

PETER FORBES TOM GRIMSEY

NANOWETENSCHAP

Reuzen van het oneindig kleine



Oorspronkelijke uitgave: Peter Forbes and Tom Grimsey, *Nanoscience – Giants of the Infinitesimal* (2014) door Papadakis Publisher of Kimber Studio, Winterbourne, Berkshire, UK / www.papadakis.net
2014 © Peter Forbes, Tom Grimsey en Papadakis Publisher
Alle rechten voorbehouden. De auteurs doen hun morele rechten gelden op de tekst van deze titel.

Uitgever: Alexandra Papadakis
Ontwerp omslag en binnenwerk: Alexandra Papadakis
Redactie: Sheila de Vallée
Productie: Caroline Kuhtz

Vertaling: Sarah de Waard, Amsterdam
Zetwerk Nederlandse editie: JAPES, Amsterdam
Uitgave:
Uitgeverij Veen Media
Postbus 57191, 1040 BB Amsterdam
www.veenmedia.nl

Deel 123 van de
Wetenschappelijke Bibliotheek

© P. Forbes, T. Grimsey / Veen Media, Amsterdam 2014

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16B Auteurswet 1912 j^o het Besluit van 20 juni 1974, Stb. 351, zoals gewijzigd bij het Besluit van 23 augustus 1985, Stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 3051, 2130 KB Hoofddorp). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient men zich tot de uitgever te wenden.

Voorpagina: Twee vellen grafeen kunnen gebruikt worden om vloeistofdruppels in ondoordringbare maar transparante blaasjes te vangen. Dit zorgde voor een revolutie in de microscopie doordat wetenschappers nu biologische moleculen in hun natuurlijke, vloeibare omgeving kunnen observeren. Met de microscoop met de hoogste resolutie ter wereld, de transmissie-elektronenmicroscoop van het Lawrence Berkeley Nationaal Laboratorium, is zelfs de groei van colloïdale nano platina kristallen op ware snelheid gefilmd.

Titelblad: Zelfgeassembleerde nanoborstels grijpen een bol van polystyreen. Rasterlektronenmicrograaf die de International Science and Engineering Visualization Challenge heeft gewonnen. (Foto met dank aan Joanna Aizenberg.)

Titelpagina: Het groenfluorescerende konijn van Eduardo Kac, gecreëerd met de bioluminescerende genen van een kwal.

Inhoudsopgave

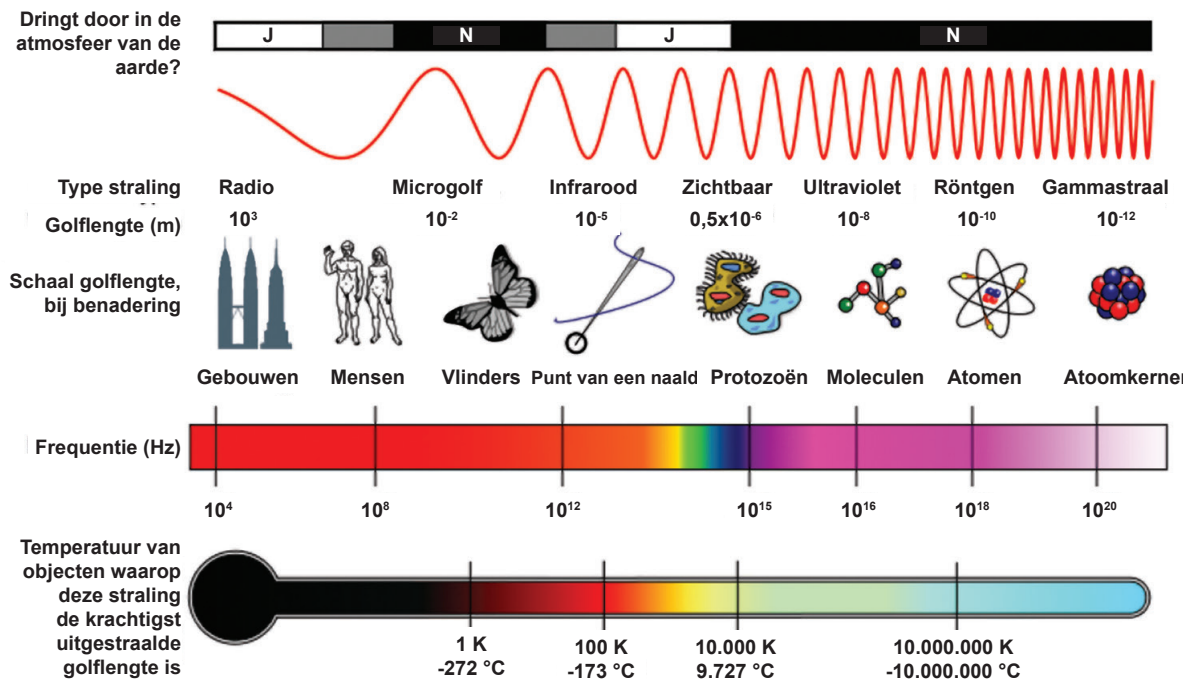
Hoofdstuk 1	De grootse kleine ruimte Waar de natuur haar wonderen verricht	6
Hoofdstuk 2	Meetkunde De enige bouwmeester	30
Hoofdstuk 3	Grafeen Hoe de schilfers van ieder potlood dat ooit een punt op papier zette het grootste wonder tot nu toe verborgen	52
Hoofdstuk 4	Titaantjes De nieuwe sterke materialen	70
Hoofdstuk 5	Licht voor ons laten buigen	82
Hoofdstuk 6	Benzine uit het luchtledige Nano-oplossingen voor de milieucrisis	102
Hoofdstuk 7	Nanogeneeskunde Contact maken met het lichaam op zijn eigen niveau	122
Hoofdstuk 8	Homo Ludens Voortgang door spel	136
Hoofdstuk 9	Pseudokristallen	154
Hoofdstuk 10	Kom dichterbij, maak een connectie, laat de vonken vliegen	166
	Illustraties	182
	Suggesties voor verder lezen	183
	Index	184
	Dankwoord	190
	Over de auteurs	191

1 De grootse kleine ruimte

Waar de natuur haar wonderen verricht

Sommige biologische systemen zijn buitengewoon klein. Veel cellen zijn minuscuul maar bijzonder actief. Ze produceren verschillende stoffen; ze verplaatsen zich; ze trillen en bewegen; ze doen zoveel wonderbaarlijks – en allemaal op heel kleine schaal. Ze slaan ook informatie op. Stel je voor dat wij ook iets zouden kunnen maken wat piepklein is en toch doet wat we willen – dat we een voorwerp zouden kunnen maken dat op dat niveau functioneert!

Richard Feynman, *There's Plenty of Room at the Bottom*



In 1922 brak Howard Carter de graftombe van de farao Toetanchamon open en betrad een droomgrot – de meest legendarische, rijk gevulde schatkamer ooit. Wetenschappers stuiten soms ook op dergelijke nieuwe rijken, maar daar zijn de schatten niet altijd zo duidelijk zichtbaar. De Duitse natuurkundige Heinrich Hertz ontdekte in 1887 dat hij elektriciteit kon gebruiken om golven op te wekken die erg op licht leken, maar die een andere golflengte hadden. Tegenwoordig staat er in ieder natuurkundeschoolboek een plaatje van het volledige elektromagnetisch spectrum, waar wij slechts een fractie – het zichtbare spectrum – van kunnen zien. Aan dit nieuwe terrein hebben we de wonderen van radio, televisie, mobiele communicatie, de computer en het internet te danken.

In 1959 wrikte de grote natuurkundige Richard Feynman een andere deur naar het onbekende open. Of misschien is dat niet helemaal waar. Feynman was in dit geval eerder de ziener dan de ontdekkingsreiziger. Op 29 december 1959 gaf hij een profetische lezing aan het Technologisch Instituut van Californië met de titel: 'There's Plenty of Room at the Bottom' ('Er is meer dan genoeg ruimte op de bodem'). Met zijn aanleg voor stoutmoedige, vooruitziende uitspraken en de kracht en nuchtere aard van zijn betoog kon hij de meest complexe natuurkunde misschien niet makkelijk maar in ieder geval begrijpelijk maken.

In dit geval bedoelde Feynman dat materie een schaal had – ergens tussen de theoretisch bekende maar onzichtbare, minuscule moleculen uit de gewone scheikunde en de levende cellen die zichtbaar zijn onder de krachtigste lichtmicroscopen – waar wonderlijk gedetailleerde bouwkunst plaatsvond. En Feynman geloofde dat omdat de natuur het kan, de mens ook wonderen zou kunnen verrichten als hij op deze schaal zou werken.

