DE NEDERLANDSE WETENSCHAPSAGENDA

2011 Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW)
© Sommige rechten zijn voorbehouden / Some rights reserved
Voor deze uitgave zijn gebruiksrechten van toepassing zoals vastgelegd in de Creative Commons licentie. [Naamsvermelding 3.0 Nederland]. Voor de volledige tekst van deze licentie zie http://www.creativecommons.org/licenses/by/3.0/nl/

Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen
Postbus 19121, 1000 GC Amsterdam
Telefoon + 31 20 551 0700
Fax + 31 20 620 4941
knaw@bureau.knaw.nl
www.knaw.nl

pdf beschikbaar op www.knaw.nl

Eindredactie: Peter Vermij
Redactie: Mariette Huisjes, Frank van Kolfschooten, Hans van Maanen,
Bennie Mols, Peter Vermij
Beeldredactie: Tamar Stelling
Druk: Bejo druk & print, Alkmaar

ISBN: 978 90 6984 627 9

Het papier van deze uitgave voldoet aan ∞ iso-norm 9706 (1994) voor permanent houdbaar papier.

MIX
Papier van verantwoorde herkomst
FSC® C016391

DE NEDERLANDSE WETENSCHAPSAGENDA

Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen
2011

VOORWOORD

Wat zijn de grote vragen van de wetenschap anno 2011? En voor welke vragen ligt er een bijzondere rol voor Nederlandse onderzoekers? Met dit overzicht van bijna vijftig grote vraagstukken, voortgekomen uit de dynamiek van de actuele wetenschap, hoopt de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen daarop een inspirerend antwoord te geven.

Wetenschap zoekt de grenzen van onze kennis op. Deze zoektocht is nooit voltooid, want, zoals het cliché zegt: ieder goed antwoord roept minstens weer twee nieuwe vragen op. Daarom leven wij in een paradoxale tijd waarin er meer antwoorden én meer vragen zijn dan ooit tevoren.

De Nederlandse wetenschap speelt bij deze speurtocht een eigen rol. Wij mogen ons verheugen in de grote kwaliteit en productiviteit van de in ons land gevestigde onderzoekers. Ook al bestaat er natuurlijk geen exclusieve 'Nederlandse wetenschap', er zijn wel onderzoeksvragen waarvoor Nederlandse onderzoekers goed gepositioneerd zijn om een substantiële bijdrage te leveren. Dit zijn uitdagingen die met name gebaat zijn met een geconcentreerde aanpak en extra investeringen.

De KNAW hecht er veel waarde aan te benadrukken dat wetenschappelijk onderzoek een cruciale bijdrage geeft aan het realiseren van welvaart en welzijn, het oplossen van maatschappelijke problemen en het stimuleren van een competitieve en innovatieve economie. Wetenschap levert nieuwe inzichten, ontwikkelt nieuwe technologieën en mobiliseert intelligente mensen. Om deze meerwaarde te optimaliseren is het regisseren van de versnipperde Nederlandse overheidsinspanningen belangrijker dan ooit. Naast het benoemen van de grote innovatiethema's, zoals op dit moment via de economische topsectoren gebeurt, vraagt ook het grensverleggend, nieuwsgierigheidgedreven onderzoek een inspirerende langetermijnvisie. Een blik op deze wetenschapsagenda leert dat deze twee bewegingen niet tegenover elkaar staan, maar voor een groot deel in elkaars verlengde liggen. Het is moeilijk een onderwerp aan te wijzen in de agenda dat geen toegevoegde waarde heeft in maatschappelijke of economische zin. Deze organische eenheid van alle vormen van kennisontwikkeling kan niet genoeg benadrukt worden.

Een dergelijke brede, vanuit de wetenschap zelf opgestelde agenda is niet eerder in Nederland gemaakt. De leden van het genootschap en de adviesraden van de Akademie zijn over de volle breedte betrokken geweest bij de totstandkoming. Bij zo'n experiment past een woord van grote dank aan alle betrokkenen, in het bijzonder aan Marian Joëls en Marc Groenhuijsen.

Omdat de wetenschap niet stil staat, is de KNAW van plan deze agenda regelmatig te vernieuwen. Zeker is in ieder geval dat het ook dan geen moeite zal kosten een lijst van uitdagende vragen te formuleren.

Robbert Dijkgraaf
President KNAW

INHOUD

I. INLEIDING 7

II. AARDE, KLIMAAT, ENERGIE EN BIO-OMGEVING
1 Wat gebeurt er binnenin de aarde, en wat merken wij daarvan? 12
2 Wat zijn de oorzaken en gevolgen van klimaatverandering? 14
3 Kunnen we zonlicht in onze volledige energiebehoefte laten voorzien? 18
4 Hoe reageren planten op hun omgeving? 20
5 Vormen micro-organismen samen een macro-organisme? 22

III. COMPLEXITEIT EN WISKUNDE
6 Kunnen we onze informatie-systemen straks nog beheersen? 26
7 Wat kunnen we zeggen over de toekomst van een chaotisch systeem? 28
8 Streven computers straks zelfs wiskundigen voorbij? 30
9 Waar ligt de grens tussen het berekenbare en het onberekenbare? 32
10 Hoe kan uit enkele foto's een betrouwbaar beeld van de realiteit worden bepaald? 34
11 Wat kunnen we wel en niet berekenen uit het Langlands-programma? 36

IV. CULTUUR EN IDENTITEIT IN HEDEN EN VERLEDEN
12 Wie waren de vroegste mensachtige bewoners van Noordwest-Europa? 40
13 Wat betekenen oude beschavingen voor de Europese cultuur van vandaag? 42
14 Hoe veranderen nationale culturele identiteiten in de tijd? 44
15 Hoe beïnvloedt migratie van personen, objecten en ideeën de ontwikkeling van culturele identiteit? 46
16 Verloopt culturele integratie vandaag anders dan in het verleden? 50
17 Wat leren talen ons over het verleden? 52

V. GEZONDHEID EN VOEDING
18 Wat hebben we aan het menselijk genoom? 56
19 Hoe kunnen wij kanker beter de baas worden? 58
20 Hoe verbeteren wij gezondheid, preventie en zorg? 60
21 Kunnen wij onze afweer beter afstellen? 62
22 Hoe gezond kunnen wij ouder worden? 64
23 Hoe kunnen we gezonder eten? 66

VI. KENNIS EN HERSENEN
24 Hoe kan een plooibaar orgaan als het menselijk brein zich ontwikkelen? 70
25 Zijn onze hersenen wie wij zijn? 72
26 Bestaan er universele wetten voor élke menselijke taal? 74
27 Wat betekenen hersenwetenschappen voor het recht? 76
28 Kunnen machines ons helpen kennis te creëren uit bergen informatie? 78
29 Hoe verandert de architectuur van de wetenschap? 80

VII. LEVEN EN CHEMIE
30 Hoe verlopen biochemische reacties in levende cellen? 84
31 Kunnen wij zelf een levende cel in elkaar zetten? 86
32 Kunnen we organen nabootsen op een chip? 88
33 Kan chemische reactiviteit theoretisch worden voorspeld? 90
34 Kunnen we moleculen zichzelf laten assembleren tot nieuwe structuren? 92
35 Hoe ontwerpen we duurzame chemische productiemethoden? 94

VIII. MAATSCHAPPIJ EN VEERKRACHTIGE INSTITUTIES
36 Hoe moeten we markten inrichten en bewaken? 98
37 Hoe kunnen we nieuwe vormen van sociale ongelijkheid het best tegengaan? 100
38 Verkeert de representatieve democratie in een legitimiteitscrisis? 102
39 Welke instituties bepalen de vitaliteit van een samenleving? 104
40 Leven we straks in de 'verenigde staten van Europa'? 106
41 Wanneer bevorderen sociale netwerken duurzame samenwerking? 108
42 Kan het recht het milieu beschermen? 110

IX. MATERIALEN EN TECHNIEK
43 Kunnen we nieuwe materialen ontwerpen op de schaal van atomen? 114
44 Kunnen we materialen maken die defecten zelf herstellen? 116
45 Kunnen we het gedrag van complexe en levende materie begrijpen? 118
46 Wanneer vervangt de kwantumcomputer de klassieke computer? 120

X. VAN ELEMENTAIRE DEELTJES TOT HEELAL
47 Uit welke elementaire deeltjes en krachten is alle materie opgebouwd? 124
48 Sterren en planeten: hoe worden ze geboren, hoe gaan ze dood? 126
49 Hoe is het heelal ontstaan, en hoe ging het verder? 128

Bijlage 1. Samenstellers de Nederlandse Wetenschapsagenda 131
Bijlage 2. Fotoverantwoording 132

I. INLEIDING

Wat is de Nederlandse Wetenschapsagenda?

In 2005 zijn door het tijdschrift *Science* 125 grote openstaande vragen geformuleerd waarvoor de wetenschap zich op dat moment geplaatst zag.[1] Deze vragen reflecteerden de verwachtingen, fascinatie, verwondering en nieuwsgierigheid van de wetenschappelijke wereld zelf: waar gaan de grote stappen vooruit gezet worden in de wetenschap? Waar liggen de uitdagingen in de komende tien, twintig jaar?

De KNAW heeft zich in haar strategisch plan laten inspireren door dit voorbeeld. Ook in Nederland kan de vraag gesteld worden in welke onderzoeksvelden grote vooruitgang te verwachten valt, en dan vooral die velden waarin Nederlandse onderzoekers internationaal een toonaangevende rol spelen. Daarbij is het belangrijk om alle wetenschapsgebieden in de beschouwing mee te nemen. De bundeling van die uitdagende onderzoeksvragen is 'de Nederlandse Wetenschapsagenda'.

Wat is de unieke plaats van de Nederlandse Wetenschapsagenda?

De afgelopen jaren hebben meerdere onderzoeksinventarisaties plaatsgevonden vanuit verschillende partijen. De KNAW voegt met de Nederlandse Wetenschapsagenda een uniek element toe aan deze inventarisaties, als stem van de wetenschap. In de agenda stelt de KNAW vast welke fascinerende onderzoeksvragen geïdentificeerd kunnen worden over de volle breedte van de wetenschap, en waar – vanuit de sterkte van het onderzoek in Nederland – de kansen liggen om onze kennis en inzichten beslissend vooruit te brengen. De primaire drijfveer van de agenda laat zich het beste omschrijven door het motto van de KNAW: zuiver om de wetenschap. Fascinatie is daarbij het sleutelwoord. Dat maakt de Nederlandse Wetenschapsagenda overigens allerminst een bericht uit ivoren torens. Veel van de genoemde onderwerpen zullen op de middellange termijn hun maatschappelijke nut bewijzen, zoals de verworvenheden van onze tijd vaak zijn voortgekomen uit fundamentele wetenschap in het recente verleden. Het raakvlak met toepassingen komt ook duidelijk naar voren in veel van de onderzoeksvragen beschreven in de agenda.

De Nederlandse Wetenschapsagenda heeft hiermee een eigen signatuur maar sluit verder goed aan bij andere recente inventarisaties. Zo presenteerde de VSNU in 2008 de Staalkaart van het Nederlands universitair onderzoek, waarmee de Nederlandse universiteiten 21 onderzoeksthema's van hoge kwaliteit en groot nut onder de aandacht brachten. De onderwerpen aangedragen door de Nederlandse universiteiten zijn echter niet noodzakelijkerwijs dezelfde als die welke geïdentificeerd worden door toonaangevende onderzoekers zelf, werkzaam in alle onderzoeksinstituten in Nederland, zoals bij de Wetenschapsagenda.

1 '125 Questions: what don't we know?' *Science* 309 (2005): 75-102

Verschillende onderzoeksgebieden hebben ook gedurende de afgelopen jaren een sectorplan opgesteld waarin prioriteiten voor het onderzoek zijn vastgesteld. Het uitgangspunt van deze sectorplannen wijkt af van dat van de Nederlandse Wetenschapsagenda, in die zin dat ze vooral gedreven werden door de vraag hoe de toekomst van het betreffende wetenschapsgebied het best verzekerd kan worden, niet alleen wat betreft onderzoek maar ook wat betreft de opleiding en verankering in universiteiten.

Ook NWO heeft, zowel in de vorige als de meest recente strategie, onderzoeksthema's benoemd die aandacht vragen. Via deze thema's wil NWO samen met relevante partners een impuls geven aan de oplossing van urgente maatschappelijke vraagstukken. De NWO-thema's streven een sterke verbinding na tussen enerzijds de expertise van wetenschappelijke topgroepen en anderzijds de prioriteiten van overheid en nationale kennisinstellingen.

Het meest recent is de vaststelling van negen topsectoren, in de notitie *Naar de top: de hoofdlijnen van het nieuwe bedrijfslevenbeleid*, langs de lijnen van het regeerakkoord. De maatschappelijke innovatie die met deze topsectoren wordt beoogd is alleen mogelijk vanuit een sterk wetenschappelijk fundament. Een goede balans tussen investeringen die leiden tot maatschappelijke innovatie op korte en langere termijn is hierbij essentieel. De Nederlandse Wetenschapsagenda benadrukt vooral de kansen die er liggen op de middellange termijn.

De Nederlandse Wetenschapsagenda vormt zo een organisch geheel met de genoemde voorstellen en vult een tot nu toe ontbrekend element in.

Tot wie richt de Nederlandse Wetenschapsagenda zich?

De Nederlandse Wetenschapsagenda reflecteert wat toonaangevende onderzoekers beschouwen als de onderzoeksvelden en -vragen waar baanbrekende antwoorden te verwachten vallen op de middellange termijn. Het is van belang dat dit geluid breed gedragen wordt binnen de wetenschappelijke gemeenschap zelf, en dat deze wat dat betreft ook de krachten bundelt. Maar het samenstel van uitdagende vragen, die uit verwondering en nieuwsgierigheid van en door wetenschappers is samengesteld, is ook gericht aan diegenen die bepalend zijn voor het wetenschapsbeleid. De Nederlandse Wetenschapsagenda richt zich daarom in de eerste plaats tot deze wetenschapsbeleidsmakers: politici, beleidsbepalende ambtenaren bij ministeries, bestuurders van universiteiten, onderzoeksinstituten en universitaire medische centra, en (gebieds)besturen van NWO. Door de agenda tevens in het Engels uit te brengen spreekt de KNAW ook buitenlandse partijen aan, zoals zusteracademies en anderen die de onderzoeksagenda binnen Europa bepalen.

Door vast te stellen welke gebieden kansrijk zijn, kan verdere concentratie en voldoende kritische massa nagestreefd worden, voor veel velden een belangrijke voorwaarde voor een stimulerend onderzoeksklimaat. De Nederlandse Wetenschapsagenda wil hierbij richtinggevend zijn. Concentratie is van belang, al blijft voor succes in de wetenschap de excellentie van de onderzoekers zelf nog altijd van doorslaggevende

betekenis. Ondersteuning van deze onderzoekers, mede door middel van persoonsgebonden subsidies, is een voorwaarde om het Nederlandse onderzoek vitaal te houden.

Hoe is de Nederlandse Wetenschapsagenda tot stand gekomen?

Om zoveel mogelijk gebruik te maken van de inzichten van de wetenschappers zelf, is een *bottom-up*-procedure gehanteerd. Onderwerpen voor de Nederlandse Wetenschapsagenda zijn in de eerste plaats aangedragen door de KNAW-leden uit de verschillende vakgebieden (secties). Daarnaast hebben ook de KNAW-adviesraden onderwerpen ingebracht. Deze adviesraden zijn breed samengesteld uit gezichtsbepalende onderzoekers, ongeacht of ze lid van de KNAW zijn, om een goede dekking van de verschillende vakgebieden te garanderen. De opdracht aan de secties en raden was om te identificeren in welke onderzoeksvragen de komende tien tot twintig jaar door Nederlandse onderzoeksgroepen grote vooruitgang geboekt kan worden.

Een commissie bestaande uit de voorzitters van de KNAW-secties en de adviesraden, onder duaal voorzitterschap van een lid van het Afdelingsbestuur Letterkunde en het Afdelingsbestuur Natuurkunde, heeft vervolgens onderwerpen die sterk aan elkaar verwant waren gecombineerd of onderwerpen juist scherper gepositioneerd. Zorgvuldig is nagegaan of belangrijke onderzoeksvelden ontbraken en of het totale wetenschapsveld evenwichtig was gerepresenteerd. De uiteindelijk geselecteerde onderwerpen zijn tenslotte gerubriceerd in negen bredere velden. De betrokken secties, raden en samenstelling van de commissie staan vermeld in bijlage 1.

Wat is het vervolg?

Wetenschap is bij uitstek dynamisch. Vondsten kunnen in korte tijd een heel nieuw veld openleggen. Het is dan ook moeilijk om nu te voorspellen hoe het landschap er over tien jaar uit zal zien. Daarom zal een regelmatige bijstelling van de Wetenschapsagenda noodzakelijk zijn.

Falsificatie is een belangrijk begrip in de wetenschap. In zekere zin is dit ook toepasbaar op de Nederlandse Wetenschapsagenda: Is dit de best denkbare lijst? Hoewel de KNAW bij de samenstelling van de Nederlandse Wetenschapsagenda vooraanstaande onderzoekers binnen en buiten de KNAW aan het woord heeft gelaten, is een reflectie door externe partijen een open benadering die de kwaliteit van toekomstige agenda's alleen maar kan verbeteren. De KNAW zal dan ook het initiatief nemen om een dergelijke externe reflectie tot stand te brengen.

