode aangebracht. Eén stofdeeltje kan al kortsluiting van de zonnecel veroorzaken.

**D**oor een oppervlak ter grootte van Duitsland in de Sahara te bedekken met zonnecellen met een rendement van 20% zal er genoeg energie worden opgewekt om het huidige energiegebruik van de mensheid te dekken (bron 3). Zonne-energie is daarmee de groene energiebron met de hoogste potentiële capaciteit, en speelt daarom een belangrijke rol in de transitie naar een groenere energiemarkt.

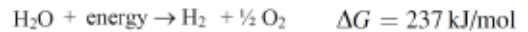
Dat het noodzakelijk is om over te stappen van fossiele naar hernieuwbare energie zal voor niemand nieuw zijn. De wereldbevolking neemt toe en wordt welvarender, wat leidt tot een hogere vraag naar energie. Daarbij zullen fossiele brandstoffen zoals olie, kolen en gas op den duur uitgeput raken. Maar meest belangrijk, op deze voet doorgaan met het uitstoten van CO<sub>2</sub> zal grote gevolgen hebben voor het klimaat. De belangrijkste zijn: temperatuurstijging, met als gevolg, het smelten van de poolkappen waardoor de zeespiegel zal stijgen en heftigere weersomstandigheden, waardoor er in natte regio's meer overstromingen zullen zijn en in droge gebieden meer droogtes.

Sinds de industriële revolutie is de CO<sub>2</sub>-concentratie gestegen van 280 naar 398 ppm, waarvan 75 ppm in de afgelopen 50 jaar, een stijging tot boven 450 ppm zal niet terug te draaien gevolgen hebben (bron 3). Om dit te voorkomen zal de overgang naar groene energie, met als belangrijk onderdeel zonne-energie, sneller moeten verlopen.

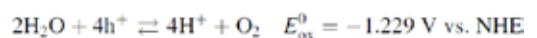
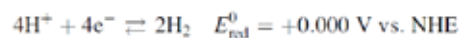
## Opslag van zonne-energie

Omdat de zon niet constant schijnt zal een energiemarkt die grotendeels op zonne-energie leunt een

oplossing moeten hebben om 's nachts en gedurende bewolkte dagen toch voldoende energie te kunnen leveren. Het aanleggen van een groot stroomnetwerk, zodat een tijdelijk tekort aan zonne-energie in bijvoorbeeld Frankrijk kan worden opgevangen door een overschot in Duitsland, kan het probleem gedeeltelijk opvangen. Om ook 's nachts stroom te hebben zal het noodzakelijk zijn om stroom op te kunnen slaan. Een goede energiedrager is waterstof, het heeft een zeer hoge energiedichtheid per massa, is relatief gemakkelijk uit water te produceren en er is meer dan genoeg capaciteit op aarde aanwezig.



Het produceren van waterstof gaat door middel van elektrolyse. Als er via twee elektrodes een spanning van meer dan 1,23 V op het water wordt gezet zal de reactie van water naar waterstof en zuurstof verlopen. Op de positieve elektrode zal het zuurstof vormen en op de negatieve de waterstof (zoals weergegeven in de onderstaande halfreacties). Hoe hoger de spanning over de elektroden, hoe sneller de reactie zal verlopen. Om op grote schaal waterstof te produceren, wordt een hoge overspanning gebruikt om een hoge stroomdichtheid te creëren. Bij een toegepaste spanning van 1,6 V, is de maximale efficiëntie van de waterstofproductie  $1,23/1,6 = 0,77$ . Om een hoger rendement te halen zal een lagere spanning gebruikt kunnen worden, maar dat betekent ook een lagere stroomdichtheid. Om dan toch voldoende waterstof te produceren zijn elektrodes met een groot oppervlak nodig, en dit is vaak te duur.



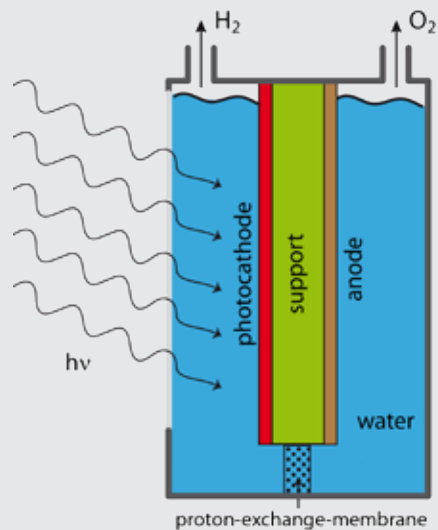
Echter, zonnecellen hebben altijd een groot oppervlak omdat ze veel licht moeten opvangen. Door de elektronen in de zonnecel direct te gebruiken voor het splitsen van water in plaats van het in een stroom om te zetten en vervolgens in een aparte opstelling voor elektrolyse het water te splitsen, kan een lage overspanning en een lage stroomdichtheid op een groot oppervlak toch eenzelfde hoeveelheid waterstof produceren als met een hoge overspanning op een klein oppervlak. Het verlies bij de lage overspanning is echter lager. Dit is de reden om onderzoek te doen naar zonnecellen die het licht direct omzetten in het splitsen van water.

Ik zal eerst wat vertellen over zonnecellen in het algemeen, en daarna over de zonnecellen gebruikt voor het splitsen van water.

## Zonnecellen

Er zijn drie belangrijke eigenschappen waar een zonnecel aan moeten voldoen. Ten eerste moet er licht geabsorbeerd worden, het geabsorbeerde licht zal een geëxciteerd elektron tot gevolg hebben en een gat achterlaten. Dit geëxciteerde elektron mag vervolgens niet terugvallen naar de positie van de lage energie, maar zal los moeten komen van het ontstane gat. Ten derde moet het elektron, voordat het de kans heeft terug te vallen, de juiste elektrode zien te bereiken. Een voorbeeld van dit proces is te zien in figuur 2. Hoe groter de efficiëntie van deze drie processen, hoe hoger het rendement van de zonnecel.