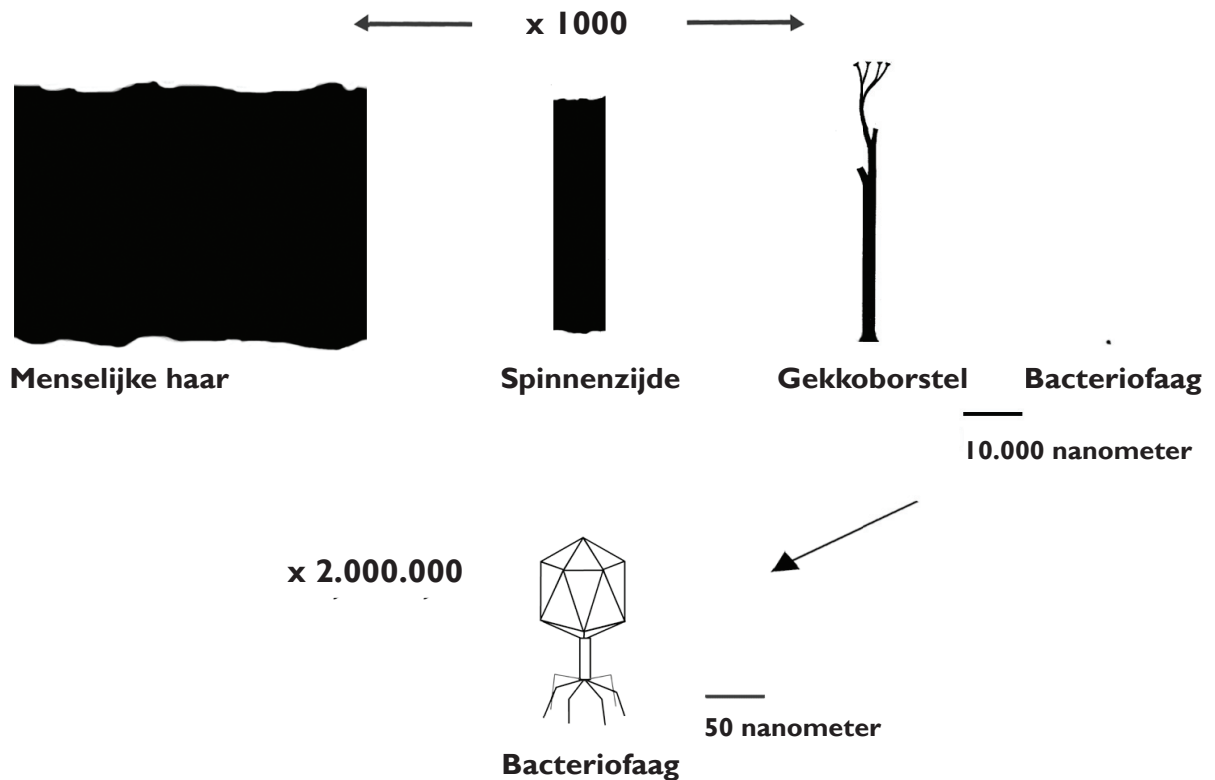
Probeer om de schaal van Feynmans rijk te begrijpen eerst aan het atoom zelf te denken. De toneelschrijver Tom Stoppard stelde zich het ontwerp van het eenvoudigste atoom – waterstof* – als volgt voor. Als je een vuist maakt in het centrum van de koepel van St Paul's Cathedral dan stelt die de kern voor, en de koepel staat voor de rand van het atoom. Een mot die in de koepel rondfladdert is het enkele elektron. Het schaalverschil tussen een gemiddelde organische molecuul als glucose (die al veel groter is dan een waterstofatoom) en de gemiddelde levende cel is maar iets kleiner dan de afstand tussen de kern en de elektronenschil. Maar anders dan bij een atoom is die ruimte niet leeg. Hij wordt bevolkt door een fantastische verzameling strak opgerolde koorden, ingewikkelde kleine machines, zelfs door miniatuurversies van elektrische motoren. De machinerie in het binnenste van de

Onder: Richard Feynman, de grote natuurkundige die de mogelijkheden van de nanowetenschap voorzag in zijn lezing uit 1959, 'There's Plenty of Room at the Bottom' ('Er is meer dan genoeg ruimte op de bodem'). Hij had het zeldzame talent om ingewikkelde wetenschappelijke concepten uit te kunnen leggen aan een breed publiek.

Tegenover: Het Elektromagnetisch Spectrum. Onze ogen zijn alleen afgestemd op de golflengte van het zichtbare spectrum, tussen 380nm en 740nm. Sommige insecten kunnen kortere, ultraviolette golven zien, sommige reptielen langere, infrarode golven. Omdat grote moleculen maar een paar nanometer breed zijn, zal lichtvergroting ze nooit zichtbaar kunnen maken.



* Een waterstofatoom is ongeveer 100.000 keer groter dan zijn kern. Een typische dierlijke cel is rond de 10.000-50.000 keer groter dan een glucosemolecuul.



cel is met zijn doolhof van aan- en afvoerbuizen net een gigantische petrochemische fabriek, maar dan op heel kleine schaal ontworpen. Dit is het nieuwe terrein waar Feynman ingenieurs in aan het werk wil zetten. Dit is het nanorijk.

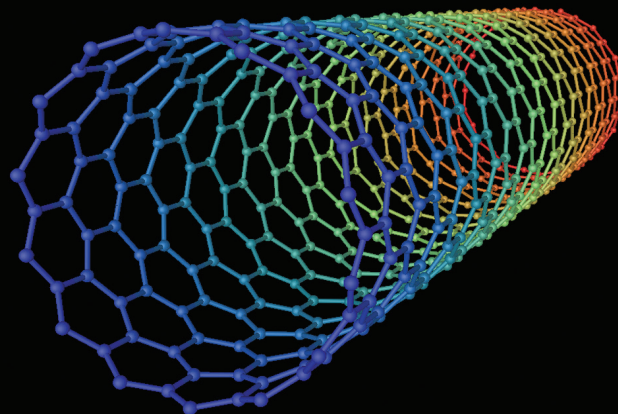
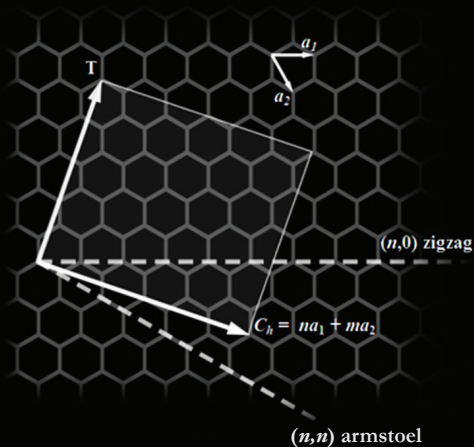
Feynman ontleende zijn inspiratie aan levende wezens omdat we weten dat die functionerende nanosystemen hebben. Maar het eerste terrein waar nanotechnologie toegepast werd was uiteraard de computer, in de vorm van de microchip. Feynman had dit voorspeld:

*Waarom kunnen we hen [transistors] niet heel klein maken, van kleine draadjes, kleine onderdelen – en met klein bedoel ik klein. Bijvoorbeeld, de diameter van de draden moet 10 of 100 atomen zijn, en de circuits een paar duizend ångström in doorsnee.**

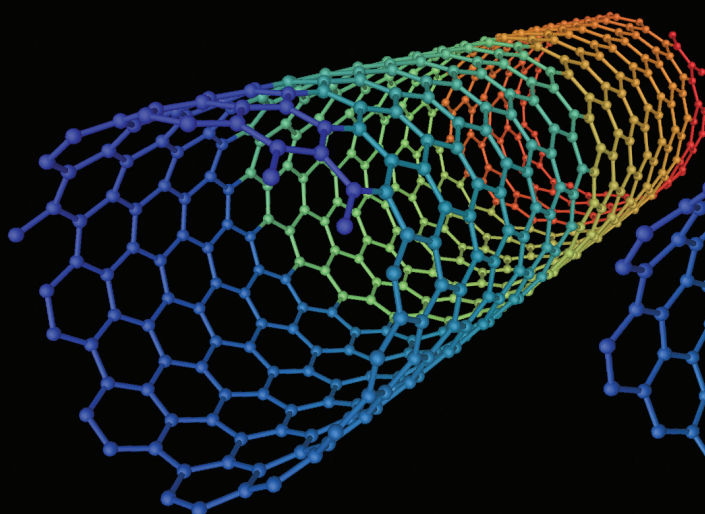
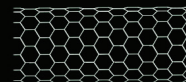
* De ångström is een geliefde eenheid in de scheikunde, natuurkunde en kristallografie. Een ångström is een tiende van een nanometer. De eenheid is vernoemd naar de Zweedse natuurkundige Anders Jonas Ångström (1814-1874).