Marc Groenhuijsen
Marian Joëls

II. AARDE, KLIMAAT, ENERGIE EN BIO-OMGEVING

1 Wat gebeurt er binnenin de aarde, en wat merken wij daarvan?

Lange tijd beperkten aardwetenschappers zich hoofdzakelijk tot het bestuderen van de buitenste lagen van de aarde. De informatie over de diepere aarde was onvoldoende om te kunnen herleiden wat zich daar afspeelt. Dankzij nieuwe technologie geeft nu ook de diepere mantel van de planeet steeds meer geheimen prijs. Welke krachten zijn daar diep aan het werk, en welke gevolgen heeft dat bij ons hierboven?

De eerste generaties geologen moesten het doen met wat ze aan het aardoppervlak konden zien. Ze vormden theorieën over hoe bergen zich vormen en hoe zonlicht, water, wind, temperatuur en zwaartekracht daaruit prachtige landschappen doen ontstaan.

Voorschrijdende techniek leverde kennis op over diepere lagen, en onderzoek van de oceaanbodem leidde tot nieuwe inzichten. Na de buitenste korst, tot 35 kilometer onder onze voeten, leerden we de laatste vijftig jaar de hele 'lithosfeer' kennen, met inbegrip van de korst zo'n 100 kilometer dik. Plotseling bleek hoe 'plaattektoniek' de verschuiving van continenten regelt en hoe zich in de diepte een trage maar onverbiddelijke kringloop van traag vloeiend gesteente voltrekt.

Die kringloop hielp ons beter te begrijpen wat er om ons heen gebeurt: breuklijnen, aardbevingen, vulkanen en instabiele of (vooralsnog) stabiele pakketten gesteente.

De waarheid, weten we nu, ligt deels nog veel dieper: ónder de lithosfeer, in de diepere aardmantel, die reikt tot de grens met de kern van de aarde op ongeveer 2900 kilometer diepte.

Recente jaren brachten nieuwe verfijnde meetmethoden. Zo kunnen we steeds nauwkeuriger meten en met computers analyseren hoe schokgolven tot diep in de aarde doordringen en worden teruggekaatst. Vanuit satellieten kunnen we heel exact meten hoe de vorm van de aarde verandert.

Vulkaanuitbarstingen

Geleidelijk ontstaat nu een gedetailleerd driedimensionaal beeld van hoe de aardmantel is opgebouwd. En dus staan aardwetenschappers voor een nieuwe uitdaging: uit de structuur afleiden welke processen zich in de mantel afspelen en begrijpen hoe deze processen op hun beurt die in de aardkorst en de lithosfeer beïnvloeden. Uiteindelijk willen ze volledig begrijpen wat er op elke tijd- en ruimteschaal met aardse gesteenten

gebeurt. Het Amerikaanse tijdschrift *Science* formuleerde het enkele jaren terug zo: '*How does Earth's interior work?*'

De vraag is op zichzelf meer dan de moeite waard om te beantwoorden, maar indirect zal de kennis op tal van plekken kunnen worden toegepast. Zoals het begrip van plaattektoniek bijvoorbeeld oliemaatschappijen hielp (en helpt) nieuwe oliebronnen op te sporen, zo zal ook kennis over onderliggende processen in de mantel ons helpen gebeurtenissen op en in de planeet te voorspellen: aardbevingen en vulkaanuitbarstingen, maar ook het veranderen van oceaanstromingen en de ontwikkeling van het klimaat.

De zoektocht naar dynamiek diep in de aarde omvat vele disciplines, zoals experimenteel en seismologisch onderzoek, laboratorium- en veldonderzoek, maar steeds meer ook *computational science* en het meten van de vorm en bewegingen van de aarde vanuit de ruimte (*satellietgeodesie*), waarmee ook de groei of afkalving van poolijskappen kan worden vastgesteld.

De processen die wetenschappers aantreffen zullen naar verwachting zeer traag verlopen. Het zal niet eenvoudig zijn om uit metingen over enkele decennia af te leiden wat er op een schaal van miljoenen jaren gebeurt. Aardwetenschappers vertrouwen er echter op dat veel van hun 'foto's' veel kunnen vertellen – net zoals uit enkele korte televisieflitsen soms het verloop van een hele voetbalwedstrijd redelijk goed kan worden afgeleid.

2 WAT ZIJN DE OORZAKEN EN GEVOLGEN VAN KLIMAATVERANDERING?

Het klimaat van de aarde is in de loop van de geschiedenis vaak veranderd. Mede daardoor zijn soorten geëvolueerd of uitgestorven en zijn nieuwe soorten ontstaan. Op dit moment staat het klimaat in de belangstelling; vele van de laatste vijftien zomers behoorden tot de warmste van de laatste tweehonderd jaar. Deze opwarming kan, door de lokale weersveranderingen (natter of juist droger, meer extremen) die dat met zich meebrengt, grote gevolgen hebben voor de duurzaamheid van samenlevingen en het functioneren van ecosystemen. Nauwkeuriger voorspellingen over (het tempo van) klimaatsverandering en de gevolgen voor het leven op aarde zijn daarom van groot belang.

Hoe kunnen we klimaatsverandering beter voorspellen?

Bij het opstellen van wetenschappelijk gefundeerde korte- en langetermijnscenario's van klimaatverandering blijkt keer op keer dat we onvoldoende weten over de onderliggende fysische, chemische en biologische processen. Belangrijke voorbeelden zijn: het indirecte aerosoleffect (de invloed van stofdeeltjes in de lucht op de eigenschappen van wolken), het effect van wolken op zonnestraling, de dynamica van ijskappen, het vrijkomen van methaangas, de mengprocessen in de oceanen, verschuivingen van de CO_2-chemie van zeewater, de watercyclus en de koolstofcyclus.

Het invullen van deze kennislacunes zal leiden tot modellen die het klimaat betrouwbaarder voorspellen, voor de komende vijfentwintig jaar maar ook voor ver daarna (tot zelfs na 2100).

In de loop van de jaren zijn veel typen metingen aan het klimaat verricht, op aarde zelf maar ook vanuit de ruimte. Er is daarnaast een groeiend archief met 'proxy data' van afgeleide klimaatindicatoren, zoals metingen aan poolijskernen. Rekenmodellen beschrijven klimaatprocessen steeds gedetailleerder, en de capaciteit van supercomputers groeit nog steeds. De behoefte aan integratie van alle informatie is groot.

Welke collectieve effecten hebben de diverse terugkoppelingen in het klimaatsysteem? Kunnen we de gecombineerde onzekerheden in klimaatverandering tot 2200 kwantificeren? Het komende decennium wachten ons baanbrekende antwoorden op zulke vragen dankzij combinaties van klimaatonderzoek met terreinen als paleoklimatologie, toegepaste wiskunde, stromingsleer en `scientific computing'.

Hoe warm kan de broeikas aarde worden?

Validatie van klimaatmodellen aan historische gegevens is cruciaal om te komen tot betere voorspellingen. Goed gedateerde, gedetailleerde klimaatreconstructies gerelateerd aan veranderingen in de koolstofcyclus zijn essentieel om klimaatverandering beter te begrijpen. Het geologisch verleden van de aarde (Pleistoceen, Tertiair en Krijt) biedt daartoe de mogelijkheid door temperaturen voorspeld door klimaatmodellen te vergelijken met temperaturen zoals die met zogenaamde 'proxy's' gereconstrueerd kunnen worden. Deze proxy's zijn indirecte gegevens, die nu vooral uit boorkernen in poolijs en diepzeesedimenten worden verkregen. Er is dringend behoefte aan nieuwe proxy's (bijvoorbeeld op basis van continentale sedimenten) en verbetering van de bestaande om temperatuur en kooldioxidegehalte nog beter en verder terug te reconstrueren. Hierbij bestaat met name grote behoefte aan extra gegevens over eerdere 'broeikas'-perioden in de aardse geschiedenis.

Biologische effecten: de koolstofcyclus

De omloopsnelheid van kooldioxide in de atmosfeer is hoog. In circa zes jaar wordt alle kooldioxide in de atmosfeer opgenomen en opgeslagen door aardse planten, om later door ademhaling weer vrij te komen. Deze koolstofcyclus is gekoppeld aan de watercyclus: waar kooldioxide door de huidmondjes naar binnen gaat, verdampt water langs dezelfde route naar buiten.

Over de wisselwerking tussen de cycli, van bladcel tot en met ecosystemen, is nog onvoldoende bekend. Hoe beïnvloedt kooldioxide in de lucht, zowel biochemisch als biofysisch, de groei van bladeren, de aanleg van huidmondjes en hoeveel ze openstaan? Hoe beïnvloedt een stijgend kooldioxide-gehalte in de atmosfeer de water- en warmtehuishouding van het gehele bladerdek en de groei en productie van hout in verschillende ecosystemen?

Ecologische en evolutionaire gevolgen van klimaatverandering

Onderzoek naar ecologische gevolgen van klimaatverandering draait om drie grote vragen: hoe passen soorten hun areaal aan wanneer klimaatzones verschuiven? Hoe kunnen soorten zich functioneel en evolutionair aanpassen aan de veranderingen in hun milieu? Welke gevolgen heeft klimaatsverandering voor biodiversiteit en het functioneren van ecosystemen?

In ecosystemen werken soorten op elkaar in door middel van predator-prooi-interacties, competitie, facilitatie en symbiose. Klimaatverandering werkt echter niet voor alle soorten identiek uit. Soorten die zich snel verspreiden of snel evolueren zullen bijvoorbeeld beter in staat zijn hun areaal te verplaatsen of zich aan nieuwe omstandigheden aan te passen.

Klimaatsverandering leidt dus tot nieuwe interacties tussen soorten. Binnen een ecosysteem sterven sommige soorten uit terwijl andere van elders binnendringen. Er is behoefte aan meer kennis over hoe deze processen verlopen, en over beschermingsmaatregelen die soorten mogelijk kunnen helpen zich tijdig aan te passen aan veranderende klimaatomstandigheden.

Om toekomstige ontwikkelingen te kunnen voorspellen zal het van groot belang zijn om ecologisch en evolutionair onderzoek op individu- en gemeenschapsniveau te

koppelen aan onderzoek op procesniveau. Zulk onderzoek kan gebruikmaken van kennis over hoe soorten nu reageren op klimaatsverandering en hoe ze dat in het verleden deden. Fylogenetische kennis, over de achtergronden van soortontwikkeling, zal belangrijk zijn om de uitkomsten bij individuele soorten meer algemeen toepasbaar te maken.

3 Kunnen we zonlicht in onze volledige energiebehoefte laten voorzien?

Het licht dat van de zon op de planeet aarde schijnt, is in theorie genoeg om de hele wereld van schone en duurzame energie te voorzien. Maar in de praktijk kunnen we zonne-energie nog niet rendabel omzetten naar beter bruikbare vormen. Om de kloof tussen theorie en praktijk te overbruggen, zijn grote wetenschappelijke doorbraken nodig.

Iedere dag arriveert op onze planeet meer dan voldoende zonlicht om, theoretisch althans, onze behoefte aan energie volledig te dekken. De hoeveel energie die door zonnestraling binnenkomt overschaduwt de voorraden van eindige energiebronnen zoals olie, gas, kolen en uranium. Een grote wetenschappelijke uitdaging is om die enorme, onuitputtelijke energiebron voldoende efficiënt in bruikbare vormen van energie om te zetten.

De mens gebruikt elke dag drie vormen van energie: elektriciteit, brandstof en warmte. Elk van deze drie vormen van energie kan met zonlicht worden opgewekt. Maar vooral het omzetten van zonlicht naar elektriciteit en brandstof, via fotovoltaïsche cellen of 'biosolar cells', stelt ons nog voor levensgrote, en fascinerende, wetenschappelijke vragen.

Fotovoltaïsche zonnecellen zetten zonlicht rechtstreeks om in elektriciteit door fotonen te laten reageren met elektronen. Theoretisch zouden zonnecellen 75 tot 85 procent van het opvallende zonlicht kunnen omzetten in stroom. In de praktijk blijft het rendement tot nu toe echter steken op hooguit 25 procent; goedkopere, flexibele zonnecellen gebouwd uit organische materialen komen zelfs niet verder dan 5 procent.

Om het rendement van zonnecellen op te voeren, volgen wetenschappers diverse sporen. Zo zou het helpen meerdere kleuren uit het zonlichtspectrum te benutten in plaats van één, zoals nu. Winst zou ook te behalen zijn door reflectie van het oppervlak van de zonnecel te verminderen. Het rendement van organische zonnecellen zou misschien te verhogen zijn door organisch materiaal te combineren met goedkope anorganische materialen of systemen.

In vele onderzoekssporen zal het cruciaal zijn om het gedrag van licht op nanoschaal te bestuderen.

Biosolar cells

Veel onderzoek naar de omzetting van zonlicht in bruikbare energie laat zich inspireren door het fotosyntheseproces uit de levende natuur. Micro-organismen en planten zijn in de loop van miljarden jaren immers geëvolueerd tot hoogst efficiënte energieconversiesystemen.

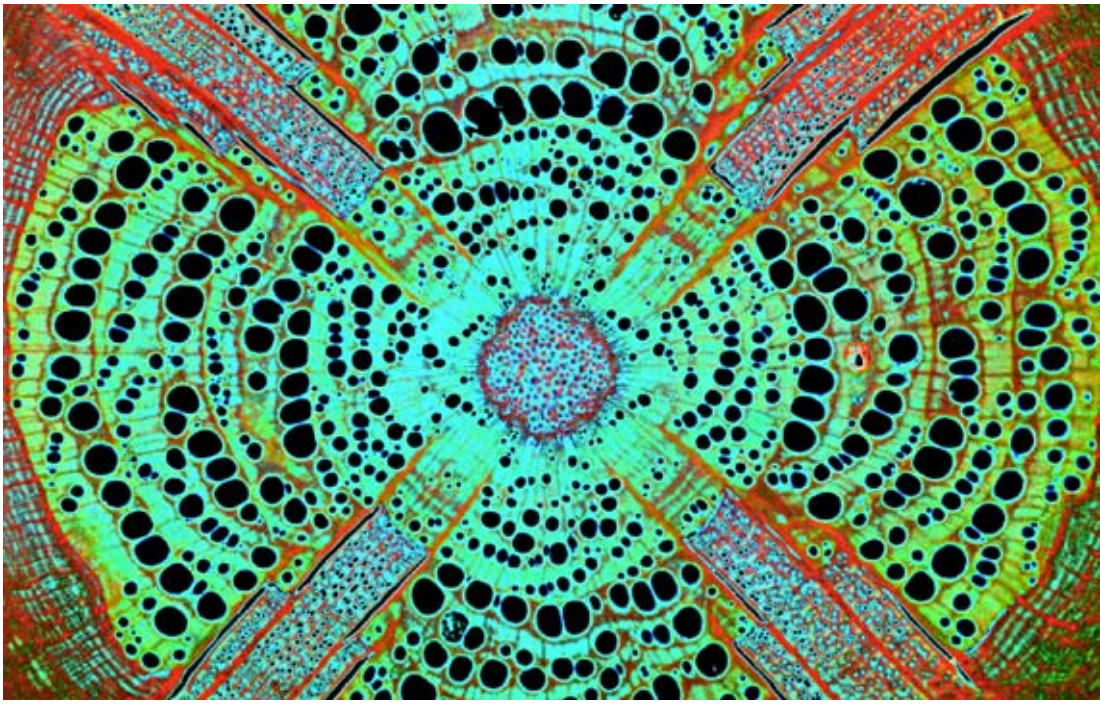
Fotosynthese komt bij heel veel organismen in de natuur voor, en die rijke variatie kan worden gebruikt om bijzonder efficiënte 'biosolar cells' te ontwerpen: biologische systemen waarin met name het eerste, fotochemische deel van de fotosynthese wordt benut en zodanig is geoptimaliseerd dat energie uit zonlicht bijzonder efficiënt wordt vastgelegd in brandstoffen of andere vormen van bruikbare energie. De erop volgende biochemische stappen waar efficiëntie verloren gaat blijven dan achterwege.

Kunnen we de fotosynthese van landbouwgewassen bijvoorbeeld verbeteren zodat per hectare rijkere oogsten kunnen worden verkregen? Kunnen we fotosynthetische cyanobacteriën of algen maken die met behulp van zonlicht kooldioxide uit de atmosfeer voldoende efficiënt weer omzetten in brandstoffen zoals ethanol of butanol? En kunnen we met een combinatie van biologische en kunstmatige componenten 'kunstbladeren' ontwikkelen die de energie uit zonlicht zéér efficiënt kunnen vastleggen in waterstofgas? En kunnen we inspiratie uit natuurlijke fotosynthese putten om synthetische fotosynthetische processen te ontwerpen die zonlicht in energie kunnen omzetten zonder tussenkomst van levende organismen?

4 HOE REAGEREN PLANTEN OP HUN OMGEVING?

Dieren kunnen, als het ze ergens niet bevalt, maken dat ze wegkomen. De meeste planten niet: die staan met hun wortels vast in de grond. Zij moeten zich dus des te beter kunnen verweren tegen hun vijanden en weten om te gaan met ongunstige omstandigheden. Hoe doen ze dat?

Pas de laatste jaren beginnen onderzoekers te begrijpen hoe ingenieus de afweer van planten in elkaar steekt. Planten blijken bliksemsnel te kunnen reageren, waarschuwen elkaar via signaalstoffen en bieden onderdak aan allerlei organismen die hun in de strijd om te overleven kunnen helpen. Daarnaast kunnen planten hun groei aanpassen aan de omstandigheden.