Silicium blijkt als halfgeleider een geschikte kandidaat voor toepassing in zonnecellen. Op dit moment nemen siliciumzonnecellen 90% van de fotovoltaïsche energie voor hun rekening. Hoewel silicium, in de vorm van siliciumoxiden, een van de meest voorkomende elementen is, vergt het productieproces van zuivere siliciumkristallen uit siliciumoxide veel energie en het proces is daarom relatief duur. Daarom is het nuttig om naar goedkopere alternatieven te zoeken. Andere materialen die ook de geschikte eigenschappen voor toepassing in zonnecellen hebben zijn: organische molecu-

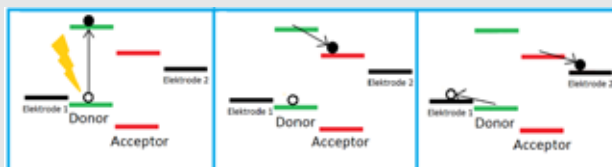


**FIGUUR 1** Een chematische weergave van een watersplitsende zonnecel. Op de kathode zal het waterstofgas ontstaan, rechts, op de anode het zuurstof.

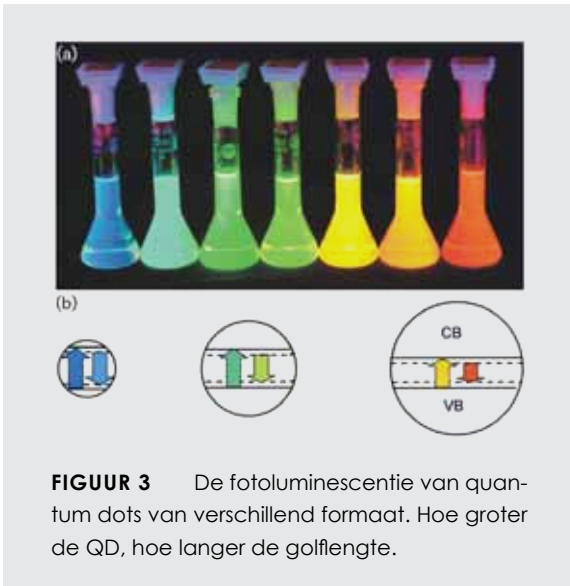
len zoals PCBM en P3HT, sommige perovskites en quantum dots. Het gebruik van dit soort materialen kan de productiekosten van zonnecellen aanzienlijk verlagen.

## Alternatieve materialen

Een nieuw materiaal dat gebruikt wordt voor het maken van zonnecellen is quantum dots (QD). Quantum dots zijn kleine kristallen met een afmeting van enkele nanometers. Door de beperkte afmetingen



**FIGUUR 2** Een voorbeeld van de drie essentiële processen in een zonnecel. Links het opvangen van het licht, in het midden het scheiden van de lading en rechts het transport van de lading naar de elektrodes.



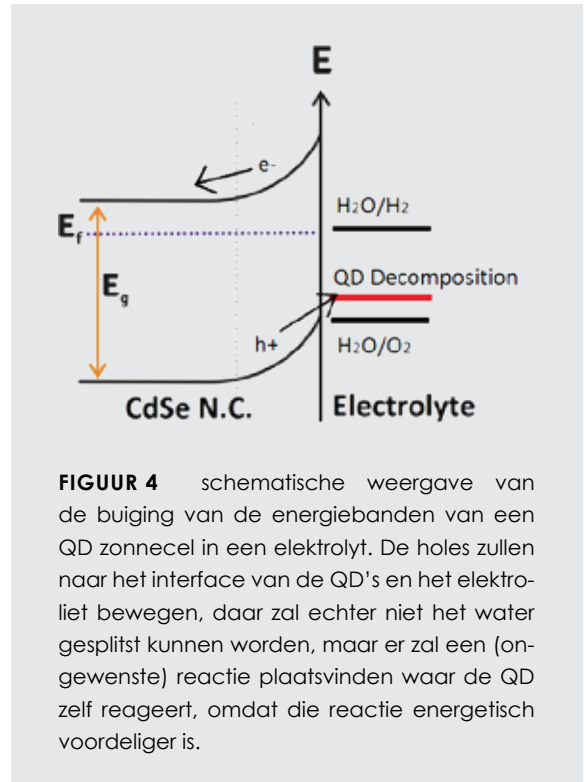
**FIGUUR 3** De fotoluminescentie van quantum dots van verschillend formaat. Hoe groter de QD, hoe langer de golflengte.

gaan kwantumeffecten een rol spelen en hebben de kristallen andere eigenschappen dan het bulkmateriaal. Door de grootte van deze kristallen te variëren, verandert de bandkloof en daarmee de eigenschappen voor de lichtabsorptie (figuur 3).

Eén van de grootste voordelen van beide materialen is dat de absorptiecoëfficiënt van licht heel hoog is. Dit heeft tot gevolg dat de zonnecel zeer dun gemaakt kan worden en toch veel licht kan opnemen. Hoe dunner de zonnecel hoe minder materiaal er gebruikt is, waardoor de totale kosten voor de grondstoffen van de zonnecel veel lager zijn. Een silicium zonnecel heeft een dikte van zo'n 100 micrometer, de QD zonnecel heeft een optimale dikte van ongeveer 100 nm. Dit scheelt factor 1000.

Er zijn echter ook nadelen aan de quantum dots, hoewel ze een hogere geleidbaarheid hebben dan organische moleculen, is hun geleidbaarheid veel lager dan dat van bijvoorbeeld silicium. Dit betekent dat de ladingsdragers (de elektronen en gaten) er langer over doen om de elektrode te bereiken. Daardoor is de kans dat de elektronen hun energie verliezen groter.

De efficiëntie van QD-zonnecellen kan nog niet tippen aan dat van een siliciumcel. De beste QD-zonnecel van loodsulfide (PbS) heeft een rendement van ongeveer 9%.