Zoals we weten was de microchip een groot succes, en het proces van verdere miniaturisatie loopt nog steeds. Maar nanowetenschap doet meer dan ons slimme apparaatjes bezorgen. Het brengt ons naar het moment waarop het leven zelf ontstaan is: het punt waarop chemische stoffen met een specifieke nanostructuur de eigenschappen aannemen die de definitie van leven zijn. Aan de basis van dit alles ligt driedimensionale wiskunde: de meetkundige eigenschappen van een verzameling kristalstructuren – zeolieten, opalen, pseudokristallen – en de achtbaanvormige ketens en lussen van koolstofchemie: DNA, spierproteïnen, zuurstofdragende hemoglobine, synthetische stoffen als nylon, polytheen, Kevlar®, en de nieuwe nanostructuren zoals koolstofnanobuizen en grafeen.

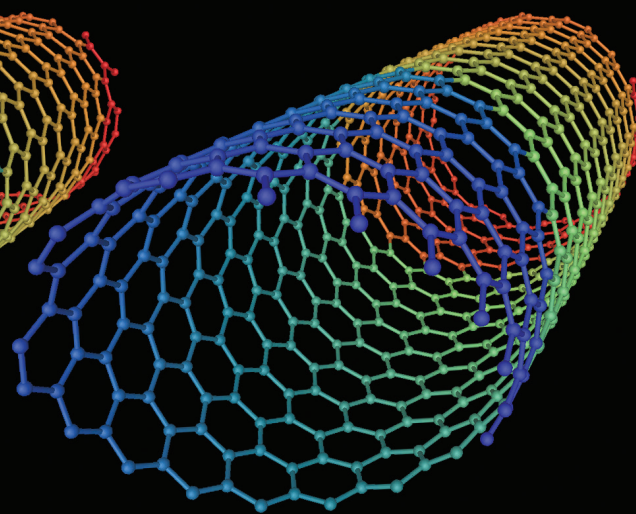
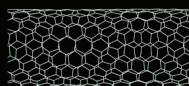
De spanwijdte van de nanowereld. Een draad spinnenzijde is het fijnste voorwerp dat het menselijk oog kan onderscheiden. De exquise structuur van de T4 bacteriofaag is twee miljoen keer kleiner.



$(0,10)$ nanobuis
(zigzag)



$(7,10)$ nanobuis
(chiraal)



$(10,10)$ nanobuis
(armstoel)

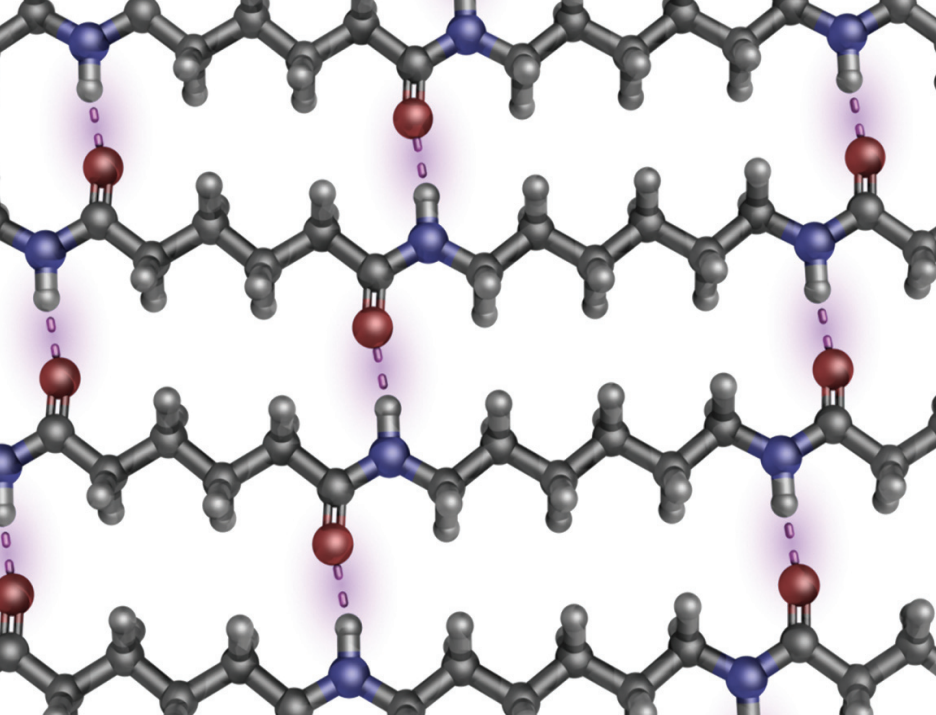


Nanoschaal is het terrein waar de objecten kleiner zijn dan de complexe patronen die we met een lichtmicroscop kunnen zien – bijvoorbeeld de gewrichten van een vlo – maar groter dan de bijna onvoorstelbaar kleine atomen waar de celmechanismen van die vlo uit opgebouwd zijn. Er zijn twee soorten nanotechnologie: de ‘top down’ benadering, waarbij minuscule structuren op siliciumwafels worden gedrukt, en de ‘bottom up’ benadering, waarbij structuren opgebouwd worden uit atomen. Atomen

zitten vol tegenstrijdigheden: het zijn zowel brokjes materie als energiewolken. Einstein stelde in zijn uitbreiding van de eerste wet van de thermodynamica dat Energie gelijk staat aan Materie vermenigvuldigd met 299.792.458 (de snelheid van het licht) in het kwadraat: $E=mc^2$, een observatie die mooi en stoutmoedig is in haar eenvoud.

Deze enorme hoeveelheid energie is ondergebracht in een samengerokken kern die uit alle macht een wolk razende elektronen vasthoudt. Alle transformaties

Koolstofnanobuizen. Deze nanostructuren bestaan uit rijen van zeshoekige koolstofatomen die een soort nanokip-pengaas vormen. Ze kunnen op verschillende manieren opgerold worden, waardoor ze, afhankelijk van de hoek die de rotatie-as maakt, verschillende eigenschappen krijgen.



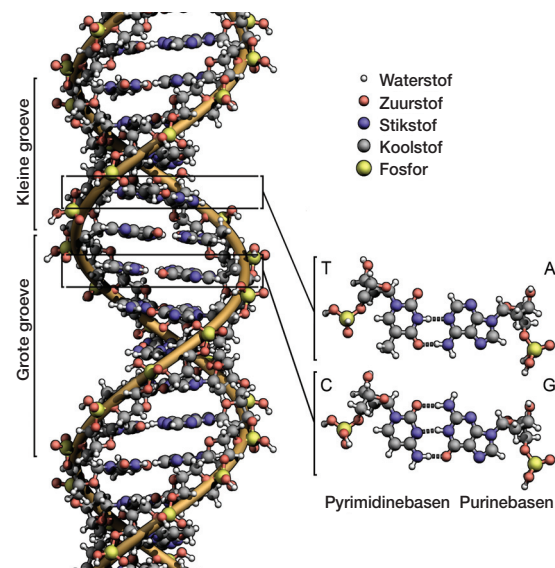
Boven links: Nylon is een lange molecuulketen waarbij de ketens aan elkaar verbonden zijn met waterstof. Synthetisch nylon is gebaseerd op de structuur die in iedere natuurlijke proteïne te vinden is: de amideverbinding.

Boven rechts: De spiraalvormige structuur van DNA. De bruggen die de twee spiralen bijeenhouden worden gevormd door waterstofverbindingen tussen twee complementaire basen, die aan de rechterkant van de afbeelding te zien zijn.

Ommezijde: Ijskristallen, in een oneindige reeks variaties op de zeshoekig, laten zien dat zelfs eenvoudige bestanddelen – waterstof en zuurstof – nanostructuren kunnen creëren die verbluffend gevarieerd en complex gebouwd zijn.

tie van materie in de normale wereld heeft te maken met het gedrag van elektronen, die van atomen verwijderd kunnen worden om elektrische stroom te creëren, om verbindingen aan te gaan met andere atomen, om vuur, ademhaling en alle chemische processen in levende en levenloze stoffen mogelijk te maken. De Einsteinenergie die opgesloten zit in de kernen van slechts een handvol atomen in een nucleaire bom is miljoenen keren sterker dan de chemische energie (opgeslagen in de banden tussen atomen) in een blok brandstof van vergelijkbare grootte, bijvoorbeeld dynamiet. Nanowetenschap houdt zich, net als de rest van de scheikunde, bezig met het elektronenverkeer. Chemische energie is de energie van de elektronen; nucleaire energie de energie van de atoomkern.