Planten zijn door de eeuwen heen steeds een buitengewoon leerzaam studieobject voor de wetenschap geweest. Niet alleen omdat planten als voedsel kunnen dienen en nuttige stoffen leveren – van aspirine en rubber tot kinine en sinaasappelsap – maar ook omdat biologische processen soms veel gemakkelijker kunnen worden bestudeerd in planten dan in proefdieren. Het wordt nog wel eens vergeten, maar cellen, genen, telomeren, het mechanisme van *RNA silencing* en DNA-recombinatie zijn allemaal het eerst in planten ontdekt.

Planten hebben daarnaast de bijzondere (en zeer bruikbare) eigenschap dat ze vermeerderd kunnen worden door stekken: vanuit een enkele plantencel kan een volledige, nieuwe, levensvatbare plant ontstaan.

Belagers

De plant maakt van al deze mogelijkheden goed gebruik – hij groeit in de richting van waar het licht vandaan komt, hij bloeit in het juiste jaargetijde, hij kan weerstand bieden aan droogte maar ook aan overstromingen en vraatzuchtige belagers.

Ook gewassen beschikken over verschillende afweermechanismen om infectie door micro-organismen en vraat door herbivoren te voorkomen. Ten eerste hebben zij een soort basis-afweersysteem vergelijkbaar met dat van dieren: bij een aanval produceren ze stoffen die ze minder toegankelijk maken voor microben en virussen en minder verteerbaar, of zelfs giftig, voor insecten en planteneters. Een belangrijke vraag hierbij is natuurlijk: hoe weten ze dat ze worden aangevallen? Die vraag is nog lang niet geheel beantwoord, maar het heeft te maken met patroonherkenning van binnendringers; hierdoor houden ze het grootste deel van potentiële belagers buiten de deur.

Planten kennen daarnaast een soort 'verworven afweer' waarmee ze zich verweren tegen een scala aan belagers. Hierin spelen boodschappermoleculen als salicylzuur (bekend van de aspirine) en jasmonzuur een belangrijke rol. Ook zijn er epigenetische effecten die de plant, als het ware, een geheugen geven dat in het DNA is ingeprent.

Groei en ontwikkeling van planten worden sterk beïnvloed door de externe condities. Hun statuur wordt op de omgeving aangepast. De laatste jaren zijn sleutelgenen geïdentificeerd die zijn betrokken bij patroonvorming en ontwikkeling, en is duidelijk geworden dat deze genen verknoopt zijn aan de regulatienetwerken die immuniteit en resistentie bepalen. Een brede batterij aan moderne onderzoekstechnieken, van grootschalig DNA-sequencen, proteomics en metabolomics tot supercomputers en straffe wiskunde, worden in stelling gebracht om meer helderheid over deze regulatienetwerken te verschaffen.

De verkregen antwoorden zijn niet alleen wetenschappelijk buitengewoon interessant, maar zullen ook kunnen helpen bij het ontwerpen van optimaal aangepaste gewassen in onze land- en tuinbouw.

5 Vormen micro-organismen samen een macro-organisme?

We zijn gewend te denken dat bacteriën, schimmels en andere micro-organismen allemaal enigszins langs elkaar heen leven. Ze maken soms gebruik, soms misbruik van elkaar, maar voor het overige is het ieder voor zich. Maar klopt dat beeld wel? Vormen al die micro-organismen tezamen niet een groot netwerk, een 'microbioom', dat moet worden bestudeerd in al zijn samenhang?

We zien ze meestal niet, maar micro-organismen zoals bacteriën en schimmels vormen de meest talrijke levensvorm op aarde. Sterker, zonder micro-organismen zou er geen leven op aarde mogelijk zijn. Ze spelen een sleutelrol in allerlei opbouw- en afbraakprocessen, ze zijn belangrijk bij het vastleggen en doorgeven van zonne-energie, en ze zijn voor de mens van levensbelang alleen al omdat ze in grote aantallen ons lichaam bevolken en bijvoorbeeld onmisbaar zijn bij het verteren van voedsel.

Anderzijds is een klein deel van de micro-organismen onze vijand geworden: pathogenen infecteren niet alleen onszelf, maar ook dieren en planten waarvan wij afhankelijk zijn. Sommige pathogenen huizen in dieren maar kunnen ook mensen besmetten met als resultaat 'zoönosen' zoals de Ziekte van Lyme, vogelgriep en Q-koorts.

Door overmatig gebruik van antibiotica tegen pathogene micro-organismen raakt resistentie steeds wijder verbreid. Dat maakt de bestrijding van sommige micro-organismen steeds lastiger.

Darmen

In elk ecosysteem zijn talloze verschillende micro-organismen aanwezig waarvan de functie en de onderlinge relaties nog onbekend zijn. Bedenk dat in een schepje grond duizenden soorten micro-organismen voorkomen die, met hun genetische informatie, samen grote netwerken vormen.

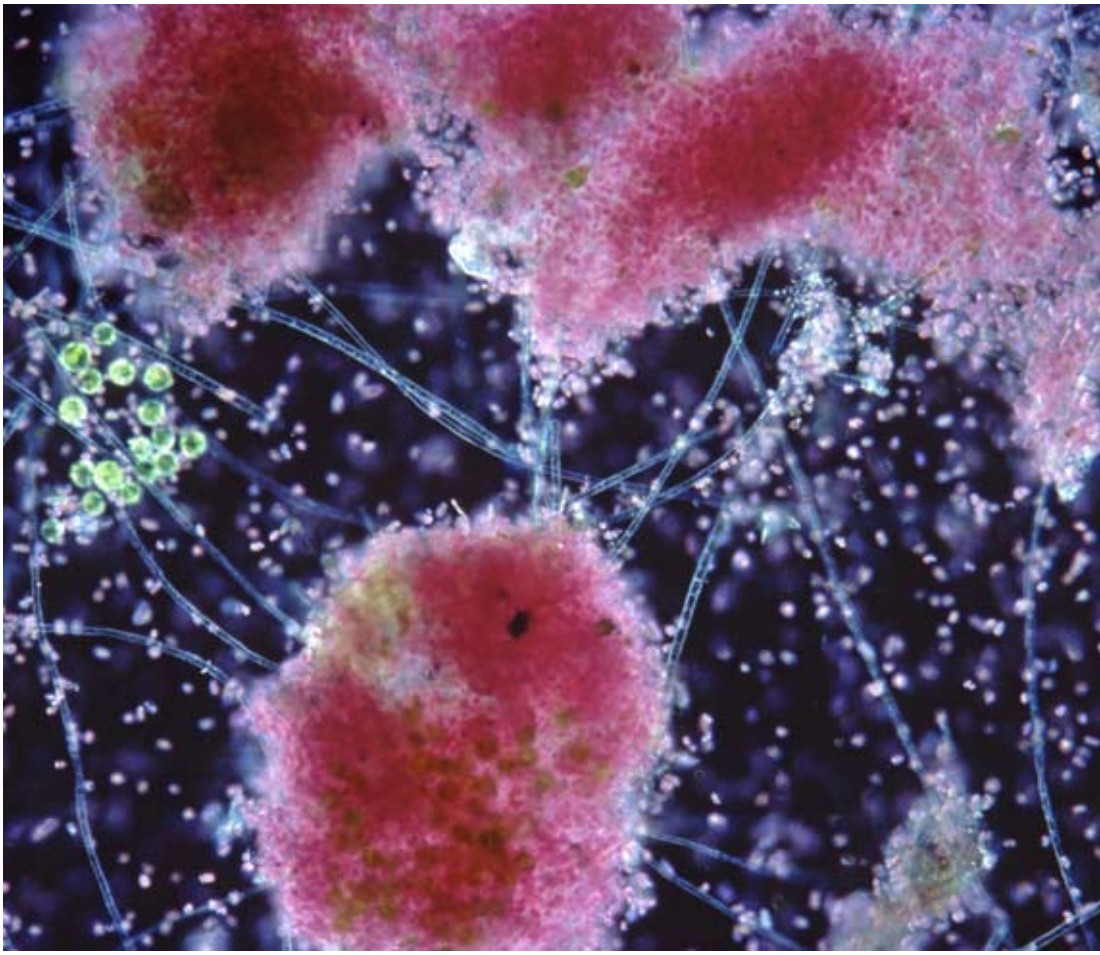
Ook in ons eigen lichaam overtreft het aantal genen van bacteriën in onze darmen verre dat van onze eigen genen: we weten dat dit 'microbioom' in de darm grote invloed heeft op onze ontwikkeling en gezondheid, maar hoe dat gebeurt is de vraag.

Ook al lukt het bij het overgrote deel van al deze micro-organismen nog niet om ze te kweken, met nieuwe methoden kunnen we ze wel alvast genetisch analyseren. De grote uitdaging is nu om uit de informatie over al dit genetisch materiaal inzicht te destilleren over de beschikbare functies en de onderlinge relaties van deze, al dan niet samenwerkende, micro-organismen; hun bijdrage aan natuurlijke en door de mens gemaakte

ecosystemen; en hun eventuele 'zwakke' en 'sterke' plekken, die van pas zouden kunnen komen bij het bestrijden van schadelijke micro-organismen.

Hoe wordt het systeem beïnvloed als er ergens een schakel uitvalt? Kan zo'n schakel wel straffeloos uit het netwerk worden verwijderd, of breekt dan de ketting? Hoe sterk is die ketting? Is er werkelijk sprake van een netwerk, of moeten we het toch meer zien als afzonderlijke micro-organismen die allemaal gewikkeld zijn in hun eigen strijd om te overleven?

Deze wetenschappelijk intrigerende vragen hebben tegelijk ook een groot maatschappelijk belang. Ze zijn essentieel voor ons inzicht in het functioneren en voorspellen van ecosystemen, en voor toepassingen in de landbouw, de geneeskunde, de voedingsmiddelen- en de farmaceutische industrie.



5.3.
BRuNO MallARt

III. COMPLEXITEIT EN WISKUNDE

6 Kunnen we onze informatiesystemen straks nog beheersen?

Informatietechnologie is doorgedrongen tot alle aspecten van ons maatschappelijke, zakelijke, sociale en persoonlijke leven. Van bankpas en navigatiesysteem tot buienradar, informatica is volstrekt onmisbaar geworden. Maar om de betrouwbaarheid en kwaliteit van steeds grotere en complexere informatietechniek te kunnen garanderen, zullen antwoorden op fundamentele vragen nodig zijn.

Vier op de vijf Nederlandse huishoudens heeft internet. Dat is het hoogste percentage in Europa. De wereld ligt virtueel onder onze vingertoppen: altijd en overal kunnen we informatie uitwisselen met anderen die ook 'online' zijn. Dat verandert ons werk, ons leefpatroon en zelfs onze familie- en vriendschapsbanden.

Ook in de economie is informatica diep doorgedrongen. Vijftig jaar na de eerste computers is onze welvaart een *digitale* welvaart geworden. Sterke Nederlandse bedrijfstakken, zoals logistiek, land – en tuinbouw en financiële dienstverlening, maar ook de zorg en de overheid, zijn door informatietechnologie ingrijpend veranderd.

Het internet is inmiddels de grootste en meest complexe machine die de mens ooit heeft gebouwd. De komende jaren zal het zich uitbreiden tot een *internet of things*, waarin ook allerlei objecten via draadloze netwerken continu met elkaar verbonden zijn.

Betrouwbaar

De alomtegenwoordigheid van informatica maakt ons sterk én kwetsbaar. Een computervirusinfectie, een computerinbraak of een falend systeem kan direct (digitale) schokgolven door de wereld zenden.

De hard- en software die al onze systemen laten functioneren, worden steeds groter en complexer, en de capaciteit van netwerken en dataopslag neemt in razend tempo toe. Binnenkort lopen we aan tegen de grenzen van wat nu maakbaar en beheersbaar is. Op dit moment zijn 270 miljoen websites geregistreerd en daaraan zijn systemen gekoppeld die uit miljoenen regels broncode bestaan. Daarmee zijn de grenzen bereikt van wat met de huidige methoden en technieken te doorgronden is.

Willen we in de toekomst nog grotere systemen bouwen, complexer dan de huidige, en tegelijk meer betrouwbaar, dan zal een beter fundamenteel inzicht nodig zijn in vragen rond het ontwerpen, bouwen, onderhouden, analyseren en verbeteren van hard- en software. Willen we over tien jaar met onze iPhone 15 soepel en betrouwbaar

videoconferenties kunnen houden in het vliegtuig, dan moeten we nu goede antwoorden zoeken op een aantal centrale vragen in de informatica.

Een voorbeeld van het reduceren van complexiteit is het integreren van vele nu nog langs elkaar heen werkende netwerken, soms over één en dezelfde kabel. Door diensten als telefonie, televisie, data en rekencapaciteit onder te brengen in één netwerk besparen we complexiteit, energieverbruik, onderhoud, vereenvoudigen we het aanbieden van nieuwe diensten en maken we de totale dienstverlening meer betrouwbaar.

Ook op een nog dieper niveau zijn er vele vragen. Hoe kunnen we complexe informatiesystemen goed beschrijven en analyseren? Hoe kunnen we de kwaliteit en betrouwbaarheid van een systeem specificeren en meten? Hoe kunnen we verschillende systemen combineren?

Hoe kunnen we systemen ontwerpen waarin afzonderlijke processoren door onderlinge netwerkverbindingen efficiënt kunnen samenwerken in een veel groter geheel? Kunnen we informatiesystemen ontwerpen die bij zichzelf fouten kunnen diagnosticeren, wellicht zelfs repareren? Hoe kunnen we systeemprestaties optimaal specificeren, voorspellen en meten?

Nederland heeft een goede uitgangspositie voor het bereiken van nieuwe doorbraken, niet alleen via opwindende toepassingen maar ook bij het vinden van antwoorden op prangende fundamenteel-wetenschappelijke vragen.

7 WAT KUNNEN WE ZEGGEN OVER DE TOEKOMST VAN EEN CHAOTISCH SYSTEEM?

De wiskundige vergelijkingen die het gedrag van complexe systemen zoals het aardse klimaat beschrijven, zitten zo ingewikkeld in elkaar dat er een apart vakgebied omheen is ontstaan: de wiskunde van grootschalige dynamische systemen. Meer begrip van de onderliggende wiskunde kan leiden tot betere voorspellingen van 'chaotische' processen – zoals het klimaat of het ontstaan van files in het verkeer.

De studie van dynamische systemen en 'chaos' is een van de belangrijkste wetenschappelijke ontwikkelingen van de laatste vijftig jaar. Voor die tijd dachten velen dat, als we alle wetten van de natuur maar zouden kennen, elk verschijnsel te voorspellen zou zijn. Maar in de zestiger jaren leerde de chaos-theorie ons dat verschijnselen intrinsiek onvoorspelbaar kunnen zijn.

Complexe systemen die op het eerste gezicht door eenvoudige wetmatigheden worden gedreven, blijken 'chaotisch gedrag' te kunnen vertonen: kleine veranderingen kunnen leiden tot grote gevolgen.

Chaotisch gedrag is gevonden in bijvoorbeeld de populatiegroei van levende organismen, de fluctuaties van beurskoersen, de ritmiek van het hart, de doorstroming van het verkeer, bewegingen van planeten en, natuurlijk, in weer en klimaat van de aardse atmosfeer.

In de jaren zeventig en tachtig ontwikkelde de Nederlander Floris Takens een methode om uit een reeks waarnemingen de belangrijkste dynamische kenmerken van een chaotisch systeem te reconstrueren. Zijn werk wordt inmiddels ook buiten de wiskunde toegepast.

EL Niño

Het klimaat is één van de grote, dynamische systemen waar de mens mee te maken heeft. De ontwikkeling van het klimaat hangt onder meer sterk samen met atmosferische- en oceaancirculaties.

Twee voorbeelden van oceaancirculaties met grote invloed op het klimaat zijn El Niño (een periodieke opwarming van het zeewater voor de westkust van Zuid-Amerika) en de Atlantic Multidecadal Oscillation (een periodieke temperatuurschommeling van het oppervlaktewater in de Noord-Atlantische Oceaan).

Meteorologen zijn primair geïnteresseerd in de klimatologische gevolgen van deze oceaanstromingen, wiskundigen zoeken naar de onderliggende wiskundige principes van het systeem. In Nederland werken wiskundigen samen met meteorologen van het KNMI.

Klimaatmodellen zijn inherent chaotisch, en dat bemoeilijkt voorspellingen op de lange termijn. Zoals het weer maximaal tien dagen vooruit kan worden voorspeld, zo zouden er ook fundamentele grenzen kunnen zijn aan de voorspelbaarheid van het klimaat. Zulke grenzen zijn het terrein voor wiskundigen. Welke onderdelen van een chaotisch systeem zijn voorspelbaar, en welke niet? Hoe verandert het klimaat wanneer bijvoorbeeld de uitstoot van broeikasgassen vermindert of juist verder gaat toenemen?

Bij de studie van grootschalige dynamische systemen speelt het doorrekenen van modellen door middel van computerprogramma's een cruciale rol. Daarbij is niet alleen de numerieke wiskunde nodig, voor het oplossen van vergelijkingen, maar ook de computationele meetkunde, als visualisatietechniek voor het verwerken en interpreteren van de gegevens.

Ondanks vijftig jaar chaos-theorie begeeft de wiskunde van grootschalige dynamische systemen zich nog regelmatig op onontgonnen terreinen. Telkens blijkt dat wiskunde niet alleen nieuwe toepassingsgebieden kan inspireren, maar dat, omgekeerd, die toepassingen ook de wiskunde kunnen beïnvloeden.