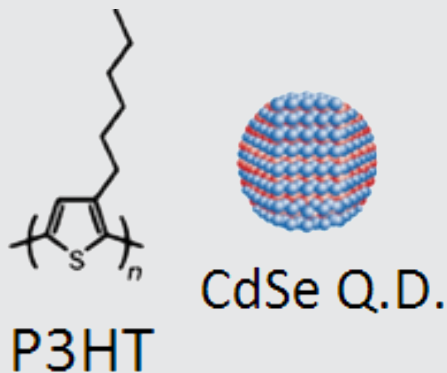


**FIGUUR 4** schematische weergave van de buiging van de energiebanden van een QD zonnecel in een elektrolyt. De holes zullen naar het interface van de QD's en het elektrolyt bewegen, daar zal echter niet het water gesplitst kunnen worden, maar er zal een (ongewenste) reactie plaatsvinden waar de QD zelf reageert, omdat die reactie energetisch voordeliger is.

## Watersplijtende zonnecel

Voor het splitsen van water is een hoog voltage nodig, minstens 1,23 V. Een siliciumzonnecel levert ongeveer 0,5 V, veel te weinig dus. Het is mogelijk om drie siliciumcellen in serie te schakelen, maar het zou gemakkelijker zijn om een materiaal te vinden dat direct deze hogere spanning kan leveren. Een geschikt materiaal hiervoor zijn nanokristallen van cadmiumselenide. Met een bandkloof van ongeveer 2 eV, bijna twee keer zo hoog als silicium, kan het veel dichterbij de buurt komen van de potentiaal die nodig is om water te splitsen. Als op zowel de positieve als de negatieve elektrode een fotoactieve laag wordt bevestigd (zoals in figuur 1), tellen de voltages op en wordt het potentiaal voor het splitsen van water eenvoudig bereikt.

Een watersplijtende zonnecel van alleen QD's zou er schematisch zo uit zien als in figuur 4. Doordat het CdSe een n-type materiaal is, buigen de valentie- en de geleidingsbanden naar boven. Hierdoor hebben de elektronen de neiging om van de interface met de elektrolyt af te gaan en de gaten trekken er juist naar toe. Dit zou een werkende zonnecel kunnen zijn waar



**FIGUUR 5** schematische weergave van de twee grondstoffen van de zonnecel. De polymeer P3HT en het nanokristal CdSe.

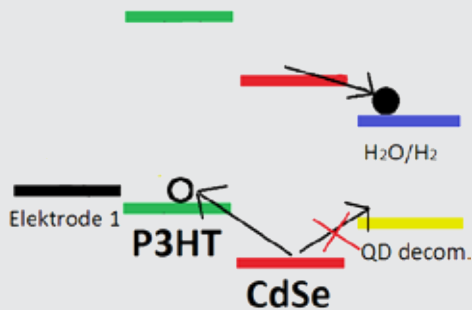
op het oppervlak van de cel water tot waterstof en zuurstof gesplitst zou worden. Echter, de decompositiereactie van de QD's is energetisch voordeliger dan het splitsen van het water tot zuurstof, waardoor de cel volledig onstabiel is.

Door het toevoegen van P3HT aan de QD oplossing voordat deze op de elektrodes worden aangebracht, mengen beide stoffen. Dit mengsel heeft, eenmaal op de elektrode aangebracht, een aantal eigenschappen die sterk verschillen van de cel van alleen QD's. Een verschil is dat, doordat de QD's overal vlak naast de polymeren liggen, de gaten in de CdSe direct opgevuld kunnen worden met elektronen uit de polymeer. Omdat deze overgang veel sneller is dan de decompositiereactie, zal de decompositiereactie niet meer plaats vinden waardoor de zonnecel stabiel zal zijn (figuur 6).

Een ander verschil is dat de banden in het materiaal niet buigen waardoor de zonnecel niet als een fotoanode maar als een fotokathode werkt. Op de elektrode zal dus de halfreactie naar waterstof, en niet de halfreactie naar zuurstof plaatsvinden (figuur 6).

## Conclusie

Op deze manier is het gelukt om een werkende fotokathode te maken die een hoge spanning uit zichzelf kan leveren van bijna 1 V. Om een volledige zonnecel te maken, zal er ook een fotoanode aan deze kathode



**FIGUUR 6** Doordat de QD's gemengd worden met de polymeer ontstaat een nieuwe morfologie. De twee belangrijkste verandering zijn dat de energieniveaus geen buiging meer vertonen, waardoor er op de cel waterstof zal vormen in plaats van zuurstof. Het tweede is dat de gaten in de CdSe QD's niet langer gebruikt kunnen worden voor de decompositiereactie maar direct worden opgevuld met elektronen uit de polymeer, wat een veel snellere reactie is.

moeten worden gekoppeld zodat het totale voltage boven de 1,23 volt uitkomt.

Daarnaast zal het rendement van de zonnecel nog veel omhoog moeten, dit kan bijvoorbeeld door een groter deel van het lichtspectrum te benutten. De zonnecellen kunnen voorlopig nog lang niet tippen aan de opbrengst van siliciumzonnecellen, maar omdat de kosten veel lager liggen zijn alternatieve materialen toch een interessante optie voor de toekomst •

## Referenties

- [1] [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_SPM.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf)
- [2] Light, Water, Hydrogen The Solar Generation of Hydrogen by Water Photoelectrolysis Craig A. Grimes, Oomman K. Vargh
- [3] Roel van de Krol | Michael Grätzel Editors Photoelectrochemical Hydrogen Production
- [4] <http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>
- [5] Roduner E. "Size matters: why nanomaterials are different", Chem. Soc. Rev., 35, pp. 583-592 (2006)
- [6] J. Am. Chem. Soc. 134, 5627-5636 (2012).

# French Baguettes

BY JOOP HENDRIKS

Last year I stopped working at a bakery where I baked every weekend and holiday for several years. After some time I was missing the baking somehow and wanted to try to make baguettes the way I learned it there. Although this is not a very culinary dish, as we find normally in the Perio\*diek, it is certainly challenging, considering you normally don't have professional machines at home.