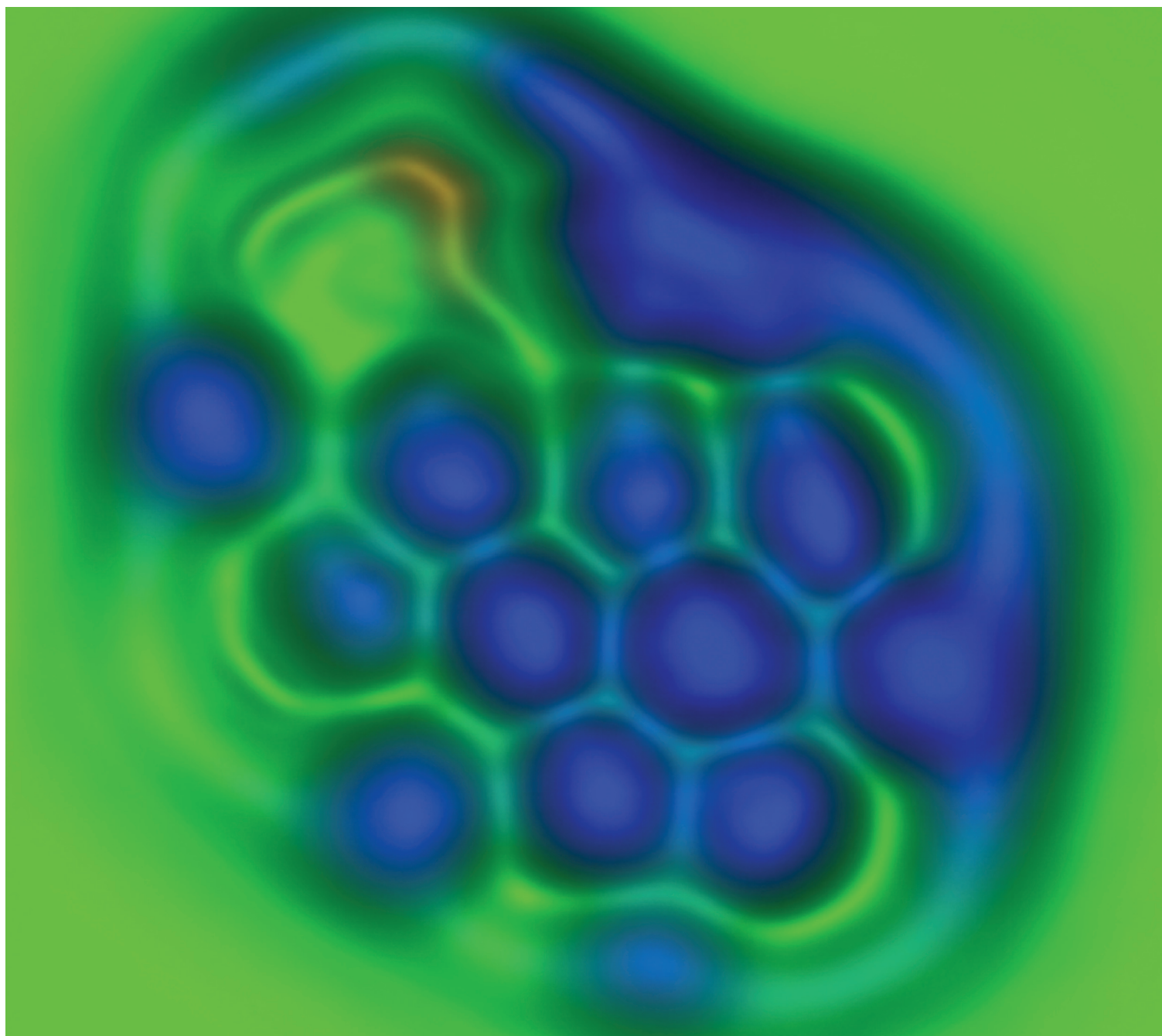
Atomen verschillen niet heel veel van elkaar in formaat. Ze zijn tussen de 0,1 en 0,5 nanometer (1 nanometer – 1nm – is een miljardste van een meter) in diameter. Wanneer het aantal protonen in de positief geladen kern toeneemt, stijgt ook het aantal negatief geladen elektronen. Maar hoewel grotere atomen meerdere elektronenschillen hebben, houdt de toegenomen aantrekkingskracht van de sterkere kern de elektronen steviger vast, dus atomen met



meer protonen en neutronen worden niet veel groter, alleen dichter. En, iets wat als zelfs natuurkundigen in de quantummechanica oprecht verbluft, elektronen zijn – onmogelijk – overal tegelijk. Er wordt dus heel wat afgeduwd, getrokken en gedraaid binnen een atoom. Daarnaast wordt er geduwd en getrokken, en vindt er elektronenruil plaats, tussen verbonden atomen. En toch, ondanks deze draaikolk van energie is de connectie van ieder atoom met ieder ander soort atoom precies, constant en identiek, tot in alle eeuwigheid toe.

En juist deze chemische choreografie is zo betoverend. Deze atomen komen bij elkaar om *dit* te maken, enkel als tussenstadium om *dat* te maken, en dan *dit*, tot ze de complexe verbanden leggen die tot leven leiden.

Neem het alomtegenwoordige maar exotische watermolecuul: H_2O . Hoewel het flexibel is, is de verbindingshoek van de twee waterstofatomen met een zuurstofatoom altijd precies $104,5^\circ$ en is hun afstand tot een zuurstofatoom altijd, overal in het heelal, 0,957 ångström. Dit specifieke boogontwerp maakt water uniek en geeft het zijn bijzondere rol in het leven. De meeste vloeistoffen worden dichter wanneer ze afkoelen en stollen. Water maakt hier een begin



Individuele atomen uitgebeeld. Deze afbeelding, afkomstig van een atoomkrachtmicroscop, toont de koolstofverbindingen in een molecuul dat samen- gebonden benzeenringen bevat. Dit beeld toont voor het eerst de verschillende verbindingsslengten die in een dergelijke molecuul bestaan, iets wat al langer

theoretisch bekend was. Een atoomkrachtmicroscop neemt waar doordat hij de verschillen in elektrische lading in een oppervlak aanvoelt met een ultra- dunne silicium- of zeer dichte koolstofpunt. (Foto: met dank aan IBM Research – Zurich.)

mee, maar bij precies 4°C springt de verbindingshoek vast in een kristalformatie. ‘Klik-klak’ – het spreidt zich uit tot een open tralielwerk van ijs. De patronen in de ijsvingers die de vorst op de ramen trekt ontstaan door de driedimensionale meetkundige eigenschappen van de moleculaire eenheden van water.

En hoewel een enkele watermolecuul hetzelfde is als iedere andere watermolecuul in het heelal, zijn ijskristallen oneindig gevarieerd. Daarmee demonstreren ze het cruciale feit dat nanostructuren veel gevarieerder en complexer gestructureerd zijn dan de eenvoudige molecule waar ze uit opgebouwd zijn.

In *Der Zauberberg (De toverberg)* beschreef Thomas Mann neerddarrelende sneeuwvlokjes die het land als een deken bedekken:

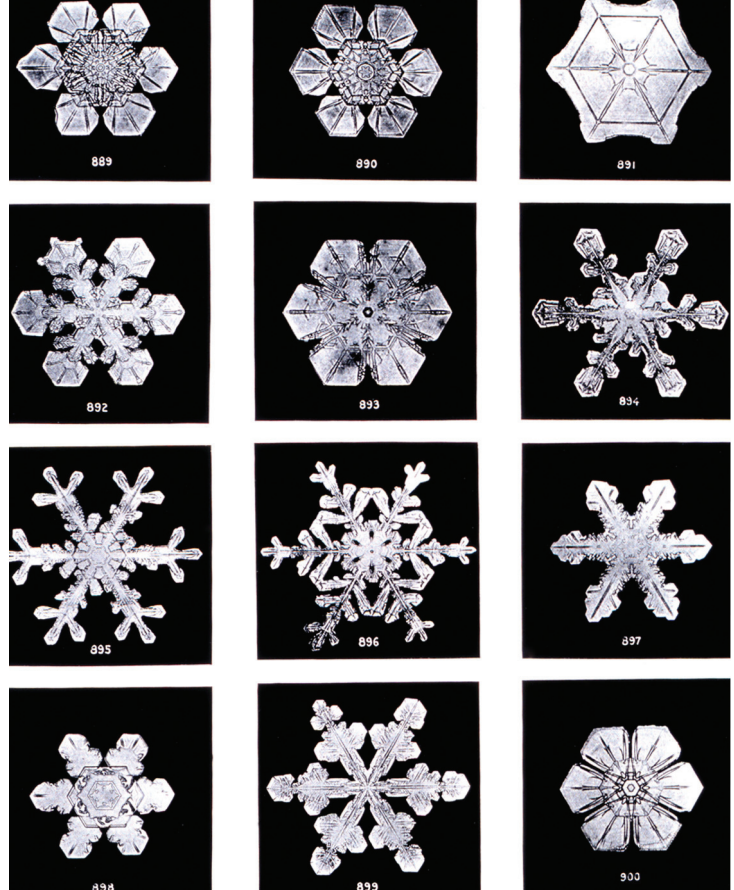
In deze myriade van betoverende sterretjes was er geen een als de ander.