8 Streven computers straks zelfs wiskundigen voorbij?

Het bedenken van een nieuw wiskundig bewijs is nog voorbehouden aan een creatief brein. Maar controleren of een wiskundig bewijs klopt, daarvoor zijn al computerprogramma's ontworpen. Inmiddels worden bewijzen echter zó ingewikkeld dat ze door mensen niet meer te toetsen zijn. Slagen computers straks waar wiskundigen nu zelf nog falen?

Elke groenteboer weet hoe hij zoveel mogelijk sinaasappelen in een kistje krijgt. Maar wiskundig bewijzen dat deze 'sinaasappelstapeling' echt het meest efficiënt is, dat valt lang niet mee. Vervolgens ook nog bewijzen dat het bewijs waterdicht was, dat is nóg moeilijker.

De Nederlander Dick de Bruijn was in 1968 de belangrijkste pionier bij het ontwerpen van 'bewijsassistenten' – computerprogramma's die kunnen helpen bij het controleren van een wiskundig bewijs. De pioniers zetten fundamentele bewijsstappen, door wiskundigen in hun hoofd gemaakt, om in een voor computers begrijpelijke, logische taal. Eenmaal voltooid liep de bewijsassistent alle stappen van een bewijs na en controleerde of ze voldeden aan de logische regels. Klopte er iets niet, dan gaf het programma aan wat er mis ging, en waar.

Sindsdien hebben Nederlandse wiskundigen en logici, samen met collega's in het buitenland, het pionierswerk voortgezet. Ze creëerden nieuwe logische talen en verzamelden tal van oude bewijzen van stellingen, die ze gebruikten om bewijsassistenten sneller en slimmer te maken.

Inmiddels hebben computerprogramma's al meer dan tachtig van de honderd 'mooiste' wiskundige bewijzen gecontroleerd. Van die tachtig bewijzen hadden wiskundigen zelf ook al vastgesteld dat ze absoluut klopten. In de wiskunde is dat belangrijk: het bewijs voor een stelling geldt voor de eeuwigheid.

Honderd procent

Tot nu toe doen bewijsassistenten dus wat mensen ook kunnen – ze doen het alleen sneller en zien nooit een foutje over het hoofd. De vraag is of we assistenten kunnen ontwerpen voor bewijzen die te groot en te ingewikkeld zijn geworden voor het menselijk brein – zoals het bewijs dat de groenteboer zijn sinaasappelen optimaal stapelt.

Het bewijs voor de sinaasappelstapeling werd in 1998 door wiskundigen geleverd. Daarna waren twaalf collega-wiskundigen vier jaar bezig om te controleren of het correct was. Zelfs na die vier jaar wisten ze het echter nog niet helemaal zeker. Ze zijn er

99 procent zeker van dat het bewijs klopt – maar wiskunde is onbarmhartig en eist honderd procent.

Een computerprogramma dat zou slagen waar mensen falen, zou iets nieuws toevoegen aan de wiskundige wetenschap.

Voor wiskundigen en logici is dat een intrigerend vooruitzicht, maar bewijsassistenten hebben meer in petto dan het fascineren van wetenschappers. Het met honderd procent zekerheid controleren van een logisch systeem kan bijvoorbeeld ook worden gebruikt om ontwerpen voor computerhardware en -software foutloos te maken.

In 1994 verloor chipfabrikant Intel veel geld door een fout in de Pentium-rekenprocessor. Om te voorkomen dat zoiets opnieuw gebeurt, gebruikt het bedrijf nu een computerprogramma. Ook de chips in de iPod en veel mobiele telefoons zijn door computerprogramma's gecontroleerd.

Een mathematisch bewijs voor honderd procent controleren, dat was tot nu toe exclusief weggelegd voor wiskundigen. Het wachten is op het moment dat computers het beter kunnen dan zij.

9 Waar ligt de grens tussen het berekenbare en het onberekenbare?

Voor de wiskunde en de informatica is het een open vraag of alle grootschalige rekenproblemen uiteindelijk zijn op te lossen met brute rekenkracht. Wiskundigen vermoeden dat sommige complexe rekenproblemen de macht van de computer fundamenteel te boven gaan. Maar zolang niemand dat heeft bewezen, leeft de hoop dat het schijnbaar onoplosbare toch oplosbaar zal blijken te zijn.

Voor het vinden van de kortste route tussen twee punten op een wegenkaart bestaat een snelle rekenkundige oplosmethode, die we danken aan de in 2002 overleden Nederlandse informaticus Edsger Dijkstra. De navigatie-apparatuur in onze auto gebruikt die methode om ons snel van het ene naar het andere punt te gidsen.

Complexe rekenproblemen waarvoor een snelle oplossingsmethode bestaat, noemen wiskundigen 'P-problemen'. Helaas zit de wereld vol met rekenproblemen waarvoor zo'n snelle oplosmethode nog niet is gevonden. Zij worden 'NP-volledige problemen' genoemd.

Voorbeelden zijn het ontwerpen van schoolroosters en dienstregelingen, het routeren van transportmiddelen, het bepalen van de beste locaties voor distributiepunten en het voorspellen van de driedimensionale structuur van biologische eiwitten.

Voor NP-volledige problemen is weliswaar geen snelle oplosmethode voorhanden, maar als op de een of andere manier toch een oplossing is gevonden, kunnen we die vaak wel snel verifiëren. Zo hebben we geen snelle methode om de priemfactoren van het getal 4.294.967.297 te vinden, maar kunnen we wel eenvoudig verifiëren dat 641 en 6.700.417 geldige priemfactoren zijn (immers: 641 × 6.700.417 = 4.294.967.297).

Dit 'eenrichtingsverkeer' van NP-volledige problemen gebruiken banken om digitale transacties te beveiligen.

Als voor één NP-volledig probleem een snelle oplosmethode wordt gevonden, dan zijn ook alle andere NP-volledige problemen snel oplosbaar. Omgekeerd geldt hetzelfde: als een NP-volledig probleem géén snelle oplosmethode heeft, dan is dat ook zo voor alle andere NP-volledige problemen. Schijnbaar 'onoplosbare' NP-volledige problemen zijn onderwerp van veel onderzoek.

Rekentijd

Voor NP-volledige problemen geldt dat de rekentijd vooralsnog exponentieel toeneemt met de grootte van het probleem. Ook niet al te grote, in de praktijk voorkomende NP-

volledige problemen zijn op dit moment onoplosbaar, zelfs al zouden alle computers ter wereld er miljoenen jaren op ploeteren. In de praktijk creëren wiskundigen dus methoden om de uitkomst te benaderen zonder dat de rekentijd uit de hand loopt. Nederlandse wiskundigen ontwikkelden zo bijvoorbeeld de methode waarmee de Nederlandse Spoorwegen in 2007 een nieuwe treindienstregeling ontwierpen.

De fundamentele wiskundige vraag is echter of NP-volledige problemen misschien zijn te vereenvoudigen tot P-problemen. Die vraag is ook van groot praktisch belang. Als NP-volledige problemen op de een of andere manier zouden zijn te vereenvoudigen tot P-problemen, dan zou dat betekenen dat we ook snelle oplosmethoden kunnen vinden voor problemen die nu nog te lastig zijn. Als echter bewezen kan worden dat NP-volledige problemen fundamenteel verschillen van P-problemen, dan geeft dat nieuw inzicht in de oorzaak van de complexiteit van problemen.

De vraag 'NP = P?' is dan ook één van zeven *Millennium Prize Problems*: belangrijke, klassieke, onopgeloste wiskundige vragen die in 2000 werden geselecteerd door het Clay Mathematics Institute in Cambridge, Massachusetts. Voor de oplossing ervan werd één miljoen dollar uitgeloofd.

10 Hoe kan uit enkele foto's een betrouwbaar beeld van de realiteit worden bepaald?

Een modern ziekenhuis heeft imposante scanners die pretenderen te laten zien hoe ons lichaam er van binnen uit ziet. Weinigen realiseren zich dat geavanceerde wiskundige technieken nodig zijn om op basis van slechts enkele beelden toch een nauwkeurige reconstructie van de werkelijkheid te maken.

Naar schatting tachtig procent van alle diagnoses in de hedendaagse gezondheidszorg zijn mede gebaseerd op beeldvormende technieken. Een beetje ziekenhuis staat vol high-tech apparaten die scans kunnen maken van hersenen, hart, longen en wat al niet meer.

Medici willen uit de geproduceerde scans zoveel mogelijk de reële eigenschappen van het gescande orgaan kunnen afleiden. Het betrouwbaar herleiden van enkele scans

naar het origineel is in de praktijk echter niet zo eenvoudig. Uit één serie beelden zijn meestal diverse werkelijkheden te reconstrueren, ook al is er in werkelijkheid natuurlijk maar één origineel.

Het probleem speelt niet alleen bij medische scans. Het komt ook om de hoek kijken bij het interpreteren van één of slechts enkele beelden van een beveiligingscamera, of bij het in kaart brengen van het binnenste van een ruwe diamant.

Sinds Antoni van Leeuwenhoek in de zeventiende eeuw de microscoop verfijnde, heeft de beeldvormingtechniek zich onvoorstelbaar ver ontwikkeld. Tegenwoordig wordt goede beeldvorming echter niet alleen bepaald door de kwaliteit van optische lenzen; ook de verwerking van beeldgegevens is cruciaal. Wiskundige methoden bepalen hoe uit digitale beelden zoveel mogelijk over het origineel kan worden achterhaald.

Hoe meer beelden, hoe betrouwbaarder het beeld van de werkelijkheid zal zijn. Maar in de praktijk is het aantal beelden vaak beperkt. Artsen willen computer-tomografie (CT) scanners zo min mogelijk foto's laten maken omdat de röntgenstraling schadelijk is voor de patiënt. Tijdens een winkeloverval heeft de beveiligingscamera meestal slechts enkele bruikbare foto's van de verdachte gemaakt.

Rekenen met voorkennis

Wiskundigen staan voor de uitdaging om rekenmethoden te ontwikkelen die, met een minimum aan gegevens, de werkelijkheid met maximale betrouwbaarheid reconstrueren. De sleutel tot de oplossing is het gebruik van voorkennis. In veel gevallen betreft dit 'a priori kennis' over de structuur van een materiaal of over de vorm van het gescande voorwerp.

Deze aanpak stelt wiskundigen echter voor problemen die niet meer vallen binnen een van de klassieke terreinen van het vak: de discrete wiskunde (van telbare dingen) en de continue wiskunde (van aaneengesloten objecten zoals lijnen, krommen en doorlopende schalen). De te ontwikkelen rekenmethoden moeten worden opgebouwd uit een combinatie van die twee, traditioneel streng gescheiden, disciplines.

Nederlandse wiskundigen hebben al reconstructiemethoden ontwikkeld die gebruik maken van voorkennis. Ze worden toegepast in materiaalonderzoek, biomedisch onderzoek en industriële kwaliteitscontrole.

Vergelijkbare rekenmethoden zouden in principe ook kunnen worden ontwikkeld voor reconstructie van medische magnetic resonance imaging (MRI) scans, voor het scherper maken van wazige camerabeelden en voor het oplossen van vele verwante beeldconstructieproblemen.

De komende jaren willen wiskundigen proberen te komen tot een algemene theorie, en tot zo breed mogelijk toepasbare rekenmethoden. En ze hopen antwoord te vinden op een fundamentele vraag: hoeveel beelden zijn minimaal nodig om een voorwerp volledig en correct te beschrijven?

11 WAT KUNNEN WE WEL EN NIET BEREKENEN UIT HET LANGLANDS-PROGRAMMA?

Door de eeuwen heen is vaak gebleken dat zuivere wiskunde, die begint zonder enige toepassing in het achterhoofd, uiteindelijk onontbeerlijk is voor het oplossen van een praktisch probleem. Dat geldt in het bijzonder voor het 'Langlands-programma', een serie vermoedens die wiskundigen wereldwijd de weg wijst naar nooit eerder betreden paden in het vak.

De gereedschapskist van de wiskunde bestaat uit getallen (gehele getallen, breuken, decimale getallen), figuren en ruimtelijke voorwerpen (driehoeken, cirkels, piramiden en bollen) en meer abstracte structuren (relaties en verzamelingen). De klassieke wiskunde bestudeert het 'discrete' en het 'continue' los van elkaar: rekenkunde en algebra gaan over het discrete; meetkunde en analyse bestrijken het continue. Pas sinds het begin van de twintigste eeuw zijn de twee disciplines in de moderne wiskunde met elkaar verweven geraakt.

Typisch voor deze verwevenheid is een serie vermoedens die de Canadese wiskundige Robert Langlands eind jaren zestig formuleerde. Langlands had aanwijzingen, maar geen bewijzen, dat ogenschijnlijk geheel gescheiden takken van de wiskunde diep op de achtergrond toch met elkaar verbonden zijn via symmetrieën aan beide kanten. Zijn serie vermoedens werd het 'Programma van Langlands' genoemd en is tot op heden een wiskundige inspiratiebron. Wiskundigen schatten dat minder dan een procent van het Langlands-programma tot op heden is onderzocht.

Fermat

Het meest spectaculaire resultaat van de toepassing van het Langlands-programma was het bewijs van de laatste stelling van Fermat, dat in 1995 door Andrew Wiles werd gepubliceerd. Na acht jaar eenzaam werk bewees Wiles dat Fermats vermoeden uit 1637 juist was: 'voor n groter dan 2 kan een n-de macht niet als de som van twee andere n-de machten worden geschreven.'

Voor klassieke wiskundigen gaat de stelling van Fermat over getaltheorie. Wiles liet echter zien dat de stelling diep op de achtergrond verbonden is met de meetkunde, en juist die verbondenheid was de sleutel tot het bewijs.

Het Langlands-programma kan op meerdere manieren worden onderzocht. Eén manier kijkt vooral naar welke stellingen eruit volgen: stellingen die zeggen dat één uitdrukking gelijk is aan een andere. Wiskundigen noemen dit de 'existentiële' benadering.

De 'expliciete' benadering daarentegen draait vooral om de vraag wat je, gegeven de stellingen uit de existentiële benadering, kunt berekenen. Lang niet alle objecten in wiskundige stellingen en formules laten zich namelijk berekenen. En zelfs al zijn ze in principe door computerprogramma's berekenbaar, dan nog kan het zijn dat de computer-rekentijd in de praktijk volstrekt uit de hand loopt.

De laatste decennia hebben Nederlandse wiskundigen een sterke traditie opgebouwd in deze expliciete benadering van het Langlands-programma.

De opkomst van de computer heeft de interesse voor de expliciete Langlands-aanpak sterk aangewakkerd. Computers kunnen namelijk wiskundige uitdrukkingen berekenen die voordien onberekenbaar waren. Op die manier heeft de computer nieuwe wegen in de zuivere wiskunde geopend.

De nieuwe wegen blijken soms te leiden tot onverwachte praktische toepassingen. Zo heeft de expliciete benadering van het Langlands-programma gevolgen gehad voor het versleutelen van informatie (cryptografie) en voor de analyse van complexe interferentiepatronen in natuurkundige experimenten. En als inspiratiebron is het 'Programma van Langlands' nog lang niet uitgeput.

IV. CULTUUR EN IDENTITEIT IN HEDEN EN VERLEDEN

12 WIE WAREN DE VROEGSTE MENSACHTIGE BEWONERS VAN NOORDWEST-EUROPA?

Recente ontdekkingen rond het Noordzee-bekken, aan de oostkust van Engeland, tonen aan dat Noordwest-Europa mogelijk al een miljoen jaar geleden menselijke bewoning kende. Dat is veel eerder dan tot nu toe bekend was. Archeologisch en geologisch onderzoek in de diepte van dit bekken kan onthullingen opleveren over deze noordelijke expansies.

Noordwest-Europa vormde altijd de marge van het verspreidingsgebied van vroege mensachtigen en is daarom, mondiaal gezien, een ideaal studiegebied om te achterhalen hoe deze mensachtigen zich aanpasten aan de noordelijke breedtegraden.

Tijdens de IJstijd overleefden veel planten en dieren in Europa de koudste perioden in zuidelijke oorden, van waaruit zij zich weer uitbreidden zodra verbeteringen in klimaat en omgeving dat toelieten. Het is aannemelijk dat de verspreidingsgebieden van vroege mensachtigen in Europa aan soortgelijke fasen van krimp en groei onderhevig waren. Noordwest-Europa vormde een *sink*, een gebied dat telkens vanuit *source*gebieden, delen van de 'oude wereld' zoals het Mediterrane bekken, bevolkt werd.

Sink-gebieden zijn interessant omdat zij ons iets kunnen vertellen over de ecologische tolerantie van vroege mensachtigen, vanaf het allereerste begin, in deze regio's mogelijk 1,8 miljoen jaar geleden, tot en met het verdwijnen van de Neanderthalers, circa 35 duizend jaar geleden.

Multidisciplinair archeologisch en geologisch veldwerk en laboratoriumstudies maken het mogelijk om de ecologische achtergrond van de vroegste Europese bewoners in kaart te brengen en te interpreteren. Door zulk onderzoek begrijpen we uiteindelijk beter hoe deze mensachtigen zich aanpasten aan het leven in Europese gebieden.