## Ingredients

- 500g flour: don't use flour from the supermarket! It is fine for making pastry, but not for bread, as it is relatively low in gluten. Instead, try organic flour or order it (online) from a mill.
- 1 pack fresh yeast (available at Jumbo)
- Water
- Salt
- (Sunflower/Olive) oil

## Accessories

- Bowl
- Tea towel
- Pair of scales
- Oven with baking sheet or a pizza stone
- Optional but very useful: a dough scraper

## Preparation

Top tip: You really don't want your dough to stick to anything after the kneading. You can prevent this by creating a thin film of flour on your working surface, tea towel, etc.

Of course, when making baguettes, you want to do it the French way. This means that before baking, you have to make a pre-ferment or *poolish*, which improves the taste and preserves the qualities of the baguette. It is a good idea to make your poolish the evening before the day you want to bake, as it needs around 12 hours to develop. To do so, put 170ml cold water in a bowl

Difficulty:



Persons: 4

Preparation time: 17 hours, but you can sleep during most of that time!

and dissolve 1g (a small cube with sides of 6mm) of yeast in it. After the yeast is completely dissolved, add 170g flour and mix it until you have a homogeneous mixture. Cover the bowl with a lid or foil and let it stay at room temperature for the following 12 hours.

Once you wake up the next day and had your morning coffee or tea, you can start with making the final dough. First measure all the ingredients: 280g flour, 150ml lukewarm water, 7g salt and 4 to 5g of yeast (cube with sides of 1 cm) and make sure that the yeast is not in contact with the salt. First, put the water around the inside edge of the bowl where your developed poolish is in. Add all the other ingredients and mix everything with a spoon. After most of the ingredients are mixed, put some flour on your working surface and knead the dough 10 to 15 minutes. It will be very sticky in the beginning, but after some minutes this will improve. When you are done, grease the bowl with a minimum amount of oil, put the dough back in, cover it again and let it ferment for two hours. You can improve the elasticity of the dough by stretching the dough and folding it (fold to two thirds, repeat this for all four sides) after the first 30 minutes and put it back into the bowl. If the dough can be stretched without much resistance after this cycle, repeat the folding after another 30 minutes.



After the full two hours, divide the dough in four equal pieces and let it rest on your working surface while covered by a tea towel. After 15 minutes, it is time to shape your baguette. I recommend searching for “shaping baguette” on YouTube and watching one of the videos at the top which shows clearly how it should be done. Place the shaped baguettes, which should be 30 cm in length, in a draped tea towel and cover them.

After an hour or a bit more, the first two baguettes are ready to be baked for 25 minutes at 240°C. Carefully place two baguettes on a pre-heated baking sheet or pizza stone (I always use a piece of cardboard for this) and cut them with a very sharp knife (look for “scoring baguettes” on YouTube if you really want to

make the perfect cuts). Try to get steam in the oven by spraying some water in it after you have placed the baguettes in the oven and again after 3 minutes. This will give your baguette a lot more volume and hopefully the characteristic open structure, as you delay the forming of the crust. Once the baguettes have a good brown color and a nice crust, get them out of the oven and bake the other two in the same way.

Let the baguettes cool down before eating them, and bon appetit! •

## References

- [1] Hamelman, J (2012), *Bread: A baker's book of techniques and recipes*, 2nd edition, Wiley global education.

# Topological Memory

BY MAXIM MOSTOVOY

Magnetic skyrmion is a recently discovered topological defect with a beautiful spin structure. Its non-trivial topology gives rise to unusual transport phenomena. The emerging research field - skyrmionics - holds promise of fast and compact memory devices, in which information is encoded in skyrmions.

**T**opology is a relatively new area of mathematics which studies shapes and other properties of objects that do not depend on their size and are unaffected by continuous deformations. Topologically speaking, apples are not different from pears because their boundaries have the topology of a sphere. It is also said that a topologist cannot tell the difference

*“The building blocks of matter have a topological origin.”*

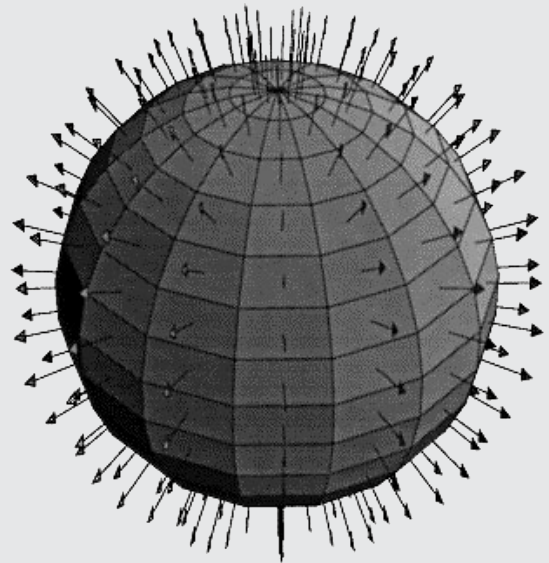
between a coffee mug and a doughnut, because both have the topology of a torus. The integral of the Gaussian curvature over the boundary of an object divided by  $2\pi$ , called Euler characteristic, provides an efficient way to distinguish surfaces of different topology. The result is 2 for a sphere, no matter how strongly deformed, and 0 for a torus.

The integer Euler characteristic is an example of topological invariant. Topological invariants, also known as topological charges, play an important role in quantum physics. They give rise to conservation laws that are insensitive to imperfections inevitably present in realistic systems and to details of interactions between particles. Physical observables related to topological charges can be expressed in terms of fundamental physical constants. An example is the magnetic flux of a vortex in a superconductor, which equals  $\pm hc/2e$ , where  $h$  is the Planck constant,  $c$  is the speed of light

and  $e$  is the electron charge. All vortices carry the same flux, no matter how dirty the superconductor is. Another example is the Hall conductivity of a two-dimensional electron gas, which is quantized in units of  $e^2/h$ . Unusual physical properties of excitations in quantum Hall systems and their insensitivity to noise may prove useful for quantum computing.