*Een eindeloze inventiviteit stuurde de ontwikkeling van en de onvoorstelbare verscheidenheid in een en hetzelfde ontwerp – de gelijkzijdige, gelijkhoekige zeshoek.**

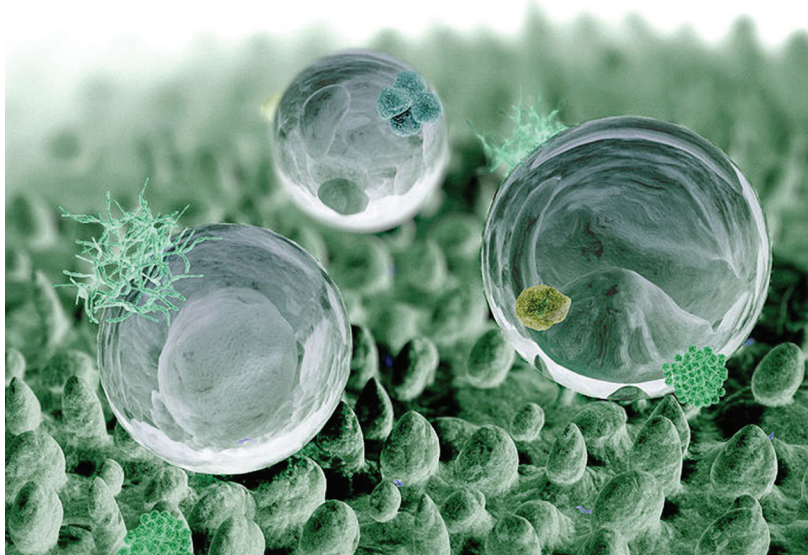
De manier waarop de watermolecuul uitzet is uniek en speelt een belangrijke rol in de ontwikkeling van onze wereld. Het uitzettingsvermogen geeft water de kracht rotsen te splijten maar is ook de reden dat het minder dichte ijs een vijver van bovenaf befrist, waardoor het waterleven in het zwaardere water eronder wordt beschermd. Zonder deze eigenschappen had er geen leven kunnen ontstaan in de oceanen.

Op onze ‘goudhaartjesplaneet’* is een overvloed aan water te vinden, in alle drie fasen. Het oppervlak baadt in hemel- en zeewater, dat af- en aanvloeit als een kloppend hart. Water is indrukwekkend in zijn vaste staat, maar als vloeistof blinkt het helemaal uit.

* Dit is niet de laatste keer dat we de zeshoek op het nanotoneel zullen zien. Het is een geliefde vorm op alle lengteschalen, van de benzeenmolecuul met maar 6 koolstofatomen tot de buckybal met 60 koolstofatomen; van de zeshoekige minerale rasterwerken van de stralendiertjes en de cellen van de honingraat tot de rotszuilen van de *Giant’s Causeway* en de architectonische koepels van Buckminster Fuller.







Top links: Het Lotuseffect. Waterdruppels staan trots rechtop op het oppervlak van een lotusblad (*Nelumbo nucifera*). Omdat ze niet in staat zijn zich te hechten aan het zeer gestructureerde oppervlak van het blad, kleven de druppels aan elkaar en trekken ze ook andere deeltjes aan. Op deze manier reinigt het blad zichzelf.

Top rechts: Het micro- en nanogestructureerde, waterafstotende oppervlak van een lotusblad maakt minimaal contact met het oppervlak van de waterdruppel.

Boven: De meniscus aan het oppervlak van een vijver is voor het bootsmannetje (*Notonecta glauca*) voldoende om over het water te schaatsen. Een rij kleine haartjes die zijn poten omzomen haken in het oppervlak. Ze zwemmen niet in het water, maar lopen er overheen.

Het is flexibel, vol zelfvertrouwen, voor sommigen een bron van plezier, voor anderen een tegenstander, maar altijd inventief. Het is fantastisch divers in zijn gedrag.

Hecht verbonden, met een structurele meniscus op het raakvlak met de lucht, vormt het oppervlak de druppel en staat het insecten van een behoorlijk gewicht toe te drijven. Deze oppervlaktespanning wordt veroorzaakt door de aantrekkingskracht tussen de watermoleculen, die aan het oppervlak alleen tweedimensionale bindingen aan kunnen gaan. In andere situaties kan water het gulzigste feestbeest zijn, dat makkelijke en tijdelijke relaties aangaat met talloze andere elementen. In tegenstelling tot organische oplosmiddelen, zoals aceton, zijn watermoleculen geladen, het zuurstofatoom licht negatief, de waterstofatomen licht positief. Daarom is water de eerste keus als oplosmiddel en een goed medium voor de complexe colloïden van het leven, zoals bloed, melk, plantensap en cytoplasma.

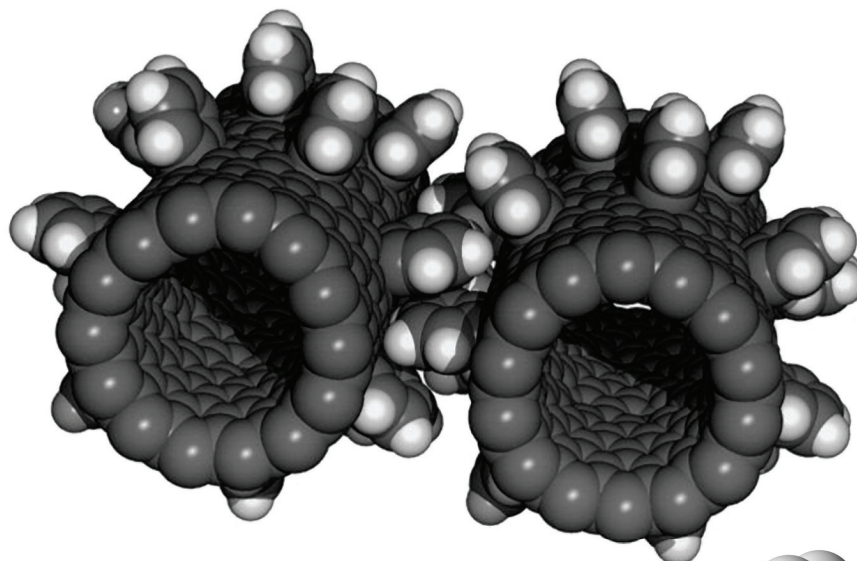
Zo ongeveer al het bekende leven bestaat voor het grootste deel (70 tot 80%) uit water. Water is het medium waarin de uitgebreide, energieke levensprocessen zich afspelen. Deze vloeibare basis voor het leven verklaart waarom vroege nanospeculanten als Eric Drexler, met zijn fantastische mechanische nanomachines, er zo ver naast zaten. Drexler is na Richard Feynman de beroemdste vroege profeet van nanotechnologie. Hij riep een wereld op die uit een soort nano-Lego bestond: harde, koude moleculaire raderen en motoren, opgebouwd uit losse atomen, een voor een in elkaar gezet. Hij hield geen rekening met de plakkerige vloeibaarheid van de nanowereld, waarin levende structuren hun machinerieën via speciale permeabele membranen aan de gang houden met geladen, waterachtige druk.

Ons waardesysteem schiet tekort. We hechten grote waarde aan inerte materialen als goud en diamanten vanwege hun glanzende onvergankelijkheid. Maar ze behouden hun glans alleen omdat hun onvruchtbare meetkunde ontoeschietselijk

* De Goudhaartje-hypothese stelt dat het heelal 'fijn afgestemd is op leven': als verschillende natuurlijke constanten van materie ook maar iets anders waren geweest, hadden de chemische voorlopers van leven niet kunnen ontstaan. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat er vele heelallen zijn met andere eigenschappen (het multiversum). Er zijn natuurlijk ook andere verklaringen.

Rechts: In een vroege visie op nanotechnologie zouden individuele atomen nanoversies creëren van technologie uit onze wereld, zoals raderen en andere mechanische onderdelen. Tegenwoordig zijn de denkbeelden over nano veranderd.

Onder: Moleculaire structuren van drugs (in aflopende volgorde): -d-amfetamine, cocaïne, cafeïne, MDMA. De bijzondere opbouw van deze moleculen stelt hen in staat zich aan specifieke receptorcellen in het zenuwstelsel te binden, waarvan ze de functie vervolgens onderdrukken of versterken.



is: ze willen niet meedoen, ze willen niet bezoedeld raken door de speelse interactie van de scheikunde. We moeten de verwarde, levendige elegantie en het indrukwekkende repertoire van watermoleculen op waarde schatten als ze zich verzamelen om en weer afsplitsen van een reeks verschillende partners, als ze draaien en buigen, complexe constructies vormen en hervormen in hun orkestratie van het leven. De dichter Philip Larkin realiseerde zich het belang van water:

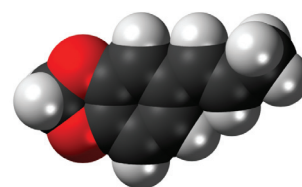
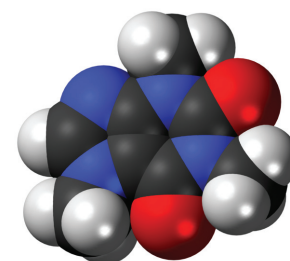
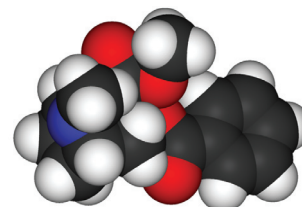
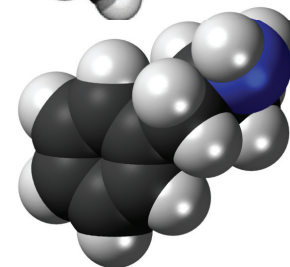
*Als ik geroepen zou worden
Om een religie te bouwen
Zou ik water gebruiken*