Wanneer we eenmaal weten waar en wanneer vroege mensachtigen rond het Noordzee-bekken hebben geleefd, zullen we die informatie kunnen relateren aan onze kennis over de source-gebieden. Zo zullen we de relaties tussen sink- en source-populaties in kaart kunnen brengen, uitspraken kunnen doen over de overlevingskansen van vroege mensachtigen in noordelijke regio's en beter weten hoe vaak Noordwest-Europa vanuit het zuiden opnieuw werd gekoloniseerd.

Zulke kennis vertelt ons veel over Europa, maar is ook cruciaal voor het begrijpen van de mondiale migratiegeschiedenis van vroege mensachtigen.

Speld in hooiberg

Archeologisch onderzoek vindt nu noodgedwongen plaats aan de randen van het Noordzee-bekken, dus langs locaties aan de Nederlandse en Britse kusten die relatief goed toegankelijk zijn. De recente vondst van een Neanderthaler-fossiel in een Pleistocene afzetting voor de kust van Zeeland toonde ten overvloede het grote archeologisch potentieel van het Noordzee-bekken.

Archeologisch verreweg de interessantste sedimentlagen van het bekken bevinden zich echter onder water, aangezien elfduizend jaar geleden (na het laatste glaciaal) de zeespiegel fors is gestegen. Grote gebieden waar ooit jagers en verzamelaars woonden, liggen nu onder de Noordzee.

Daar, in de zeebodem, zoeken naar archeologische schatten is vergelijkbaar met zoeken naar een speld in een hooiberg, en doorgaans veel te kostbaar. Dankzij samenwerking tussen archeologen, geologen en de grond- en zandwinningindustrie zal zeebodemonderzoek de komende decennia echter toch kunnen worden aangevat. Wetenschappers zullen bodemmonsters analyseren die omhoog komen bij commerciële proefboringen en zo veelbelovende archeologische locaties kunnen opsporen. Andersom zullen bedrijven profiteren van de opgedane geologische inzichten.

Zo kan fundamenteel en toegepast onderzoek samen antwoord vinden op de vraag wie onze vroegste Noordwest-Europese voorouders waren, en in wat voor wereld ze leefden.

13 WAT BETEKENEN OUDE BESCHAVINGEN VOOR DE EUROPESE CULTUUR VAN VANDAAG?

Het Oude Nabije Oosten is de bakermat van de Europese cultuur. Veel belangrijke elementen van onze huidige wereld, zoals ons dagelijks brood, het alfabet en de bijbel, stammen uit het Nabije Oosten. Onderzoek naar de geschiedenis van dit gebied helpt ons onze eigen wortels en het ontstaan van onze moderne samenleving beter te begrijpen.

De cultuurhistorische betekenis van het Nabije Oosten (of Midden-Oosten: Turkije, Syrië, Libanon, Israël, Jordanië, Palestina, Irak, Iran, Egypte en het Arabische schiereiland) is zonder weerga. Ons graan stamt uit het heuvelland van Anatolië en Syrië; ons alfabet komt van de Phoeniciërs; het wiel en de wiskunde werden ontwikkeld in Mesopotamië, en via de Grieks-Romeinse smeltkroes van Oost en West bereikten ons de grote wereldgodsdiensten.

Tal van andere cruciale ontwikkelingen met een blijvend belang voor de Europese cultuur hadden plaats in het Nabije Oosten, zoals de domesticatie van planten en dieren en de ontwikkeling van de landbouw, de metallurgie, de eerste sedentaire gemeenschappen, steden en staten, grootscheepse, geïnstitutionaliseerde, internationale handel en nog veel meer.

Het spreekt dus vanzelf dat de belangstelling voor de Oriënt diep is geworteld.

Nederland kent een lange traditie in het bestuderen van de voor-Islamitische talen en beschavingen van het Nabije Oosten. Nederlandse archeologen, filologen en andere onderzoekers zijn nauw betrokken bij omvangrijke opgravingen in Egypte, Syrië, Turkije, Jordanië, Israël en Irak en bij projecten om oude bronnen te vertalen en te

duiden. In Istanboel, Damascus en Caïro zijn Nederlandse wetenschappelijke instituten gevestigd.

De grote belangstelling voor de culturen van het Nabije Oosten versterkt de banden met de regio, en de intensieve samenwerking helpt de plaatselijke bevolking zich meer bewust te worden van haar rijke culturele erfgoed en pre-Islamitische geschiedenis.

Veelbelovende onderzoekslijnen

In recente jaren zijn nieuwe, belangwekkende onderzoekslijnen ontstaan waarvan veel wordt verwacht. Archeologen, filologen, paleobotanici en -zoölogen, natuurwetenschappers en andere disciplines trekken gemeenschappelijk op in grootscheeps veldonderzoek.

Een belangrijke focus vormen 'marginale zones' waar de vroegste landbouw is aangetroffen en waar mensen voor het eerst sedentaire leefgemeenschappen stichtten. We zullen leren hoe het klimaat er toen was, welke landschappen voorhanden waren, hoe zulke omstandigheden samenlevingen beïnvloedden, welke gewassen men verbouwde, waarom er hongersnoden waren en welke effecten irrigatie had – allemaal onderwerpen die ook vandaag nog zeer relevant zijn.

Het ontstaan en weer verdwijnen van vroege steden en staten, duizenden jaren geleden, is een ander focusgebied. Opgravingen in Syrië en Irak, en analyse van spijkerschrifteksten uit Mesopotamië, zullen ons helpen begrijpen waarom complexe, urbane samenlevingen ontstonden en waarom vroege imperia succesvol waren.

Uit het oude Nabije Oosten zijn ook veel andere teksten beschikbaar. Moderne linguïstische modellen zullen ons helpen het Soemerisch, Akkadisch, Hebreeuws, Syrisch, Hettitisch, Egyptisch en Koptisch beter te analyseren, zodat we dieper kunnen doordringen in die oude bronnen. Het zal unieke kansen bieden om complexe samenlevingen in de oudheid tot in detail te reconstrueren.

De vraag hoe in Egypte en Mesopotamië het schrift ontstond is een aandachtsgebied in zichzelf. Hoe veranderde de introductie van schrift de structuur van samenlevingen? Onder welke omstandigheden kon schrift zich verspreiden? Wat gebeurt er met een cultuur die naast schrift ook gedachtegoed uit een andere cultuur overneemt?

Onderzoek richt zich ook op religie, magie en ritueel in de oudheid. Kennis daarover is van belang voor het bestuderen van de wereldgodsdiensten, maar levert ook inzicht op in de ontwikkeling van religieus en ritueel denken en handelen in het algemeen – hoogst wezenlijke vragen tot op de dag van vandaag.

14 HOE VERANDEREN NATIONALE CULTURELE IDENTITEITEN IN DE TIJD?

Een nationale identiteit is het idee dat een samenleving een eenheid vormt op (geo)-politieke, sociale en culturele gronden. Nationale identiteiten en hun plaats in het cultureel geheugen zijn echter niet onveranderlijk. Interdisciplinaire analyses van literatuur, religie en beeldende kunst door de eeuwen heen kunnen de dynamiek van de identiteit inzichtelijk maken.

Een collectief cultureel besef wordt niet alleen belichaamd door maatschappelijke instituties zoals koningshuis, kerken, onderwijssysteem of musea. Het wordt ook, en vooral, zichtbaar in de voortdurende dynamiek van culturele uitingen.

Deze dynamiek voltrekt zich in drie dimensies: een horizontale dimensie, waarin groepen zichzelf definiëren ten opzichte van anderen op grond van wisselende karakteriseringen; een verticale dimensie, waarin de afstanden tussen burgers en overheid en die tussen sociale lagen worden bepaald; en een 'diachrone' dimensie, door de tijd, waarin individuen, groepen en de samenleving als geheel zich positioneren ten opzichte van het verleden. Maatschappelijke discussies over nationale identiteit gaan vaak over dynamiek in de eerste twee dimensies. Dit onderzoeksprogramma echter richt zich, in aansluiting op internationaal recent onderzoek, primair op dynamiek in de diachrone dimensie: het bestudeert de ontwikkeling van het 'cultureel geheugen', ofwel veranderingen in het cultureel identiteitsbesef door de eeuwen heen.

Literatuur, religie en beeldende kunsten zijn de belangrijkste dragers van het culturele geheugen. Ze leggen herinneringen, denkbeelden, normen en waarden vast, en dat vaak eeuwen lang.

Cultureel geheugen

Cultuur is nooit enkelvoudig. Naast een meerderheidscultuur bestaan altijd minderheidsculturen. Op elk moment bestaan culturele uitingen die uit de pas lopen met de traditie en gedurende enige tijd worden gezien als avant-gardistisch.

Cultuur is een voortdurende draaikolk van activiteiten; door de generaties heen vertoont zij een zekere continuïteit, maar de inhoud van het cultureel erfgoed ligt niet vast. Die inhoud wordt steeds opnieuw bijgesteld door nieuwe generaties, die elk vanuit hun eigen perspectief naar het verleden kijken.

Hoe ver reikt het vermogen van cultuur om generaties door de tijd samen te binden? Bestaan er culturele uitingen die voor iedereen blijvend herkenbaar zijn? In de negentiende eeuw lazen velen in Nederland Jacob Cats, en werd hij alom beschouwd als een belangrijk zedekundig dichter. Nu leest niemand hem meer. Vandaag kan *De historie van mejuffrouw Sara Burgerhart* van Betje Wolff en Aagje Deken gelezen worden als een vernieuwende demonstratie van de mogelijkheden van vrouwelijk auteurschap. Maar na verschijning, in 1782, werd het boek eerder gezien als een vaderlandse roman, één die tegenwicht bood aan de vele vertaalde literatuur van buiten.

De Nederlandse geschiedenis is te beschouwen als een cultureel laboratorium dat vele eeuwen, met daarin turbulente perioden, omspant: van Reformatie, Gouden Eeuw en Nederlandse staatsvorming, via Verlichting en Verzuiling, tot en met de debatten over multiculturaliteit, nationaal erfgoed en 'canons' vandaag de dag.

De driehoek van religie, literair/artistieke praktijk en nationaal identiteitsbesef is in dat laboratorium steeds actief geweest.

Terug kijkend kunnen we de invloeden van cultuur en religie op de publieke sfeer en het collectieve identiteitsbesef analyseren. De benadering is interdisciplinair, multimediaal en letterkundig-historisch; literatuurwetenschap, theologie, kerkgeschiedenis en kunstgeschiedenis bestuderen samen het cultureel geheugen zoals vastgelegd in literatuur, religie en kunst.

Samen zoeken zij het antwoord op een even fascinerende als belangrijke vraag: hoe veranderde de Nederlandse culturele identiteit in de loop van de voorbije eeuwen? En hoe werkt dat door in het heden?

Dirk van Delen, *De Beeldenstorm* van 1566.

15 HOE BEÏNVLOEDT MIGRATIE VAN PERSONEN, OBJECTEN EN IDEEËN DE ONTWIKKELING VAN CULTURELE IDENTITEIT?

In het vroege Europa ontstonden nieuwe culturele identiteiten toen bevolkingsgroepen zich op grote schaal verplaatsten. Ook daarna bleven reizigers en migranten invloed uitoefenen op sociale processen en culturele praktijken, met inbegrip van de kunst. Dit proces werd na de uitvinding van de boekdrukkunst en de opkomst van de stadsculturen in de Renaissance versterkt door de migratie van objecten en van ideeën via boeken en tijdschriften.
Een mondiaal karakter kreeg deze verspreiding en uitwisseling toen de westerse machten de zeeën gingen bevaren en gebieden koloniseerden. Nog steeds leiden migratie en mobiliteit tot ontmoetingen van verschillende wereldbeelden en tot culturele vernieuwing, een proces dat met de intrede van internet extra dynamiek heeft gekregen. Multidisciplinair onderzoek zoekt naar de aard van deze interacties.

Tijdens het eerste millennium van onze jaartelling droegen 'volksverhuizingen' in belangrijke mate bij aan de vorming van het vroege Europa. Ook in latere tijden zorgde menselijke mobiliteit voor wederzijdse beïnvloeding en daarmee voor het ontstaan van nieuwe cultuurpatronen.

Lange tijd dachten wetenschappers dat migrerende groepen bijna onveranderlijke identiteiten met zich meedroegen, die ze importeerden in de gebieden waar ze zich vestigden. Meer recent is echter duidelijk geworden dat migratie altijd al complexer is geweest dan simpelweg een verplaatsing van groepen mensen met een homogene cultuur en identiteit. Migratie leidde steeds tot culturele interacties en wederzijdse beïnvloeding.

Een breed spectrum aan wetenschappelijke disciplines probeert nu te ontrafelen welke invloed migratie van personen, menselijke mobiliteit en migratie van objecten en ideeën hebben gehad op de historische ontwikkeling van Europese identiteiten en wereldbeelden. Dat onderzoek kent vele lagen en richtingen, en het omvat disciplines uiteenlopend van religiewetenschap en filosofie tot en met kunstgeschiedenis, fysische antropologie en archeologie.

Fysisch-antropologische revolutie

In de archeologie kan inbreng van modern natuurwetenschappelijk onderzoek nieuwe inzichten verschaffen in de samenstelling van vroeg-Europese bevolkingen en in de mobiliteit van personen en groepen daarbinnen. Fysisch-antropologisch onderzoek levert bijvoorbeeld kennis over de demografische opbouw en de gezondheid van grafveldpopulaties.

Veelbelovend is bijvoorbeeld het onderzoek naar de samenstelling van het vroegere voedselpakket door middel van onderzoek aan koolstof- en stikstof-isotopen in collageenweefsel van archeologisch botmateriaal. Hieruit valt de verhouding tussen dierlijke en plantaardige en tussen mariene en terrestrische voedselcomponenten af te leiden.

Van belang is ook recent onderzoek naar de geografische herkomst van individuen en groepen op basis van de isotopenverhoudingen van elementen zoals strontium, zuurstof, lood en zwavel in het skelet. De in tandglazuur vastgelegde isotopenwaarden veranderen niet meer na de vroege jeugd. Door deze 'chemische signaturen' te vergelijken met die van de directe omgeving, kan worden bepaald of de onderzochte individuen ter plaatse zijn opgegroeid of door migratie daar zijn terechtgekomen. Dankzij verbeterde sequencing-technieken lijkt oud DNA uit menselijke resten bovendien inzicht te kunnen geven in verwantschapsrelaties binnen grafveldpopulaties en tussen grafvelden.

Al deze nieuwe ontwikkelingen in het fysisch-antropologisch onderzoek kunnen leiden tot een fundamentele herwaardering van de rol van migratie en mobiliteit in de vorming van identiteiten in het vroege Europa, die cultuurhistorische debatten over het oude Europa nieuw leven kan inblazen.

Botsing van wereldbeelden

In later eeuwen blijft daadwerkelijke verplaatsing van mensen (tijdelijk of definitief) van grote invloed op de ontwikkeling van culturele identiteiten, maar gaat door de uitvinding van de boekdrukkunst en de opkomst van stadsculturen ook de verplaatsing van ideeën en objecten een steeds grotere rol spelen.

Multidisciplinair onderzoek vanuit filosofie, religiewetenschap en andere geesteswetenschappen richt zich onder meer op botsingen van wereldbeelden die het gevolg kunnen zijn van migratie van ideeën, vooral door uitwisseling en verspreiding van informatie. Dat proces komt vanaf de achttiende eeuw, de tijd van de Verlichting, in een stroomversnelling.

Wat gebeurt er als verschillende culturele waarden en identiteiten elkaar ontmoeten? Welke waarden bestaan werkelijk wereldwijd, welke waarden zijn gebonden aan specifieke culturen en regio's? Welke rol speelden Europese tradities bij het formuleren van 'universele' waarden zoals democratie, fundamentele mensenrechten en menselijke waardigheid? Moeten zulke begrippen opnieuw worden gedefinieerd? Welke rol speelden in dit alles het christendom, het jodendom, de islam, en andere religieuze tradities die in verschillende periodes invloed hebben uitgeoefend op de Europese traditie?

Transculturele dynamiek in beeldende kunst, vormgeving en architectuur

In het internationale debat binnen kunstgeschiedenis en *visual studies*, alsook in de (transnationale/mondiale) kunst, is de vraag naar wat 'eigen' is en wat 'vreemd' actueler dan ooit. Hetzelfde geldt voor de discussies die in de kunst- en museumwereld en in de media worden gevoerd.

Om greep te krijgen op de hedendaagse discussie is het van belang om deze kwestie zowel in internationale context als in historisch perspectief te bezien. Het denken over wie en wat we zijn als mens, ons zelfbeeld, en ons beeld over wat onze cultuur en onze waarden inhouden, worden al eeuwenlang in belangrijke mate bepaald door de noties van 'zelf' en 'ander', en evenzeer door invloeden van binnenuit als van buitenaf.

(Kunst)historici, cultuurfilosofen, antropologen, literatuurwetenschappers en linguisten werken samen in onderzoek naar de effecten die wereldwijde mobiliteit heeft gehad op de ontwikkeling van de Nederlandse beeldende kunst, beeldcultuur, vormgeving en architectuur.

Hoe veranderde de Nederlandse cultuur onder invloed van personen, objecten en ideeën die zich verplaatsten? Wetenschappelijke samenwerking kan historische peilmomenten definiëren en de rol van kunst in interculturele en geopolitieke uitwisseling door migraties zichtbaar maken. Hoe verliep deze uitwisseling in bijvoorbeeld de Gouden Eeuw, de 'Franse tijd' en de koloniale tijd? Hoe verloopt zij in de globaliserende wereld van vandaag? Welke rol spelen de kunsten, musea en andere kunstinstellingen bij de voortgaande ontwikkeling van de Nederlandse culturele identiteit?