## Skyrmion

According to some theories, the building blocks of matter have topological origin. Even before quantum mechanics was invented, Lord Kelvin advanced a top-



**FIGURE 1** Baryon as a topological defect. Arrows indicate the direction of the static pion field.



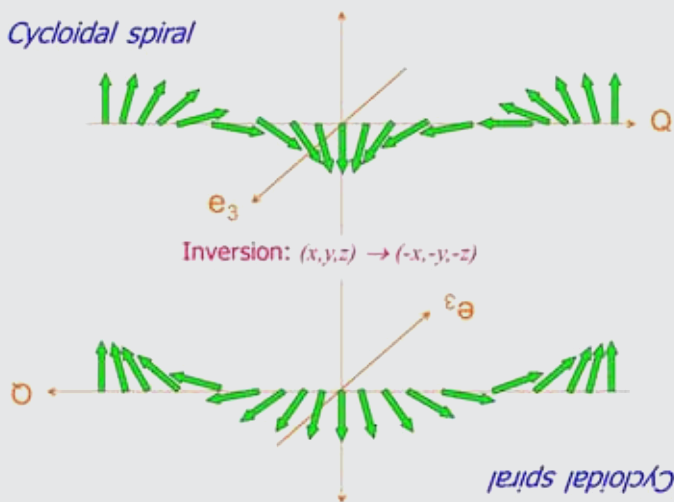
ological theory of atoms, according to which atoms are vortices produced by rotating ether. Hydrogen atom is a simple circular vortex loop. Heavier elements are loops tied into knots of different degrees of complexity.

In 1961, British particle physicist Tony Skyrme proposed a field theory which described in a unified way baryons, such as protons and neutrons, and pi-mesons (also called pions) which mediate interactions between baryons [1]. He considered a 4-component vector  $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3, n_4)$  which lives on the surface of 3-sphere:

$$n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 + n_4^2 = 1$$

The north pole of the sphere,  $n_4 = 1$ , is a vacuum and small oscillations of  $\mathbf{n}$  around the north pole, described by  $n_1, n_2$  and  $n_3$ , correspond to three charge states of pion particle. In Skyrme's theory, baryons are compact spherically symmetric defects. In the center of the defect,  $\mathbf{n}$  points in the south pole direction. As the distance  $r$  from the center increases,  $n_4(r)$  monotonously varies from  $-1$  to  $+1$ , while the 3-component vector  $(n_1, n_2, n_3)$  describing the static pion field always points in the radial direction (see Fig. 1). Such a hedgehog defect, called skyrmion, carries an integer topological charge, which Skyrme identified with the baryon number (proton and neutron have baryon number of  $+1$ ). The topological nature of skyrmions makes them stable. Since topological charge can only take integer values, it cannot smoothly decrease from  $1$  to  $0$ , which explains the

*“A hedgehog defect, called skyrmion, carries an integer topological charge.”*

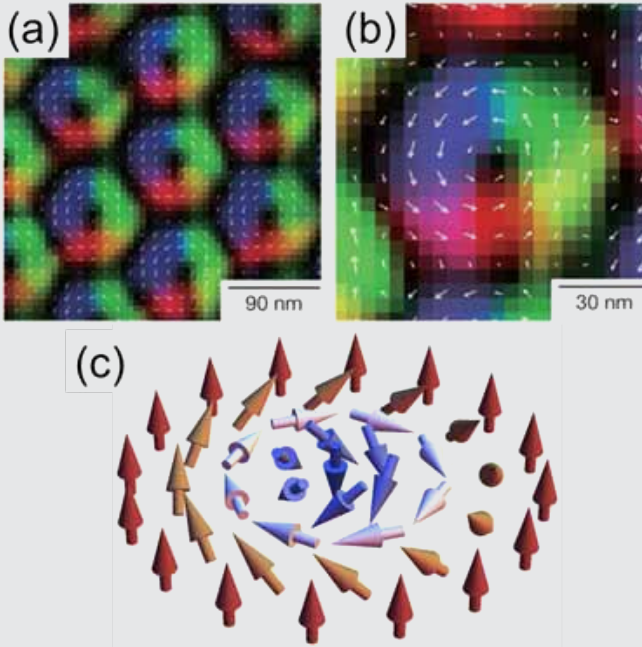


**FIGURE 2** Under inversion the spin  $\mathbf{S}(\mathbf{x})$  is replaced by  $\mathbf{S}(-\mathbf{x})$ . As a result, the direction of spin rotation in the spiral is reversed.

conservation of baryon number.

### Magnetic Skyrmion

25 years ago Bogdanov and Yablonskii suggested that similar topological defects can exist in magnets with a broken inversion symmetry [2]. Spatial inversion (parity transformation in particle physics) is the sign reversal of all spatial coordinates:  $\mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}$ . The inversion symmetry is broken if the inverted crystal lattice cannot be superimposed with the original one. Inversion symmetry breaking leads to many interesting effects, such as the rotation of the polarization of light propagating through a crystal, studied by Louis Pasteur, and the spiral magnetic ordering. Inversion changes the direction of spin rotation in a magnetic spiral (see Fig. 2). If the spins in a magnetic crystal form a left-rotating spiral, then the crystal with the inverted lattice will show a right-rotating spiral.



**FIGURE 3** Images of the skyrmion crystal (a) and a single skyrmion (b) in thin films of  $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$  obtained with Lorentz transmission electron microscopy [4]. This experimental technique is only sensitive to the in-plane component of magnetization. Black color inside/outside the skyrmion corresponds to the down/up magnetization, as shown in the artistic view of magnetic skyrmion (c).

*“It is quite remarkable that such complex magnetic defects as skyrmions can be realized in nature.”*

The microscopic mechanism which imprints the lack of inversion symmetry in crystal lattice into magnetic order, known as the Dzyaloshinskii-Moriya interaction, originates from the relativistic coupling between spin and orbital momentum of electron. Bogdanov and Yablonskii argued that the same mechanism can

stabilize magnetic skyrmions.