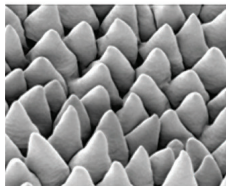
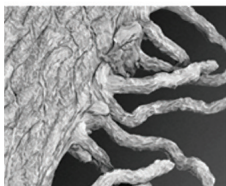
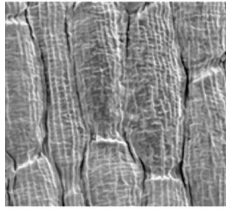
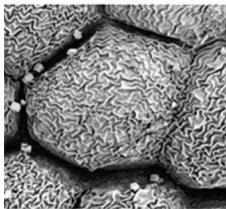
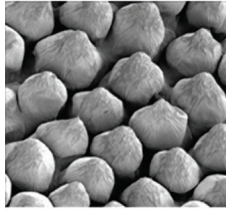
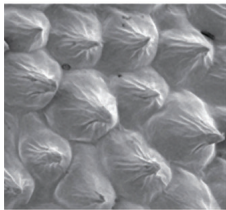
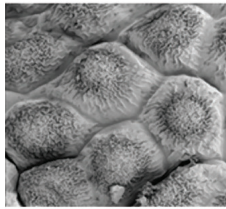
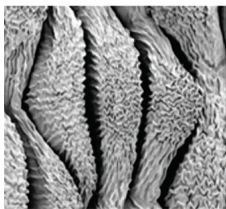
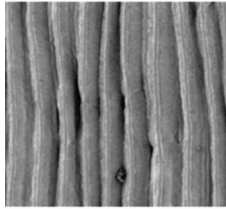
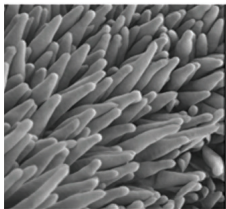
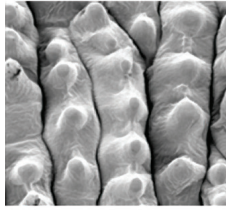
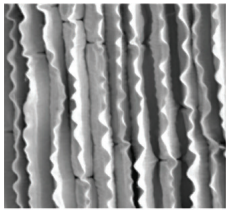
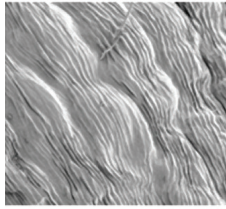
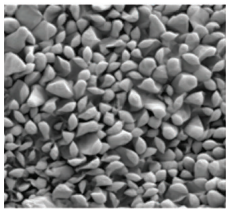
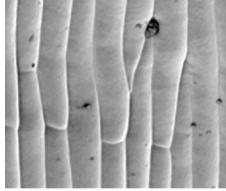
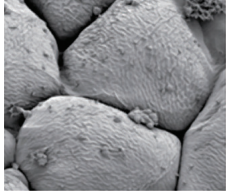
In alle bekende vormen van leven is koolstof de partner van water. Als we hier niet genoeg respect tonen voor de structurele kracht van de diamant, is dat alleen omdat de andere vormen van koolstof zoveel indrukwekkender zijn.

Om stabiel te worden moet koolstof (in maximaal vier richtingen) verbindingen aangaan met andere atomen, waaronder vaak ook andere koolstofatomen. En plotseling, met niet meer dan een handvol partners (voornamelijk waterstof, zuurstof, stikstof, fosfor en sulfuur), zijn de mogelijkheden zo goed als oneindig. De eigenschappen van de uiteenlopende verbindingen verschillen radicaal van elkaar. Vergelijk bijvoorbeeld aspirine, cafeïne, MDMA, cocaïne, amfetamine, nicotine, etc.

Het zijn ongeveer even kleine, op koolstof gebaseerde moleculen, met vergelijkbare bestanddelen. Ze leven niet, maar werken in op onze fysiologie en kunnen ons leven dramatisch beïnvloeden.

Koolstofchemie is zo veelomvattend en zo belangrijk voor ons dat ze haar eigen categorie heeft gekregen, en een label boven de toegang van hele afdelingen in scheikundefaculteiten: 'Organische scheikunde'. Om de combinatiemogelijkheden van koolstof in context te plaatsen: er zijn ongeveer 67,5 miljoen chemische verbindingen bekend (en dat aantal loopt nog op). Ongeveer 85% daarvan zijn koolstofverbindingen. Waar water gulzig is, is koolstof ronduit losbandig.





Koolstof is ook de molecuul waar we de laatste jaren zo succesvol mee zijn geweest. We maken er polythenen, polyvinylen, polycarbonaten, polyamides, polypropylenen, polystyrenen en alle andere synthetische polymeren van, ieder met hun eigen unieke eigenschappen.

Het leven op aarde begint tegenwoordig met een proces om koolstofverbindingen te creëren (fotosynthese). Dit wordt uitgevoerd door planten, algen en sommige kleine bacteriën. Het is het structurele anker voor wat er nu leeft, en voor wat er 180 miljoen jaar geleden leefde en nu de gas- en olievoorraden vormt die onze petrochemische industrieën voeden.

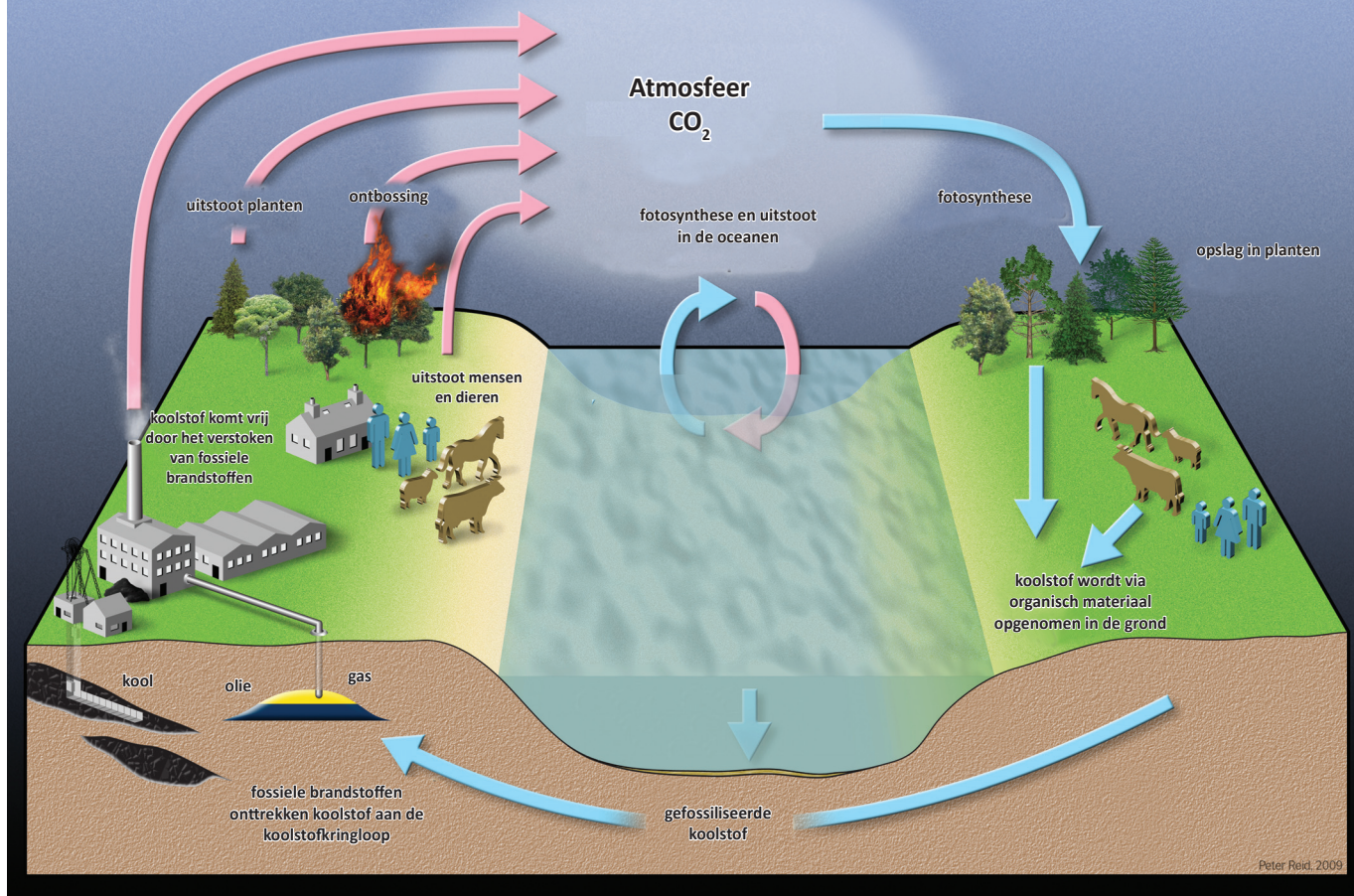
Laten we eerlijk zijn. Wij dieren creëren geen leven. Via voedselopname en -vertering zetten we planten (of andere dieren, die het plantenleven al voor ons hebben omgezet) om in stoffen waarmee we onze lichamen kunnen laten groeien en in leven kunnen houden.