16 Verloopt culturele integratie vandaag anders dan in het verleden?

Culturen en identiteiten staan, in Nederland en elders in de wereld, onder sterke invloed van mondialisering en technologisering. De twee processen versterken elkaar. Historische en interculturele vergelijkingen helpen ons te doorgronden hoe culturen en identiteiten van groepen mensen veranderden in de loop van de tijd, en wat het verleden ons leert over de integratieprocessen van vandaag.

Niet lang geleden heerste in ons land een maatschappelijk debat over 'dé' Nederlandse cultuur en identiteit. De brede verwarring over de inhoud van deze begrippen, en de vaak emotionele bijdragen aan de discussie, tekenden de complexiteit van integratievraagstukken waarmee samenlevingen in Nederland en elders worden geconfronteerd.

Integratievraagstukken betreffen integratie in de breedste zin van het woord. Het gaat om migranten die in hun nieuwe woonland integreren, maar het gaat ook over samenlevingen als geheel die, in een tijd van niet eerder gekende mondialisering, hun plek zoeken in internationale verbanden. Technologisering betekent dat, net als voorheen, opkomende technologie zorgt voor nieuwe sociale verbanden.

Mondialisering en technologisering zijn nauw met elkaar verweven. Ze brengen vooruitgang en welvaart, maar kunnen ook leiden tot grotere economische, politieke, culturele en religieuze onzekerheid. Waar de een in beide processen vooral nieuwe kansen en mogelijkheden ziet of krijgt, ervaart de ander vooral bedreigingen.

Veel disciplines binnen de geesteswetenschappen, zoals filosofie, geschiedschrijving, antropologie en sociale wetenschappen, kunnen helpen bij het formuleren van in systematische data gegronde toekomstscenario's. Meer dan in veel andere landen dragen geesteswetenschappen in Nederland ook intensief bij aan de inhoud van het maatschappelijk debat.

Systematische vergelijking

Bij het zoeken naar een beter begrip van de dynamiek van mondialisering en technologisering kunnen Nederlandse geesteswetenschappers onder meer gebruik maken van *data mining*- en patroonanalysetechnieken die in andere wetenschapsgebieden zijn ontwikkeld. Vragen als: 'Wat waren de karakteristieken van de Nederlanders die naar de Oost migreerden?' of 'Wat was de omvang van arbeidsmigratie in het vroegmoderne Europa' worden zo steeds beter beantwoordbaar.

Nederland heeft in het verleden diverse malen taalkundige, culturele, religieuze en/of etnische minderheidsidentiteiten in bredere identiteiten geïntegreerd. Welke factoren bepaalden toen het succes en de snelheid van die integratie?

Ook in het verleden leidden nieuwe transportmogelijkheden tot het verkleinen van psychologische afstanden en het vervagen van voorheen scherpe taalkundige, culturele, historische en religieuze verschillen. Hoe werden onder invloed van schaalvergroting nieuwe identiteiten gevormd? Hoe belangrijk waren en zijn diverse sociale parameters voor individuen of groepen bij het definiëren van (nieuwe) identiteiten? Hoe belangrijk is taal? Religie? Geslacht? Etniciteit? Nationaliteit? Geboorte? Sociale klasse? Leeftijd? Opleiding? Culturele vorming?

En, niet onbelangrijk: wat vertellen integratieprocessen in het verleden ons over integratie vandaag?

Ook wat betreft de maatschappelijke integratie van innovaties en nieuwe technologie kan analyse van het verleden waardevolle inzichten opleveren. Welke factoren bepaalden destijds de snelheid en het succes van de integratie van technologie? Welke effecten had die integratie op individuen en groepen?

Misschien het meest uitdagend is de vraag of de huidige schaal van technologisering, en haar nauwe vervlechting met mondialisering, de integratieprocessen van vandaag unieke eigenschappen geeft. Wat betekent het dat groepen mensen zich sterk met elkaar identificeren, ongeacht of ze tien of tienduizend kilometer van elkaar verwijderd zijn? Zullen de uitkomsten van integratieprocessen daarom nu anders zijn?

Het Rotterdams zomercarnaval, gestart door Antilliaanse en Kaapverdische immigranten.

17 WAT LEREN TALEN ONS OVER HET VERLEDEN?

Door talen grondig te ontleden, kunnen we veel afleiden over de geschiedenis van de sprekers van die talen: wie stammen af van wie, wie migreerden van waar naar waar, welke bevolkingsgroepen kwamen met elkaar in contact, welke culturen waren dominant? Dankzij deze 'linguïstische archeologie' krijgen oude historische vragen nieuwe antwoorden.

De laatste jaren zijn taalkundigen veel beter dan vroeger in staat om te onderzoeken hoe verschillende talen elkaar beïnvloeden als de sprekers ervan met elkaar in contact komen. Dat is te danken aan de ontwikkeling van theoretische modellen van 'taalcontact' en aan het feit dat steeds meer talen op een precieze en geavanceerde manier worden beschreven.

Tot voor kort richtten historisch taalkundigen hun aandacht vooral op de manier waarop losse woorden werden ontleend. Nieuwe methoden maken het echter mogelijk om veel meer aspecten van taalcontact te analyseren. Hoe beïnvloeden talen elkaars grammaticale structuren? Hoe en waarom schakelen meertalige sprekers over van de ene naar de andere taal? Welke rol spelen daarbij cultureel prestige en politiek beleid door de eeuwen heen?

Door de geschiedenis van een taal te reconstrueren, komen we veel te weten over het verleden van de sprekers van deze taal. Daardoor wordt het zelfs mogelijk om uitspraken te doen over perioden waaruit er geen geschreven historische bronnen beschikbaar zijn.

Drie regio's

Onderzoek naar taalcontact zal in het bijzonder veel informatie kunnen opleveren over de geschiedenis van drie regio's.

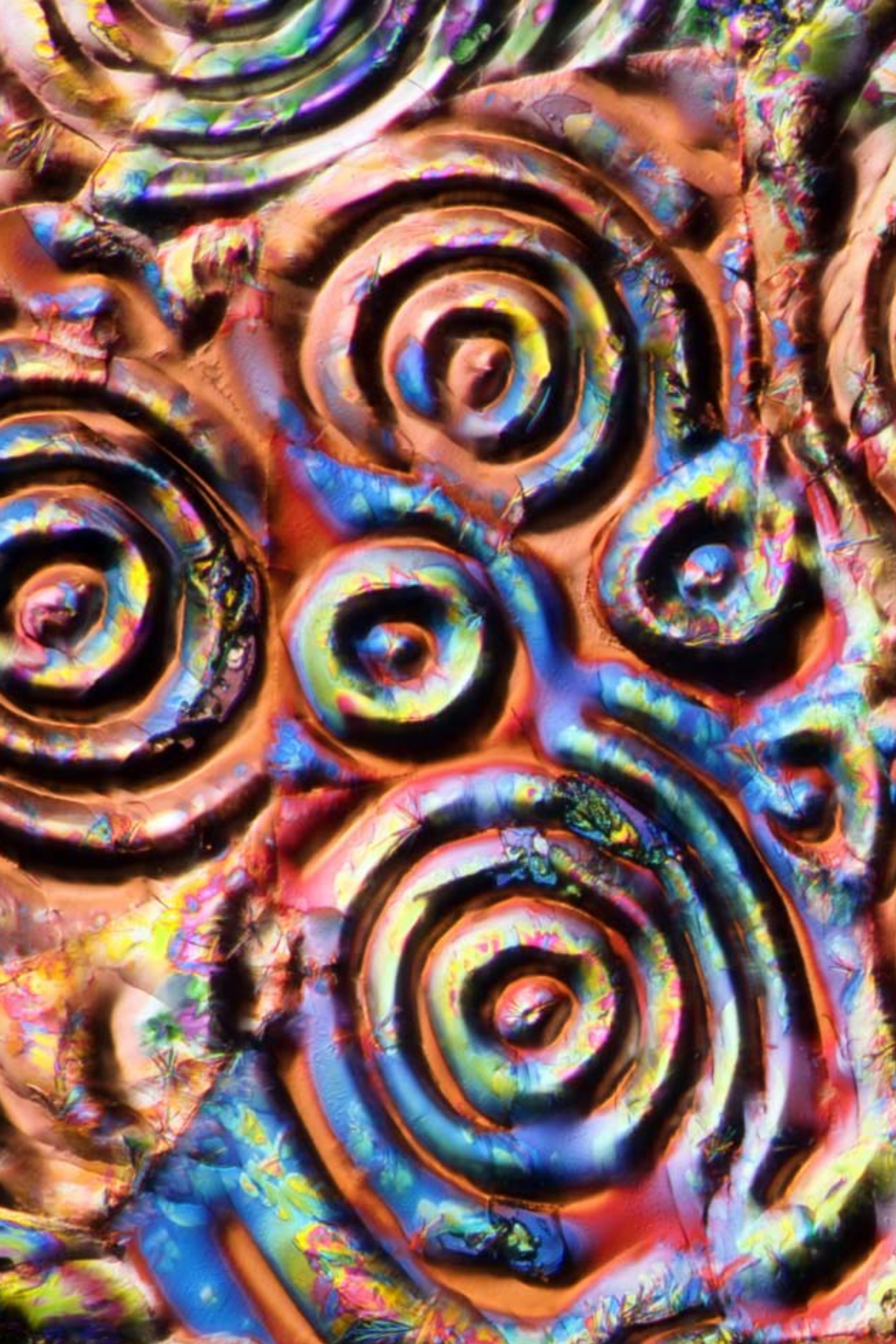
Om te beginnen Europa, een continent dat in de laatste drieduizend jaar voortdurend allerlei volkeren van de ene plek naar de andere zag trekken. De migranten waren Indo-Europeanen zoals Grieken, Romeinen, Kelten, Germanen, Slaven en Alanen, maar ook Hunnen, Finnen en Hongaren verplaatsten zich. Hoe gingen al deze volkeren met elkaar om en welke sporen hebben ze in elkaars talen achtergelaten?

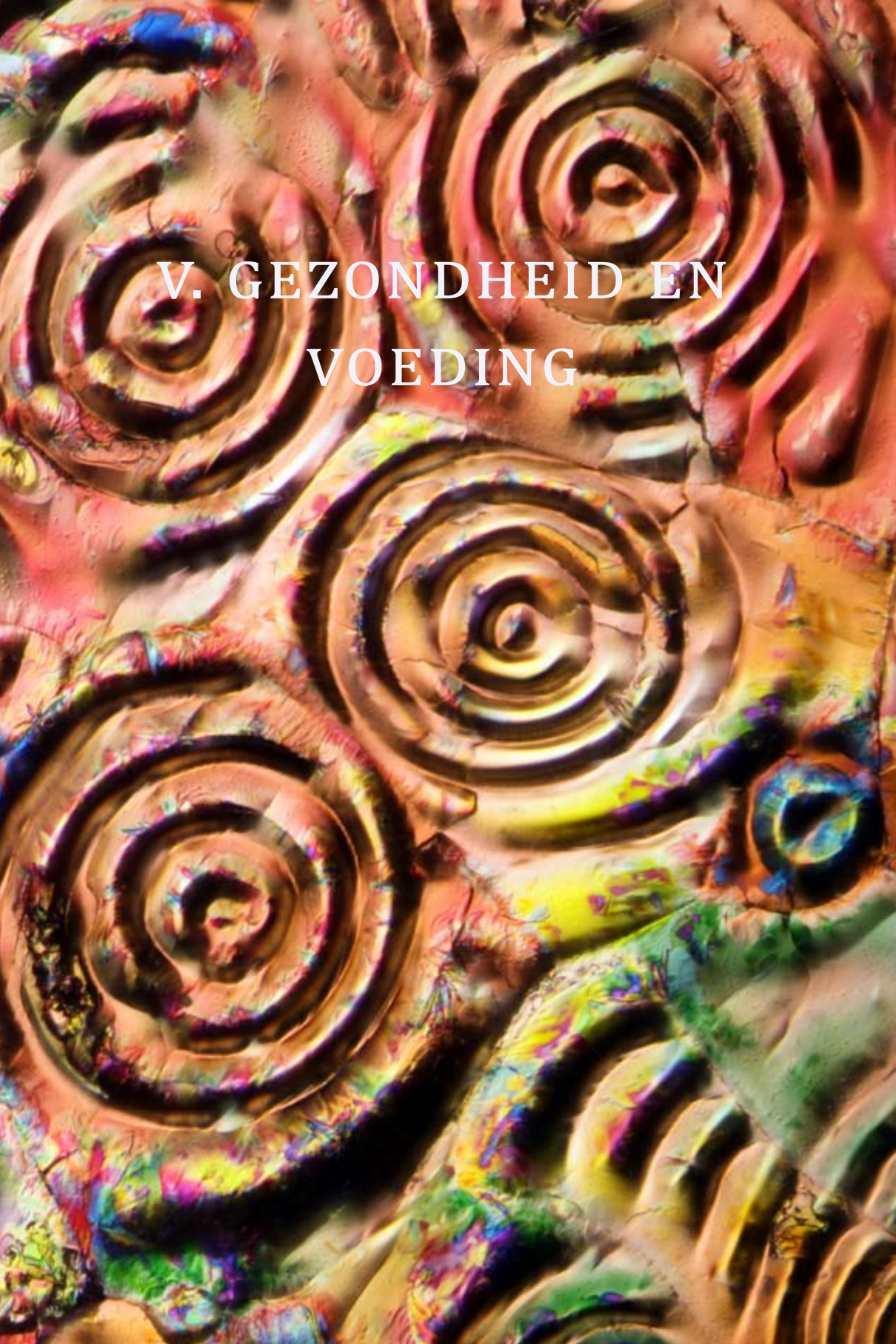
In het Midden-Oosten en in gemeenschappen van emigranten wordt het Aramees nog maar door enkele duizenden mensen gesproken, maar vanaf de zesde eeuw v. Chr. tot de uitbreiding van de islam was het de *lingua franca* van de regio, het Engels van toen. Het Aramees is ongeveer drieduizend jaar oud en is onder invloed van andere

talen meermaals fundamenteel veranderd. Hoe gebeurde dit precies? Welke algemene drijfveren kunnen we uit deze processen afleiden? Als we via de taal het spoor terug kunnen volgen tot in de oudheid, vinden we ook de wortels van bevolkingsgroepen overal ter wereld die nog vandaag Aramese dialecten spreken.

In Afrika is meertaligheid de norm. Bijna alle Afrikanen maken zich van kindsbeen af meer dan één taal eigen. Sommige Afrikaanse talen, zoals Berber en Arabisch, staan al millennia met elkaar in contact.

Het Afrikaanse continent kent daarnaast vele speciale talen, zoals ceremoniële talen bestemd voor inwijdingsrituelen, geheimtalen en vermijdingstalen die uit respect vermijden bepaalde personen bij naam te noemen. De intensiteit, omvang, variatie en lange geschiedenis van taalcontact maken Afrika tot een ideaal laboratorium voor onderzoek naar taalcontact en taalverandering. Als er wetmatigheden bestaan voor de manier waarop taalcontact verloopt, dan zullen die in Afrika zijn te ontdekken.





V. GEZONDHEID EN VOEDING

18 WAT HEBBEN WE AAN HET MENSELIJK GENOOM?

Het leek, vijftig jaar geleden, zo eenvoudig: de erfelijke eigenschappen van elk levend wezen worden bepaald door hun DNA. De constructie van het DNA was al snel duidelijk, maar het ophelderen van de functie ervan stelt de wetenschap telkens weer voor nieuwe raadsels. Hoe kunnen zulke minieme verschillen zo'n grote verscheidenheid tussen en binnen al die levensvormen geven? En hoe kunnen deze worden benut om medische behandelingen beter af te stemmen op de individuele mens?

De afgelopen vijftien jaar is, veel explosiever dan ooit voorzien, de kennis over het genoom – het totaal aan genetische informatie opgeslagen in het DNA – gegroeid. En daarmee de raadsels waarvoor de wetenschap zich gesteld ziet, want de betekenis van al die informatie begrijpen we slechts fragmentarisch.

Zo vertoont het genoom van een muis grote overeenkomst met dat van de mens, maar we hebben zelfs nog amper een idee welke genen bepalen of uit een bevruchte eicel een muis of een mens ontstaat en hoe ze precies de ontwikkeling van een complex organisme orkestreren. Ook hebben we nog nauwelijks een idee van de precieze rol van epigenetische factoren, omkeerbare veranderingen in de DNA-structuur, al weten we wel dat die aanzienlijk zal zijn. Evenmin hebben we veel inzicht in het ontstaan van de verschillen tussen mensen onderling en de manier waarop de werking van onze genen wordt beïnvloed door de omgeving.

De eigenschappen van levende wezens worden sterk bepaald door hun genetische constitutie. Die constitutie geeft niet alleen de grenzen van intellectuele en fysieke capaciteiten, maar bepaalt bijvoorbeeld ook de bevattelijkheid voor ziekten en levensverwachting. Inzicht in de genetische factoren die tezamen al deze eigenschappen bepalen, biedt voor de mens belangrijke perspectieven om op termijn een lang en gezond leven te bevorderen.

Het ontrafelen van al deze erfelijke eigenschappen en al deze verschillen vereist een massale inspanning. De DNA-volgordes van een groot aantal individuen van wie ook andere kenmerken, zoals hun ziektegeschiedenissen, zorgvuldig in kaart zijn gebracht, moeten met elkaar worden vergeleken.