Recently Christian Pfleiderer and co-workers studied magnetic ordering in MnSi using the small angle neutron scattering. The cubic lattice of this material has no inversion center, which gives rise to a helical spiral order, with a long period of  $180 \text{ \AA}$ . They found that under an applied magnetic field the helical spiral transforms into a complex magnetic structure, which they identified with the triangular lattice of magnetic skyrmions [3]. Figures 3 a,b show images of the skyrmion crystal in another helimagnet  $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Si}$  obtained with Lorentz microscopy [4].

The magnetic skyrmion is a lower-dimensional version of the Skyrme’s hedgehog: it lives on a plane and is described by the unit vector  $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$  in the direction of magnetization. The north pole of the 2-sphere,  $n_3 = 1$ , is the ferromagnetic state induced by the magnetic field parallel to the  $z$ -axis. Small oscillations of the magnetization around the  $z$ -axis are spin waves (magnons). The magnetic skyrmion

shown in Fig. 3c is a topological defect in the uniform ferromagnetic state. The magnetization vector is opposite to the magnetic field in the center of the defect and parallel to the field outside the skyrmion. The in-plane magnetization winds around the skyrmion center like the current lines in a vortex. Magnetic skyrmion carries a nonzero topological charge,

$$Q = \frac{1}{4\pi} \int d^2x (\mathbf{n} \cdot \partial_x \mathbf{n} \times \partial_y \mathbf{n}),$$

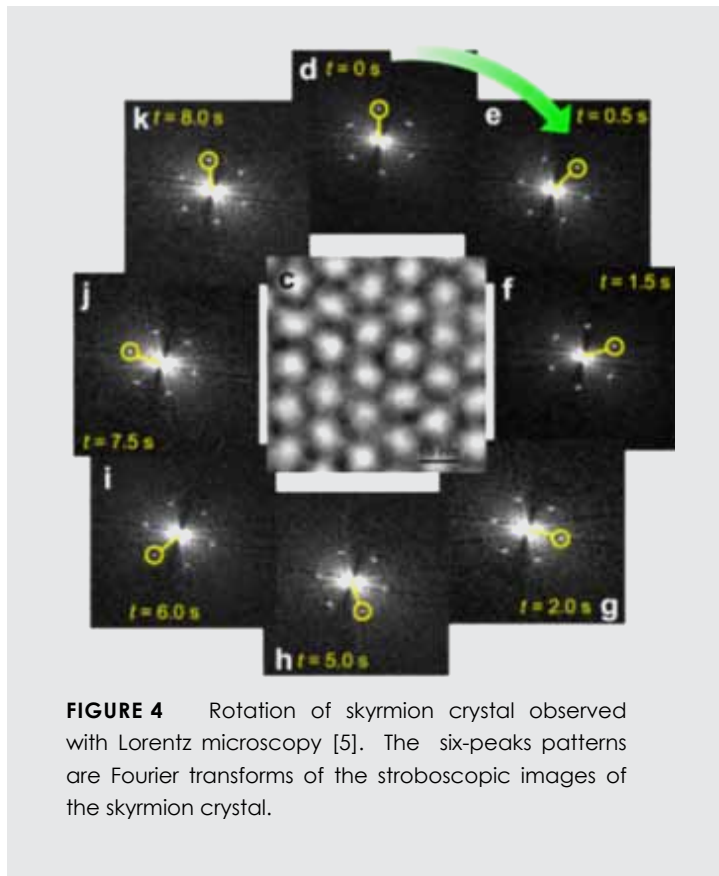
which counts how many times magnetization wraps

around the  $xy$ -plane. This integer charge is a measure of ‘knotiness’ of the defect. Skyrmions with  $Q = \pm 1$  are knots that cannot be untied, which makes them stable against the decay into magnons. In bulk materials two-dimensional skyrmions appear as cylinders parallel to the applied magnetic field, similar to vortex lines in superconductors.

### Topological Hall effect

It is quite remarkable that such complex magnetic defects as skyrmions can be realized in nature. But even more interesting is that the nontrivial topology of these defects gives rise to unusual physical phenomena. When an electron propagates through the skyrmion in a magnetic metal, its spin follows the direction of the magnetization in the skyrmion. As a result, the electron wave function acquires an additional phase (called Berry phase), which turns out to be equal to the phase an electron picks up when it moves in a magnetic field. In this way the skyrmion induces an ef-

fective magnetic field with the flux  $\Phi = Q\Phi_0$ , where  $Q = \pm 1$  is the topological charge and  $\Phi_0 = \frac{hc}{e}$  is the unit flux quantum (which is two times larger than the flux quantum in superconductors, where electrons form pairs). Tiny skyrmions in MnGe induce an effective magnetic field of 400 Tesla, which is 10 times larger than the static fields created by huge laboratory magnets. The effective field gives rise to the Lorentz force which results in the skew scattering of electrons off skyrmions. This so-called topological Hall effect is used to identify the skyrmion crystal phase in transport measurements. By Newton’s third law, the skew scattering of electrons exerts a reactive force on skyrmion in the direction transverse to the electric current, which is similar to the Magnus force acting on a vortex in a moving fluid. That does not mean, however, that skyrmion moves across the electric current. The skyrmion dynamics, like the dynamics of a vortex, is gyrotropic, i.e. under the applied



**FIGURE 4** Rotation of skyrmion crystal observed with Lorentz microscopy [5]. The six-peaks patterns are Fourier transforms of the stroboscopic images of the skyrmion crystal.

force the skyrmion moves in the direction normal to the force vector. Eventually skyrmions flow together with electrons, albeit for a ‘wrong’ reason.

### Magnon Hall effect

Remarkably, spin waves (or magnons) which carry no electric charge also feel the effective magnetic field of skyrmions. Moreover, the field that deflects magnons is two times stronger than that acting on electrons, because the magnon has spin 1, while the electron has spin  $\frac{1}{2}$ . This makes it possible to manipulate skyrmions with heat currents carried by spin waves, and it leads to clockwise rotation of skyrmion crystals when they are being observed by Lorentz microscopy [5]. The electron beam from the microscope heats the magnet resulting in a flux of thermal magnons propagating radially from the center of the beam spot. The

skew scattering of magnons off skyrmions results in a heat current rotating clockwise around the beam spot, which forces the skyrmion crystals to rotate in the opposite direction (see Fig. 4).