Het proces is gecompliceerd, maar de bestanddelen zijn eenvoudig. Los van een klein percentage sporenelementen vraagt fotosynthese alleen water, opgetrokken via wortels, en koolstofdioxide, onttrokken aan de lucht. Stomata (huidmondjes die bediend worden via waterdruk) in de bladeren laten gassen in- en uitstromen, en de bijzondere cohesie van water geeft het een grote capillariteit (het vermogen van vloeistoffen om omhoog te kruipen in buizen, zelfs tot de top van een sequoia). De natuurkundige eigenschappen van water zijn dus op ieder niveau onmisbaar.

Heel simpel gesteld, chlorofyl gebruikt de energie van de zon om vloeibaar water te splitsen in de gassen zuurstof en waterstof. De plant stoot de zuurstof uit en de reactieve waterstof bindt zich aan koolstofdioxide om suikers te maken, die in feite de energie van de zon opslaan. De suikerfabrieken in fotosynthetische cellen produceren miljoenen glucosemoleculen per seconde. De bruisende metropool van een enkel blad kan binnen een paar dagen ontstaan. Wanneer we fossiele brandstoffen verbranden maken we fotosynthese in feite ongedaan; we laten de zonne-energie die miljoenen jaren geleden in organische verbindingen is opgeslagen vrij. Een tak binnen de nanotechnologie probeert nu de geheimen van fotosynthese te ontsluiten, in de hoop dat we eens net als planten energierijke koolstofverbindingen direct uit zonlicht, water en koolstofdioxide kunnen creëren (zie hoofdstuk 6).

Koolstof, een kleine, flexibele molecuul met vier verbindingspunten, is een speler met levens. Of zoals Michael Faraday in 1861 schreef:

Je zult verbluft zijn wanneer ik je vertel wat dit merkwaardige koolstofspel inhoudt. Een kaars zal zo'n vier, vijf, zes of zeven uur branden. Wat moet dan de dagelijkse hoeveelheid koolstof zijn die in de vorm van koolzuur de lucht ingaat! ... En wat gebeurt er dan mee? Hoe wonderbaarlijk is het te ontdekken dat de transformatie die plaatsvindt bij het ademen ... het voedsel en leven is van de planten en groenten die op het aardoppervlak groeien.



Natuurlijk zijn we tegenwoordig wat minder enthousiast over de hoeveelheid koolstofdioxide die we in de atmosfeer loslaten dan Faraday in zijn onschuldige verwondering was. Maar het proces van de koolstofcyclus is nog steeds een wonder. In navolging van Faraday beschreef Primo Levi, de grote schrijver en scheikundige, in 'Koolstof' (een hoofdstuk uit *Il Sistema Periodico* (Het Periodiek Systeem)) de honderden miljoenen jaren durende reis van een enkel koolstofatoom. Door rotsen, de lucht, een plant, alcohol, een mens, de lucht, een boom, een insect, tot de laatste zin waarin Levi ons vertelt dat de reis leidt naar 'deze hand van mij, om deze punt, hier, deze, op papier te zetten'. En daar zien we het koolstofatoom als onderdeel van een enkele punt. Het potlood in Levi's hand komt keer op keer tot leven wanneer we dit prachtige stuk verbeelding lezen.

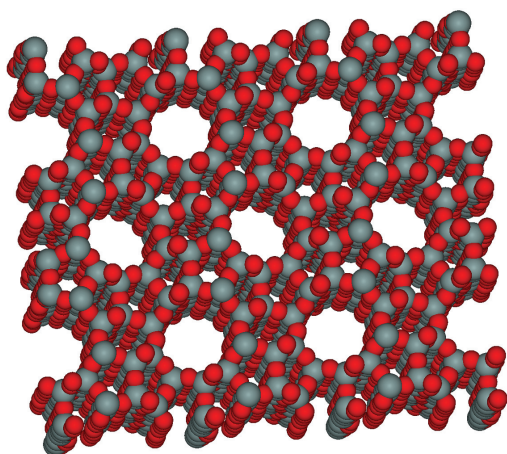
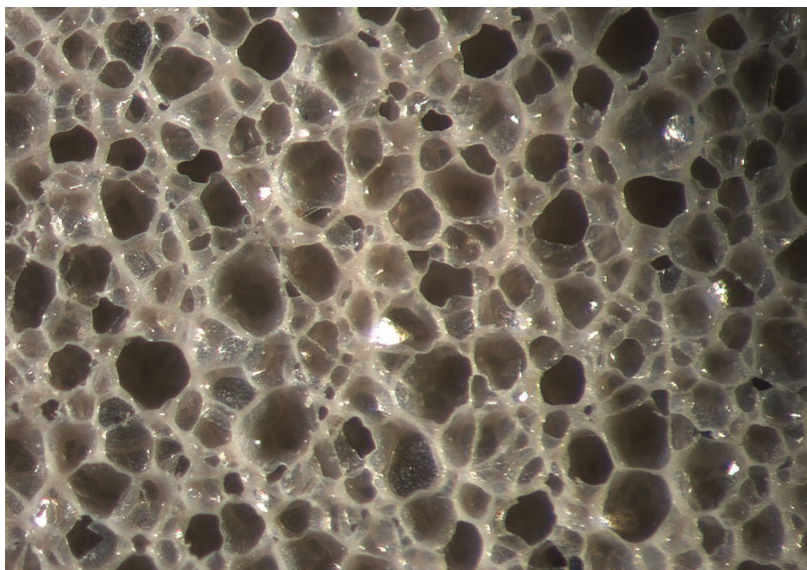
De wisselwerking tussen de chemische eigenschappen van koolstof en water ligt aan de basis van het

begin van het leven. En om meer te weten te komen over hoe leven begon, bezoeken we eerst de afwasbak in de keuken. Afwasmiddelen (ook wel *surfactants* – *surface-active agents* – genoemd) weken vet los van borden en maken het oplosbaar in water. Ze doen dit door middel van koolwaterstofketens met een water aantrekkende (hydrofiele) kop en een waterafstotende (hydrofobe) staart. De koppen gaan een hechte verbinding aan met water, maar de staarten stoten water af en gaan verbindingen aan met elkaar, om een nieuwe laag te vormen. Als een opgelost afwasmiddel in beweging wordt gebracht of als er lucht door geblazen wordt, sluit deze dubbellaag lucht in en vormt hij bellen.

De kolkende kleuren in het oppervlak van een zeepbel zijn structurele kleuren. Lichtgolven worden teruggekaatst door de binnenste en buitenste laag, gebroken in de verschillende kleuren van het spectrum, wat betekent dat de waterlaag tussen de 200

Boven: De koolstofcyclus. Een deel van de koolstofdioxide in de atmosfeer lost op in de oceanen, waar het onderdeel kan worden van de schelpen van zeedieren. Het wordt vaste, organische materie via fotosynthese. Het wordt weer afgestaan aan de atmosfeer via de ademhaling van dieren, vulkanische activiteit en het verstoffen van fossiele brandstoffen. Het fragiele evenwicht van deze uitwisseling wordt op het moment zwaar verstoord door overmatig gebruik van fossiele brandstoffen.

Tegenover: Planten structureren cellulose op heel veel verschillende manieren, om een gigantische variatie aan functionele oppervlakken te krijgen.



Top links: Een teer zeepbeloppervlak breekt het licht en creëert zijn spectrale patronen. Het water dat gevangen zit tussen de twee lagen van het oppervlak is in beweging en laat het membraan opzwellen, waardoor dat overeenkomt met de golflengtes van de kleuren van de regenboog.

Top rechts: Verzamelingen bellen vormen patronen met minimale oppervlaktenspanning. In sommige natuurlijke nanostructuren dienen dergelijke verzamelingen zeepbellen als mal voor de groei van mineralen.