Naast de verdere ontwikkeling van nieuwe snelle analysemethoden ligt hier ook een grote uitdaging op het gebied van de bio-informatica, zowel in technisch opzicht (opslag van gegevens en rekenkracht) als de ontwikkeling van nieuwe wiskundige methodes om informatie efficiënt uit de gegevens te halen.

Het zal ook nodig zijn de hypotheses die uit deze analyses komen, te verifiëren in toegankelijke modelsystemen, zoals gist, fruitvlieg, zebravis en muis. Anderzijds kunnen deze modelsystemen fungeren om juist nieuwe hypotheses te formuleren en vervolgens te verifiëren in de hiermee opgebouwde databestanden.

Deze benadering houdt grote beloften in voor het begrijpen van het ontstaan van ziekten bij de mens, en vormt een belangrijke stap in de richting van betere en meer op het individu afgestemde medische behandelingen.

19 HOE KUNNEN WIJ KANKER BETER DE BAAS WORDEN?

Jaarlijks krijgen in Nederland ongeveer 90.000 mensen kanker; ondanks betere behandelingsresultaten overlijden elk jaar nog ongeveer 40.000 mensen aan de ziekte. Intussen is veel kennis vergaard over het ontstaan van kanker, maar we staan nu voor de uitdaging om uit te zoeken welke behandeling bij welke patiënt het meest effectief is.

Onze kennis over de genetische afwijkingen die kanker veroorzaken, is de afgelopen vijftien jaar sterk toegenomen. Intussen is ook onomstotelijk bewezen dat deze theoretische kennis uit het laboratorium werkelijk kan worden vertaald naar zinvolle nieuwe behandelingen van kankerpatiënten.

Doordat de processen die tot kanker leiden echter buitengewoon ingewikkeld zijn, en er talloze verschillende soorten kanker blijken te zijn, is er nog veel werk te doen.

Gelukkig is een verdere ontrafeling van ontstaan en gedrag van kanker mogelijk dankzij een schat aan nieuwe inzichten en technieken die nu ter beschikking komen. Daarmee kan het ziekteverloop, en soms zelfs de respons op therapie van individuele patiënten, veel beter worden voorspeld.

Kanker, de ongecontroleerde groei van lichaamscellen, wordt veroorzaakt door genetische veranderingen in cellen. Er ontstaan problemen in allerlei essentiële biologische systemen en processen – stofwisseling, signaaloverdracht, eiwittransport, en ook de gevoeligheid voor geneesmiddelen verandert.

Belangrijke vragen waarvoor de wetenschap zich gesteld ziet, zijn onder meer:

- Wat zijn de essentiële genetische veranderingen bij het ontstaan van kanker?
- Wat zijn de mechanismen waardoor tumorcellen resistentie tegen geneesmiddelen ontwikkelen, en hoe kunnen we die wegen voor de kankercel afsluiten?
- Hoe bepalen we de effectieve therapie voor afzonderlijke patiënten? Patiënten hebben elk hun eigen erfelijke kenmerken, en dat geldt ook voor hun tumoren. Het onderzoek naar de samenhang tussen deze twee zal noodzakelijk inzicht verschaffen.
- Hoe kan de behandeling van kanker verder verbeterd en ontwikkeld worden, en welke rol is hierbij weggelegd voor de geïndividualiseerde behandeling met nieuwe medicijnen naast verdere verfijning van chirurgische en radiotherapeutische technieken?

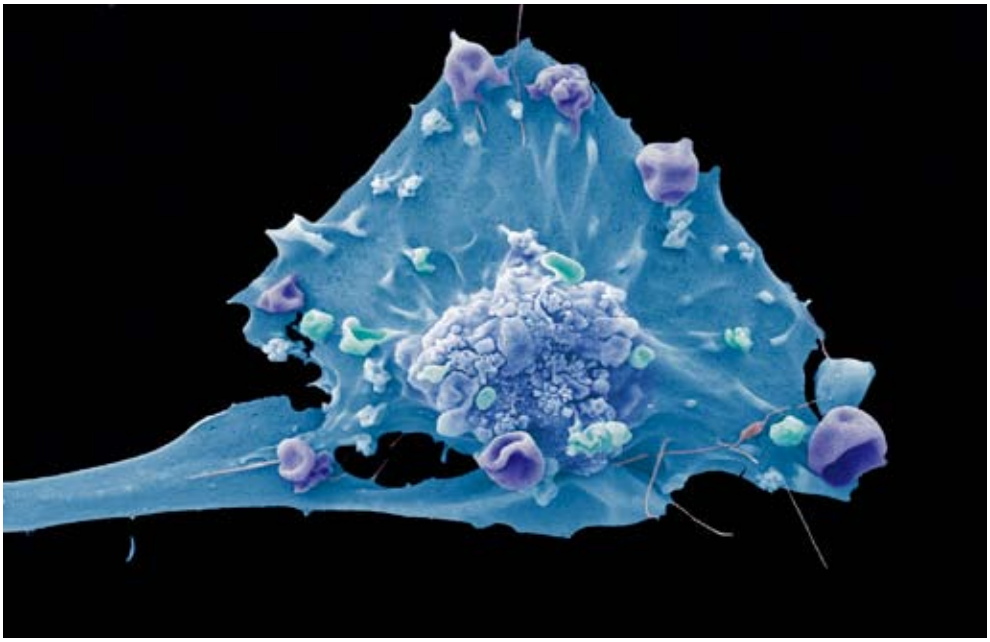
Antwoorden op deze vragen zullen ons in staat stellen een rationele keuze te maken uit een groeiend arsenaal aan therapeutische mogelijkheden. In zorgvuldig opgezette klinische trials met state-of-the-art moleculaire diagnostiek moeten we de kritische

tumorkenmerken, die aangeven wat in elk afzonderlijk geval de meest kansrijke behandeling is, kunnen destilleren.

Uitzoeken wat de meest effectieve combinatietherapie is voor een gegeven patiënt met zijn of haar specifieke genetische achtergrond – en zijn of haar specifieke tumor – wordt de grote uitdaging. De beschikbaarheid van proefdiermodellen die cruciale aspecten van het ziektebeeld getrouw reproduceren, zal hierbij een belangrijk hulpmiddel zijn.

Beantwoording van de grote vragen vereist een multidisciplinaire benadering waarin creatieve onderzoeksopzetten met voorspellende biomarkers en nieuwe beeldvormende technieken een belangrijke rol zullen spelen. Dit zal moeten leiden tot het ontwikkelen van therapieën die rekening houden met het feit dat individuele patiënten, door een samenspel van hun genetische achtergrond en de specifieke eigenschappen van hun tumor, vaak heel verschillend op een bepaalde kankertherapie reageren.

Ook reeds bestaande, werkzame therapeutische modaliteiten moeten verder worden geoptimaliseerd voor individuele patiënten. Gedacht kan worden aan het verbeteren van behandeltechnieken, in combinatie met het nauwkeurig bepalen van dosering van nieuwe of al bestaande therapeutica.



20 HOE VERBETEREN WIJ GEZONDHEID, PREVENTIE EN ZORG?

Parallel aan de uitbreiding van biomedische kennis heeft ook het volksgezondheidsonderzoek zich sterk ontwikkeld. Er is meer inzicht verkregen in de oorzaken van ziekte, maar ook in de mogelijkheden voor preventie, vroege opsporing en interventie. Tegelijkertijd zijn urgente nieuwe wetenschappelijke vragen gerezen over de effectiviteit van preventie en zorg.

Het verschil in levensverwachting tussen hoger en lager opgeleiden bedraagt in Nederland bijna zes jaar, en het verschil in gezonde levensverwachting – een leven zonder ernstige ziekte of beperking – zelfs bijna achttien jaar.

Hoger opgeleiden leven en eten, wonen en werken over het algemeen gezonder dan lager opgeleiden, maar dan nog blijft de helft van het verschil onverklaard. Verdere ontrafeling van de verantwoordelijke mechanismen is daarom hard nodig. Dat levert belangrijke, en wetenschappelijk buitengewoon interessante, vragen op.

Is er bijvoorbeeld sprake van een erfelijke component in de ziekterisico's, en in hoeverre speelt de omgeving hierin een rol? Is er een leerproces gaande dat wellicht al in de vroege jeugd begint? Hoe zit het met de wisselwerking tussen geestelijke en lichamelijke gezondheid?

Beter inzicht in deze mechanismen brengt beter maatwerk in het voorkomen van ernstige ziekte dichterbij. Wellicht kunnen dan in de toekomst collectieve vormen van preventie zoals vaccinaties, bevolkingsonderzoek, en voedingsadviezen versterkt of deels vervangen worden door op individuele risicoprofielen afgestemde preventie. Misschien is dit niet alleen effectiever, maar levert het ook een betere verhouding tussen baten, bijwerkingen en kosten. Zeker nu de mogelijkheden voor individuele risicoschattingen toenemen dankzij genetisch en epidemiologisch onderzoek, non-invasieve beeldvormingstechnologieën en grootschalig data-management, komt individueel maatwerk op preventief gebied in zicht.

De centrale uitdaging hierbij is vooral een verkorting van het aantal jaren dat een mens doorbrengt met ziekte en invaliditeit: mensen moeten niet alleen langer leven, maar ze moeten die gewonnen levensjaren ook zonder beperkingen kunnen doorbrengen. Soms, maar lang niet altijd, staan de beperkingen in verband met chronische ziekten zoals artrose, cataract, of depressie. Welke omgevings- en erfelijkheidsfactoren veroorzaken de beperkingen, en zijn er vormen van preventie en behandeling te ontwikkelen die zulke beperkingen kunnen terugdringen?

Speciale aandacht vereist het gegeven dat ouderen in de meeste gevallen lijden aan verschillende chronische ziekten tegelijk. Onderzoek heeft duidelijk gemaakt dat er, ook na correctie voor leeftijd, sprake is van clustering van chronische aandoeningen ten gevolge van verhoogde kwetsbaarheid. Klinische en psychosociale factoren spelen een rol, maar ook genetische, moleculair-biologische en immunologische mechanismen zijn nog lang niet allemaal ontrafeld.

Door betere preventie bereiken steeds meer mensen een hoge leeftijd, en daardoor groeit ook het aantal mensen dat op enig moment langdurige zorg nodig heeft. *Evidence-based*-behandeling en begeleiding kan echter niet tot maximale gezondheidswinst leiden als zorgketens haperen en patiënten niet gemotiveerd blijven. Dat probleem vraagt om multidisciplinair onderzoek naar zorginnovatie, thuiszorgtechnologie, *e-health* en zelfredzaamheid.

Dit onderzoek zal ook bijdragen aan het beter kunnen voldoen aan de gestaag toenemende vraag naar zorg, die een enorme uitdaging zal vormen voor maatschappij én wetenschap.

21 Kunnen wij onze afweer beter afstellen?

Ons immuunsysteem beschermt ons tegen ziekteverwekkers. Het systeem is ingenieus, maar werkt niet altijd feilloos. Soms is de indringer ons gewoon te slim af, soms raakt het systeem zelf in de war en richt het zich tegen gezonde onderdelen van ons lichaam. De wetenschap zoekt naar methoden om het systeem te hulp te schieten.

De afweerreactie is een buitengewoon ingewikkelde confrontatie van de cellen van ons immuunsysteem met een ziekteverwekker. De laatste vijfentwintig jaar zijn de werkingsmechanismen van het systeem langzamerhand ontrafeld.

Eerst werd opgehelderd hoe het immuunsysteem een grote verscheidenheid aan lichaamsvreemde moleculen heel specifiek kan herkennen. De afweer blijkt aan te slaan op bepaalde onderdelen van vijandige cellen, 'antigenen' genoemd. Vervolgens werd aangetoond dat de respons van elk mens, zowel in aard als in kracht, sterk afhangt van zowel erfelijke eigenschappen als van externe omstandigheden. Iemand blijkt de ene keer heel anders te kunnen reageren op een ziekteverwekker dan de andere keer, ook al lijkt verder weinig veranderd.

Nu we de algemene regels van de immuunreacties begrijpen, kunnen we de volgende uitdagende stap zetten. Die stap behelst het gericht beïnvloeden van het immuunsysteem, in een gegeven situatie, voor een gegeven patiënt: een immuunreactie op maat.

Wij weten bijvoorbeeld dat twintig procent van alle kanker bij de mens met virusinfecties te maken heeft – dit biedt geweldige mogelijkheden voor meer preventieve en therapeutische vaccins.

Ook wordt geprobeerd het afweersysteem zelf in te zetten tegen tumoren. Deze vorm van 'immuuntherapie' staat nog wat meer in de kinderschoenen, maar de mogelijkheid om de genetische structuur van ontspoorde cellen van individuele patiënten te bepalen, is een uitgelezen startpunt op weg naar een exact op de patiënt afgestemde immuuntherapie.

Een immuunreactie op maat houdt niet alleen in dat we de activiteit van het immuunsysteem willen richten naar de antigenen die het meest van belang zijn voor de bescherming. Het betekent ook dat de uit de afweerreactie voortkomende immuuncellen doen wat we willen dat ze doen.

Om dat te bereiken is het essentieel dat we begrijpen hoe de genetische achtergrond en de omstandigheden waaronder de immuunreactie plaatsvindt elkaar beïnvloeden. Dat vereist klinisch onderzoek waarin de relatie tussen ziekte, genetische constitutie en andere factoren kan worden onderzocht.

Daarnaast zal ook een zeer grote behoefte blijven bestaan aan onderzoek naar de regulatie van de immuunrespons in modelsystemen, zowel in de reageerbuis (*in vitro*) als in diermodellen (*in vivo*). Vooral is een beter begrip nodig van de cellen en moleculen die de afweer oproepen, versterken en, uiteraard, weer afschakelen. Met dat begrip zullen we de gevolgen van immuuninterventies – aanjagen bij infectieziekten en kanker, afschakelen bij auto-immuunziekten – beter kunnen voorspellen.

Een beter begrip van het immunologisch evenwicht zoals dat wordt bepaald door alle erfelijke en niet-erfelijke factoren tezamen is daarnaast essentieel voor de ontwikkeling van betere preventiemethoden en therapieën voor persisterende infecties, allergieën, auto-immuunziekten en kanker.

Werken aan een krachtige verdediging is, ten slotte, ook nodig omdat wij steeds weer zullen worden geconfronteerd met nieuwe, mogelijk dodelijke, virussen en bacteriën. Nieuwe inzichten helpen ons om in steeds kortere tijd geschikte vaccins en antibiotica te vervaardigen en die op effectiviteit en veiligheid te testen.

22 HOE GEZOND KUNNEN WIJ OUDER WORDEN?

We willen allemaal oud worden, en we willen ook allemaal gezond oud worden. Het liefst willen we pas een paar dagen voor onze dood – niet zo heel erg – ziek worden. Het uitstellen van ziekte tot zo ver mogelijk in de laatste levensfase, 'compressie van morbiditeit', is een belangrijk wetenschappelijk en maatschappelijk vraagstuk.

Onze levensverwachting neemt toe, en daarmee ook de frequentie van aandoeningen als hart- en vaatziekten, longziekten, trombose, diabetes, kanker, dementie en osteoporose. De laatste levensjaren brengen het grootste verlies aan kwaliteit van leven én de hoogste kosten voor gezondheidszorg met zich mee.

Er is dan ook een maatschappelijke en economische noodzaak om ziekten die door veroudering en degeneratie worden veroorzaakt, gericht aan te pakken. Dit zal alleen kunnen op basis van gedegen inzicht in oorzaken en mechanismen – een grote uitdaging voor de wetenschap.

Veroudering is een complex verschijnsel, en dus doen zich vele belangrijke vragen voor. Waarom wordt een muis niet ouder dan 3 jaar en kunnen schildpadden wel 150 jaar oud worden? Wat is de maximale leeftijd van de mens? Hoe zorgen stamcellen voor gereguleerd orgaanherstel, en verouderen stamcellen ook? Welke genetische en omgevingsfactoren bepalen de gevoeligheid van het cardiovasculaire systeem voor degeneratie en hoe leidt dat tot hartspierproblemen bij het ouder worden? Hoe komt het dat bij het ouder worden de bloedstolling steeds vaker ontregeld raakt?

Veroudering en degeneratie ontstaan door ophoping van schade aan het genetisch materiaal en andere onderdelen van lichaamscellen. Veroudering wordt uiteraard sterk beïnvloed door omgevingsfactoren, maar is voor een deel ook genetisch bepaald. Zo kunnen 'ouderdomsziekten' zich soms al op relatief jonge leeftijd manifesteren.

Vooral organen waarvan de cellen zich van nature weinig vernieuwen, zoals het hart, de longen en de hersenen, lijken gevoelig voor degeneratie. Mede daarom is wereldwijd grote belangstelling ontstaan voor het concept dat stamcellen weefsels en organen zouden kunnen repareren of vervangen.

Dat genetica bij veroudering een rol speelt, is wel duidelijk, maar de genetische factoren die de gevoeligheid voor degeneratie van verschillende orgaansystemen bepalen – en daarmee de kans om op relatief jonge leeftijd ouderdomsziekten als hartfalen, kanker of Alzheimer te krijgen – moeten nog veel beter worden opgehelderd. Daarmee heeft dit verouderingsonderzoek een nauwe relatie met onderzoek aan het genoom, hart- en vaatziekten, longziekten, kanker en het brein. De bedoeling is om op deze

manier althans een deel van de verschillen tussen individuen in ziekteproces en ziektebeloop te kunnen verklaren.