### Skyrmionics

Skyrmion motion induced by electric and thermal currents can be used to store and process information. They may help to realize an old dream – universal memory, which combines the speed of the rapid access memory with the high capacity and non-volatility of hard disc drives. One contender for universal memory is the magnetic race track memory where digital information is encoded in positions of tiny magnetic domain walls pushed along magnetic wires by electric current pulses [6]. The problem is that a high current density is required to move the domain walls. Recent experiments showed that skyrmions can be set into motion by electric currents that are 5-6 orders of magnitude lower. This discovery opened a new field of research – skyrmionics, which has a goal of

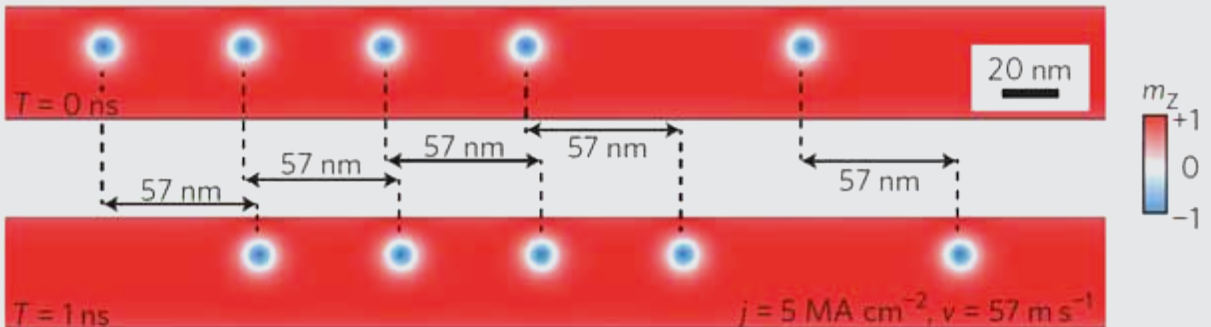
## *“Nontrivial Skyrmion topology gives rise to unusual physical phenomena.”*

developing new electronic devices with skyrmions as information bits.

The main challenge is to find materials that can host skyrmions at room temperature. For example,

MnSi orders magnetically at 30 K. The highest transition temperature, 280 K, was observed in FeGe. An alternative is to make heterostructures of thin layers of a conventional room temperature ferromagnet, such as Co, and a heavy metal with strong spin-orbit coupling, such as Ir or Pt (see Fig. 5). The inversion symmetry breaking required to induce skyrmions occurs at the interface between the two layers. Very recently, two experimental groups reported the observation of room temperature skyrmions in multilayers of ferromagnetic and heavy metal materials. Whether these skyrmions can be manipulated with ultra-low electric

- References
- [1] T. H. R. Skyrme, Proc. R. S. London, **260**, 127 (1961).
  - [2] A. N. Bogdanov and D. A. Yablonskii, Sov. Phys. JETP **68**, 101 (1989).
  - [3] S. Mühlbauer et al., Science **323**, 915 (2009).
  - [4] X. Z. Yu et al. Nature **465**, 901 (2010).
  - [5] M. Mochizuki et al., Nature Materials **13**, 241 (2014).
  - [6] S. S. P. Parkin et al., Science **320**, 190 (2008).
  - [7] A. Fert et al., Nature Nanotechnology **8**, 152 (2013)



**FIGURE 5** Micromagnetic simulations of the current-induced dynamics of a train of room-temperature skyrmions stabilized by inversion symmetry breaking at the interface between Co and heavy metal films [7].



# De **data**specialisten

Software Innovations

KxA software innovations is gevestigd in de provincie Groningen. Het is een uniek bedrijf dat innovatieve, gekke, grote, kleine, spannende, mooie, maar natuurlijk ook normale maatwerk software-opdrachten uitvoert. De overeenkomst tussen al deze projecten is dat het gaat om data in alle vormen en maten, bijvoorbeeld:



Het Nederlandse verkeer in 400 miljard metingen toegankelijk opslaan



In een stal het gedrag van koeien monitoren



Software ontwikkelen voor de gigantische SKA radiotelescoop

**van BIG BANG tot**



Hulpverleners in de zorg ondersteunen met VCA



## Werken bij KxA

Bij ons vind je allerlei achtergronden (natuurkunde, informatica, AI, etc). Iedereen deelt het enthousiasme voor softwaretechniek en wat je daar allemaal mee kunt doen.

We hebben regelmatig afstudeeropdrachten, stageplekken én vacatures. Je krijgt hierbij een opleidingstraject om je helemaal in ons vakgebied te bekwamen.

Ben jij geïnteresseerd in het werken bij een High Tech bedrijf? Kijk dan eens op [www.kxa.nl](http://www.kxa.nl), of neem contact met ons op via [mulder@kxa.nl](mailto:mulder@kxa.nl)

# Vorig Breinwerk

## *Translation puzzle*

DOOR DE REDACTIE

Afgelopen breinwerkpuzzel is gewonnen door Inne Lemstra en daarmee heeft de reistas zijn eerste bestemming gevonden! Ondanks de door elkaar gehusselde talen is de boodschap gelukkig goed overgekomen en zit de redactie weer met een raadsel minder opgescheept. Hieronder het goede antwoord, voor wie het nog niet heeft kunnen vertalen •



### De oplossing

De Rijksuniversiteit Groningen heeft plannen om volgend jaar een locatie in Noord-China aan de oostkust te openen. Om precies te zijn in de stad Yantai met 6,5 miljoen inwoners. Hier schijnt een ongebruikte campus te zijn met ruimte voor circa 10.000 studenten. Ze gaan een samenwerking aan met de China Agricultural University uit Beijing.