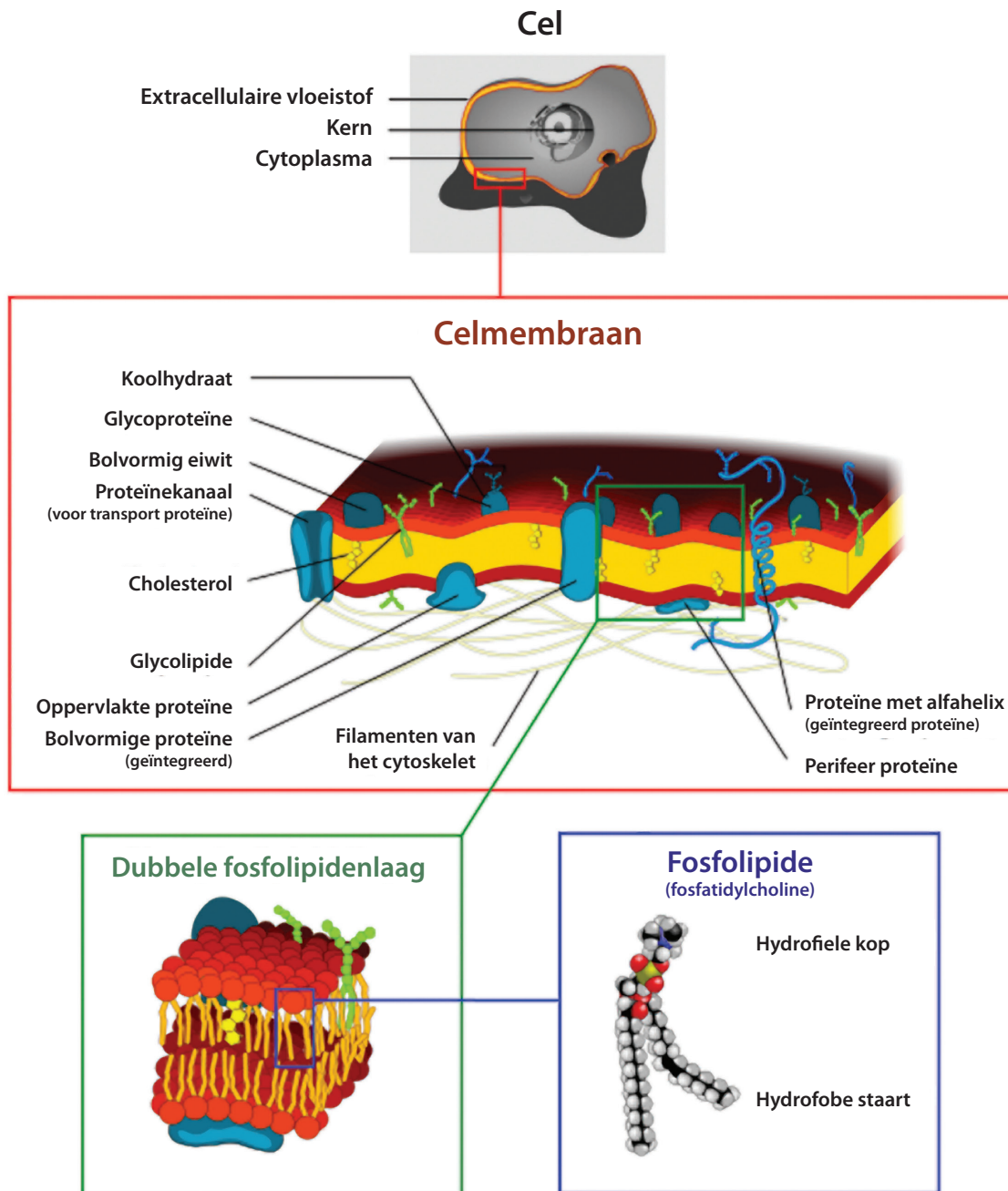
Boven: Een zeoliet, een microporeus aluminosilicaatmineraal met holtes die veroorzaakt worden door zijn atomaire bouw. Het formaat van de poriën van zeolieten is zo ontworpen dat ze alleen speciaal geselecteerde moleculen doorlaten. Ze worden gebruikt bij de fabricage van petrochemische producten.

en 700 nanometer in dikte varieert, wat destructieve en constructieve interferentie met zichtbaar licht veroorzaakt (zie hoofdstuk 5).

Het vlies dat het oppervlak van een levende cel begrenst is een vette bel die moleculen bevat die, net als afwasmiddelen, een vetaanttrekkende en een wateraanttrekkende kant hebben. Omdat de omgeving zowel binnen als buiten de cellen waterachtig is, vormen de vette moleculen (lipiden) een dubbele laag, waarbij de vette delen kop aan kop liggen en de wateraanttrekkende uiteinden naar binnen en naar buiten wijzen: een lipide dubbellaag. Deze dubbellaag is bezaaid met andere moleculen. Sommigen dienen als poorten die het koortsachtige moleculaire verkeer dat cel in- en uitreist reguleren. Anderen bevestigen de cel aan zijn buurcellen of aan de ingekapselde celinhoud. Weer anderen houden het gebeuren buiten de cel in de gaten om de gebeurtenissen binnenin daar beter op af te kunnen laten stemmen.

Levende cellen hebben deze wand niet alleen nodig om te voorkomen dat hun inhoud naar buiten stroomt, maar ook om de elektrische- en concentratiegradienten, die dienen om materialen te organiseren en transporteren, op te bouwen. De elektriciteit die het leven aanjaagt loopt niet door metalen draden maar via het snelle verloop van negatieve en positieve ionen langs de celmembranen.

Soms gebruikt de natuur opgepakte belstructuren als stellage waar omheen gebouwd wordt, en vormt ze harde structuren rond zachte malen. De volgende keer dat je bellen in je afwasmiddel klopt, kijk dan eens goed naar de plaatsen waar de bellen elkaar raken. Je zult zien dat ieder raakpunt tussen drie bellen is. De hoeken tussen de drie zijn op dit punt altijd 120° , en deze hoek verklaart veel natuurlijke structuren (en is ook het principe achter de meetkunde van de architecturale koepels van Buckminster Fuller of van het Eden Centre).



Het cel- of plasmamembraan is een semipermeabele lipide dubbellaag die alle plantaardige en dierlijke cellen bezitten. Celmembranen zijn nodig om de elektrochemische concentratiegradiënten, die essentieel zijn voor leven, in stand te houden. Het membraan is opgebouwd als een omgekeerde zeepbel

en wordt nog steeds gevormd door chemische aantrekkingskracht en afstoting. Maar dit keer zoeken de hydrofiële koppen het waterige cytoplasma buiten de dubbellaag op en klitten de hydrofobe, vetliefhebbende staarten samen om de multifunctionele basis van de celwand te vormen.



De Montreal Biosphère van Buckminster Fuller, gebouwd als het paviljoen van de Verenigde Staten voor Expo 67. Fullers grote lichtgewicht-structuren maken gebruik van hetzelfde natuurkundige principe als de minuscule, opmerkelijke skeletstructuur van stralendiertjes. In 1976 is tijdens structurele renovaties bij een brand de transparante acryloverkapping verloren gegaan, maar de stalen spantstructuur is intact gebleven en bewijst daarmee zijn structurele integriteit. Het is nu heringericht als een museum dat gewijd is aan het milieu.

Speciale schuimstructuren worden ondergedompeld in met mineralen verzadigde oplossingen. Mineralen zetten zich af in de hoeken waar de bellen elkaar raken en nemen dezelfde meetkundige eigenschappen aan als de bel.

Dit is het principe achter de stralendiertjes, microscopisch kleine zwevende organismes. Hun exoskelet bestaat uit gekristalliseerde siliciumdioxide, dat als sneeuwvlokjes in uitwaaiende stekels uit kan groeien. Deze patronen ontstaan in de tussenruimtes van de belstructuren. Wanneer de mineralen uitharden, wordt het afwasmiddel weggespoeld en blijft het aanslibsel achter als fijnmazig bouwwerk met dezelfde meetkundige eigenschappen als de bellenmal. Stralendiertjes moeten natuurlijk eten en hun prooi bestaat, onder andere, uit hun plantaardig equivalent: kiezelwier, fytoplankton dat zijn energie uit fotosynthese haalt. Kiezelwier gebruikt dezelfde bellenmal voor mineralen voor zijn exoskelet, wat de stralendier-

tjes ook van een bron van mineralen voorziet om verder te kunnen groeien. De harde minerale structuren van levende wezens (zoals botten, tanden en schalen) kunnen ook op een andere manier gemaakt worden. Hun vorm wordt gestuurd door de moleculaire structuren van proteïnen. Proteïnen met specifieke vormen sturen mineralen naar de meest geavanceerde en tegelijk meest efficiënte vormen.

In navolging van de talloze voorbeelden uit de natuur leren we in toenemende mate hoe we mallen moeten gebruiken om nanostructuren op te bouwen. Mallen helpen bij de bouw van synthetische zeolieten, microporeuze aluminiumsilicaten, die op commerciële schaal gebruikt worden als absorberende middelen. De poriën van de zeoliet zijn de schimmen van verdwenen zeepstructuren. Zeolieten kunnen op hun beurt gebruikt worden als stellage voor nieuwe structuren, die op zichzelf kunnen staan wanneer de mineralen met zuur verwijderd zijn.