Het is echter niet de bedoeling om er een Chinese universiteit van te maken. De RuG zal internationale docenten aanstellen en zo min mogelijk Chinese. Kortom, het zal een internationale universiteit worden. Hiermee zal de RuG de eerste universiteit van het Europese vasteland zijn die een zogenaamde 'branch campus' opent in China. Zulke samenwerkingen bestaan al wel in het buitenland. Zo heeft de New York University een dependance in Shanghai en de Universiteit van Nottingham een in Ningbo (ook in China). De campus van Groningen moet een soort minia-

tuurversie van Groningen in China gaan worden. De RuG zal daarom ook het curriculum gaan bepalen, welke dan vervolgens ook nog door het Chinese ministerie moet worden goed gekeurd. Als het eenmaal zo ver is, zou dit een groot aantal plekken voor uitwisselingsstudenten moeten opleveren.

Je kunt je afvragen wat dat allemaal gaat kosten. Zou de RuG niet beter het geld in Groningen kunnen besteden, in het verbeteren van het onderwijs of in verbeteren van het onderzoek? Maar hier heeft de RuG vast wel over nagedacht. Naar het schijnt hoeft de RuG in ieder geval geen huur te betalen, want dat doen de Chinezen. Mocht je meer willen lezen over het project van de RuG in China, je kunt verder lezen in de UKrant.

# Nieuw Breinwerk

## Een kruisgetalpuzzel

DOOR DE REDACTIE

**N**a de vertalingspuzzel van vorige keer is het weer hoog tijd voor een echte beta-puzzel. Deze keer daarom geen kruiswoordpuzzel maar een kruisgetalpuzzel! Het invullen van het rooster gaat precies op dezelfde manier, maar nu vul je getallen in, in plaats van letters. Onder de juiste inzendingen zal Het Wiskundeboek worden verloot •

### De opgave

#### HORIZONTALAAL

1. een kwadraatgetal
4. een palindromisch geheel getal
8. 265 graden celsius in graden Fahrenheit
9. samen met 3-verticaal een permutatie v. d. cijfers van 0 tot 9
11. op een na kleinste priemgetal in de vorm  $n^2 + 2^n + 1$ ,  $n > 0$
13. een gros getal
14. 19-verticaal min
- 18-verticaal plus 26-verticaal
17. aantal 2-cijferige priemgetallen
18. het product v. d. cijfers van dit getal is 78125
20. de som v. d. positieve delers van dit getal is 91
21.  $33^2 + 3^2$
22. dit getal is de som v. d. faculteiten van zijn cijfers
24. een macht van zes
27. de som v. d. vierde macht van vijf opeenvolgende driehoeksgetallen
30. een Mersenne-priemgetal
31. een macht van twee
32. getal v. h. beest

#### VERTICAAL

1. een veelvoud van 11
2. het product v. d. positieve delers v. h. getal  $202^2$
3. zie 9-horizontaal
4. een Fermatpriemgetal
5. product v. d. eerste drie priemgetallen
6. collega v. 1-horizontaal
7. binair geschreven is dit getal 11010001110001
10. nog een kwadraat getal
12. het eerste jaar wat een priemgetal is na 1950
15.  $25/6$  pi rad. in graden
16. het 17de Fibonaccigetal
18.  $210^2 + 111^2$
19. de kleinste gemeenschappelijke deler van 36 en 1631
20. het aantal positieve kwadraatgetallen kleiner dan  $10^5$
23. het aantal positieve cijfers kleiner dan 625 die niet deelbaar zijn door 5
25. de som van deze cijfers is 15 en hun product is 84
26. palindromisch kwadraat
28. een even priemgetal
29. 20-horizontaal min
- 28-verticaal

1	2	3		4	5	6	7	
8				9				10
11			12			13		
		14		15	16		17	
	18					19		
20			21					
22		23			24		25	26
27			28	29		30		
	31					32		



**Schut Geometrische Meettechniek** is een internationale organisatie met vijf vestigingen in Europa en de hoofdvestiging in Groningen. Het bedrijf is ISO 9001 gecertificeerd en gespecialiseerd in de ontwikkeling, productie en verkoop van precisie meetinstrumenten en -systemen.

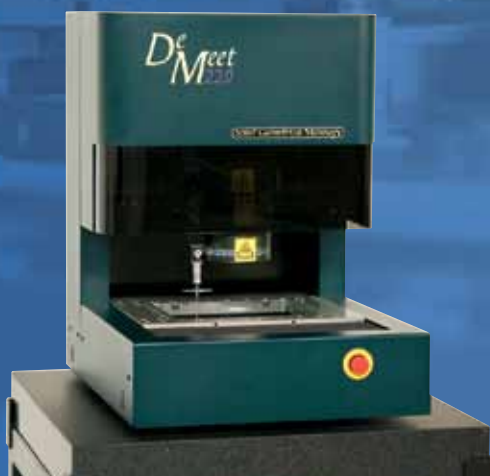
Aangezien we onze activiteiten uitbreiden, zijn we continu op zoek naar enthousiaste medewerkers om ons team te versterken. Als jij wilt werken in een bedrijf dat mensen met ideeën en initiatief waardeert, dan is Schut Geometrische Meettechniek de plaats. De bedrijfsstructuur is overzichtelijk en de sfeer is informeel met een "no nonsense" karakter.

Op onze afdelingen voor de technische verkoop, software support en ontwikkeling van onze 3D meetmachines werken mensen met een academische achtergrond. Hierbij gaat het om functies zoals **Sales Engineer**, **Software Support Engineer**, **Software Developer (C++)**, **Electronics Developer** en **Mechanical Engineer**.

Er zijn bij ons ook mogelijkheden voor een technisch interessant **stage-** of **afstudeerproject**. Dit kan in overleg met de docent worden afgestemd.

Open sollicitaties zijn ook zeer welkom. Voor echt talent is altijd ruimte.

Voor meer informatie kijk op [www.Schut.com](http://www.Schut.com) en [Vacatures.Schut.com](http://Vacatures.Schut.com), of stuur een e-mail naar [Sollicitatie@Schut.com](mailto:Sollicitatie@Schut.com).



**APPROVE**  
for *De Meet*