Verouderingsonderzoek zal naar verwachting ook nieuwe aanknopingspunten bieden om meer op de persoon toegesneden en effectievere vormen van preventie en behandeling te ontwikkelen, zoals met behulp van nieuwe afbeeldingstechnieken en *biomarkers* – stoffen die bijvoorbeeld in het bloed kunnen worden opgespoord en die al op een ziekte of afwijking kunnen duiden voordat zich een probleem openbaart. Dit kan leiden tot grote doorbraken in het klinisch-wetenschappelijk onderzoek en het volksgezondheidsonderzoek.

23 HOE KUNNEN WE GEZONDER ETEN?

Verstandig eten helpt om gezond oud te worden. Maar wat is een gezonde keus? En hoe kan deze gezonde keus worden vertaald naar de consument? Veel kennis over ons voedsel is al beschikbaar, maar veel vragen over gezonde voeding zijn tegelijk nog niet goed onderzocht.

De voedingswetenschap heeft in de afgelopen dertig jaar veel grote ontdekkingen opgeleverd. We leerden dat toevoeging van foliumzuur geboorteafwijkingen kan voorkomen, en dat verwijdering van transvetzuren uit de voeding het risico op hart- en vaatziekten kan verlagen. Dankzij zulke ontdekkingen worden veel levens gespaard.

In het rapport *Ons eten gemeten* berekende het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu in 2004 dat de combinatie van gezond eten en voldoende bewegen statistisch zorgt voor bijna even veel gezonde levensjaren als stoppen met roken.

Veel grote vragen rond gezonde voeding staan echter nog open. Door die vragen te beantwoorden, zouden we in de toekomst nog veel meer gezonde levensjaren kunnen winnen.

De grote uitdaging in het voedingsonderzoek is meer kennis te genereren op basis van stevig wetenschappelijk bewijs. Alleen door de principes van *evidence-based* onderzoek toe te passen kunnen we feiten van fabels onderscheiden en zal de geproduceerde kennis onomstotelijk en blijvend zijn.

Goede voedingswetenschap vereist de integratie van kennis uit vele disciplines zoals biochemie, levensmiddelenleer, epidemiologie en gedragspsychologie.

Gezondheid, duurzaamheid

De verwerking van voeding in het menselijk lichaam is een ingewikkeld proces. Allerlei factoren spelen een rol, zoals de samenstelling en de kwaliteit van het voedsel, het totale voedingspatroon, individuele verschillen en de eventuele aanwezigheid van ziekte.

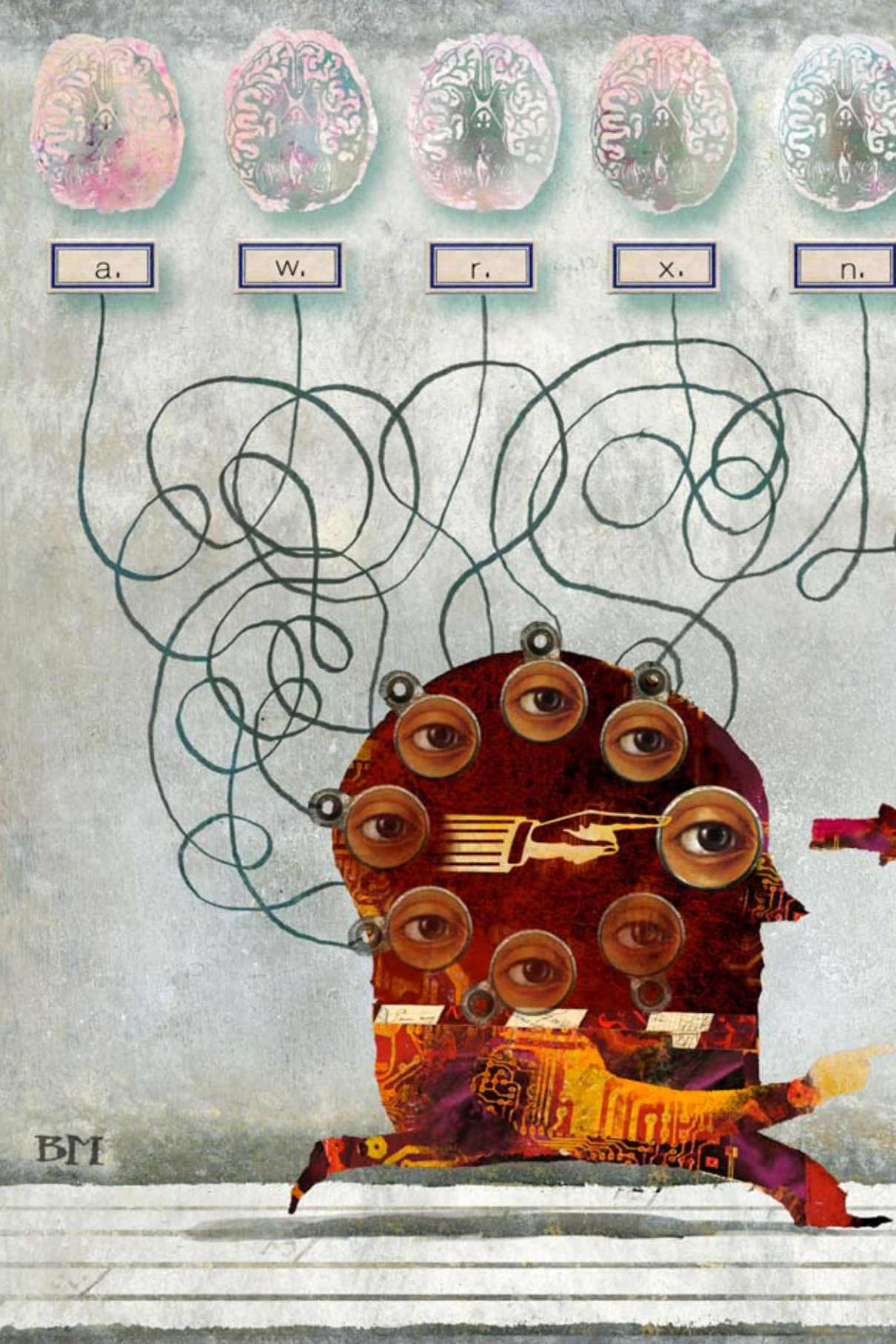
Mede door die complexiteit is de vraag welke voeding werkelijk gezond is, of wat werkelijk bijdraagt aan de kwaliteit van leven voor zieke én gezonde mensen, aanleiding tot veel meningsverschillen. Controversiële adviezen zullen goed moeten worden onderzocht, zodat we komen tot eenduidige inzichten die vervolgens helder aan consumenten kunnen worden overgebracht.

Tal van vragen zijn onderwerp van onderzoek. Welke stoffen in het voedsel verlagen de bloeddruk? Hoe kan betere voeding helpen zwaarlijvigheid en suikerziekte te voorkomen? Kan voeding cognitieve achteruitgang tegengaan? Moet voeding worden afgestemd op het genetisch profiel van het individu? Hoe beïnvloeden voedingsgewoonten van de moeder de gezondheid van het ongeboren kind, en hoe werkt dat? Kan voeding de afweer verbeteren? Hoe halen we op een acceptabele manier zout en ongezonde vetten uit de voeding opdat het risico op hart- en vaatziekten wordt verlaagd?

Voeding raakt niet alleen gezondheid, maar ook duurzaamheid. Veel vis eten is misschien gezond voor een mens, maar het is niet goed voor de biodiversiteit van de zee. Kennis over de effecten van voedselkeuze op het individu moet worden geïntegreerd met kennis over de effecten op bijvoorbeeld milieu en klimaat.

Voedingswetenschap zoekt antwoord op fundamentele vragen, maar eindigt niet bij het produceren van kennis. Nieuwe kennis moet uiteindelijk ook leiden tot het juiste gedrag op het juiste moment bij de juiste mensen. Dat op zich is een wetenschapsgebied waar nog veel onderzoek nodig is. Dat onderzoek gaat over menselijke psychologie, maar kan daarnaast niet voorbij gaan aan zaken als de invloeden van de voedingsmiddelenindustrie en landelijke en lokale overheden.

Ook in die zin is voedingswetenschap dus een multidisciplinaire wetenschap bij uitstek.


a.
w.
r.
x.
n.
BM

VI. KENNIS EN HERSENEN

24 HOE KAN EEN PLOOIBAAR ORGAAN ALS HET MENSELIJK BREIN ZICH ONTWIKKELEN?

Het menselijk brein bezit een fenomenale complexiteit én een grote maar begrensde plasticiteit. Het kan informatie verwerken en produceren die in voorgaande stappen van zijn evolutie nog volstrekt onbekend was. Bovendien blijft het zich tijdens een mensenleven tot op hoge leeftijd in allerlei richtingen doorontwikkelen. Hoe organiseren de hersenen zoveel flexibiliteit binnen de grenzen van waarvoor ze evolutionair zijn uitgerust?

In de geschiedenis van de wetenschap ontsproten theorieën over de hersenen vaak vanuit de metafoor van een machine. Bij gebrek aan kennis over de breinwerking zelf, veranderde de metafoor met het tijdsgewricht. De hersenen werden achtereenvolgens verondersteld als een stoommachine, telegraaf en computer te functioneren.

Een deel van de wetenschap, zoals psychiatrie, psychologie, taalwetenschappen, geneeskunde en sociologie, probeerde kenmerken van het brein van buitenaf af te lezen uit menselijk gedrag of uit symptomen van ziekte. De biologie concentreerde zich op de anatomie, de fysiologie en de genetica van de binnenkant van het (vaak al overleden) brein.

Pas sinds kort wordt het, onder meer dankzij nieuwe beeldvormende technieken, mogelijk om de twee benaderingen aan elkaar te verbinden. Hoge-resolutie scans tonen hoe het zich ontwikkelende brein nieuwe verbindingen legt, en in proefdieren is het al mogelijk enkele zenuwcellen selectief aan- en uit te schakelen.

De integratie en uitbouw van *cognitive neuroscience* wordt in Nederland gecoördineerd en aangejaagd door een Nationaal Initiatief Hersenen en Cognitie (NIHC) en omvat onder meer wetenschapsgebieden zoals 'taalproductie' (hoe genereren hersenen taal?), neurale en cognitieve ontwikkeling van kinderen (welke grenzen stelt het zich ontwikkelende brein aan wat een kind kan leren?), en onderzoek aan grote, goed gedefinieerde cohorten via een uitgebreid netwerk van onderzoeksinfrastructuur.

Chauffeurs zonder rijbewijs

De wetenschap is dus goed voorbereid om de komende jaren flinke stappen te zetten in het beantwoorden van fascinerende én belangrijke vragen over de ontwikkeling van cognitieve vermogens zoals geheugen, taal, perceptie, sport, spel en emotie in de menselijke hersenen.

Hoe kunnen cognitieve functies en hun ontwikkeling worden verklaard vanuit de onderliggende principes van hersenwerking en de volwassenwording (maturatie) van het menselijk brein?

En waar we vroeger dachten dat de hersenen rond het einde van de puberteit waren uitontwikkeld, weten we nu dat de voorste kwab van de hersenschors (de prefrontale cortex) zich nog tot voorbij het dertigste levensjaar doorontwikkelt. Twintigers zijn in zekere zin chauffeurs zonder rijbewijs, want nog niet klaar met hun ontwikkeling van impulsgestuurd tot zelfsturend organisme. Welke consequenties heeft dat voor hun vermogen om motivatie en affectie te vertalen naar doelgericht gedrag, en onze pogingen dit gedrag te stimuleren? Kunnen we ze al verantwoordelijk houden voor dat gedrag?

En hoe behoudt het brein zelfs tot op hoge leeftijd zijn opmerkelijke plasticiteit? Hoe kunnen de hersenen leeftijdsgebonden beperkingen compenseren?

Een verwante, maar aparte vraag is hoe zo'n uitermate flexibel orgaan, dat in staat is tot spreken, dichten, musiceren en telefoonapplicaties ontwerpen, door evolutie in betrekkelijk korte tijd kan zijn ontstaan. Hoe konden hersengebieden die ooit verantwoordelijk waren voor het verwerken van visuele prikkels uiteindelijk zo oneindig veel meer, terwijl onze voorouders hoofdzakelijk jagend rondtrokken of leefden in kleine landbouwnederzettingen?

Wat leert die opmerkelijke evolutionaire geschiedenis ons uiteindelijk over de mogelijkheden en grenzen van het mensenbrein?

25 ZIJN ONZE HERSENEN WIE WIJ ZIJN?

Vele honderdduizenden mensen in ons land lijden aan een hersenziekte. Dat gaat gepaard met een aanzienlijke ziektelast. Veel hersenonderzoek is daarom direct nuttig voor de volksgezondheid, maar los daarvan is het ophelderen van de werking van het ingewikkeldste orgaan van het menselijk lichaam een van de meest intrigerende vragen die de wetenschap zich kan stellen.

De structuur en de functie van onze hersenen bepalen in essentie wie wij zijn. Ingewikkelde processen zoals bewustzijn, het vormen van herinneringen en het nemen van beslissingen kunnen in toenemende mate begrepen worden in termen van hetgeen zich in de hersenen – in wisselwerking met de omgeving – afspeelt.

Enerzijds zijn krachtige, moleculair-biologische technieken ontwikkeld waardoor we de functie en werking van verschillende stoffen in onze hersenen kunnen onderzoeken. Anderzijds zijn methodes ontwikkeld waarmee hersenactiviteit gemeten kan worden in samenhang met gedrag bij mens en dier.

Een van de grootste uitdagingen voor de nabije toekomst is om deze twee niveaus aan elkaar te koppelen en de tussenliggende processen te ontsluiten.

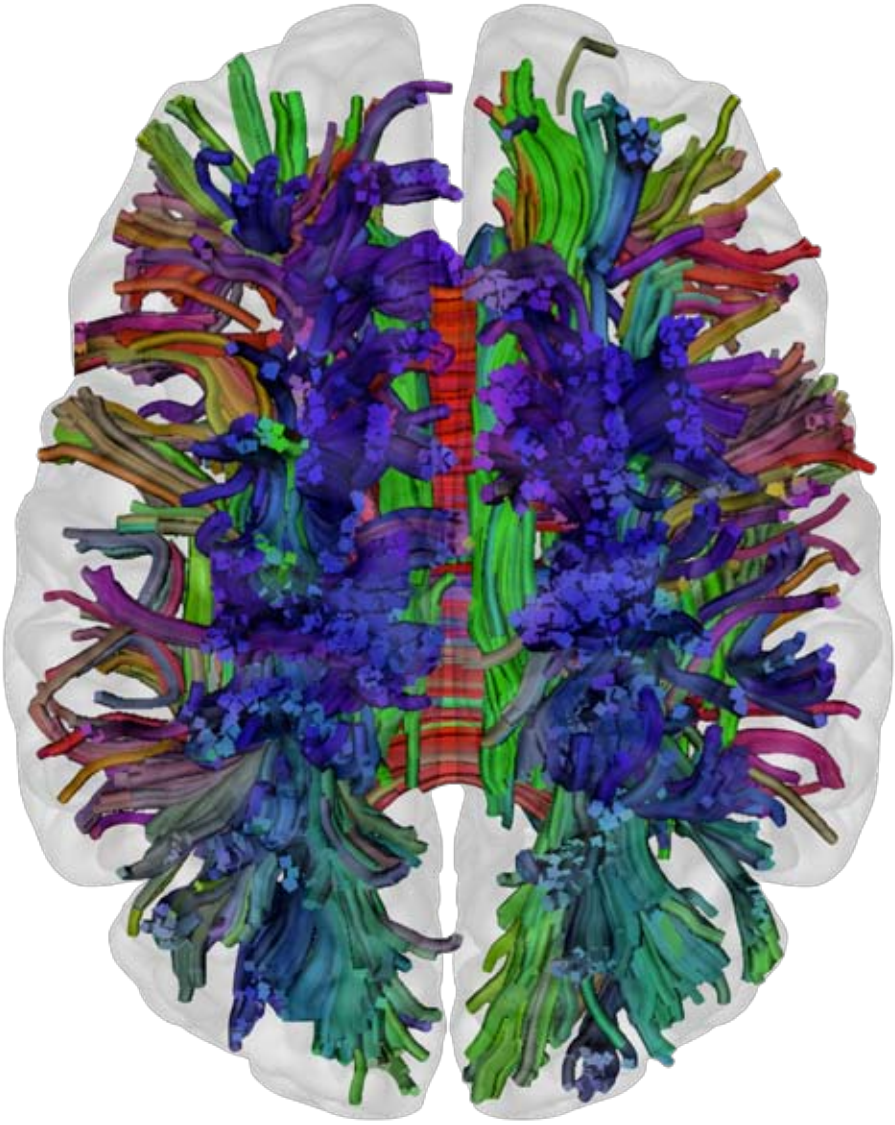
Voortgang in het begrip van deze processen is ook in maatschappelijk opzicht belangrijk, omdat verstoringen in de structuur en functie van de hersenen in toenemende mate een probleem vormen in, onder meer, de gezondheidszorg en de ouderenzorg.

Zowel in de psychiatrie als de neurologie zijn nog veel belangrijke vragen over hersenaandoeningen onbeantwoord. Welke genetische risicofactoren dragen bij aan de kwetsbaarheid voor hersenziektes en welke factoren uit de omgeving bepalen vervolgens of ziekteverschijnselen zich openbaren? In de meeste gevallen zal het gaan om zeer veel genen en zeer veel omgevingsfactoren, die ieder op zich maar in zeer beperkte mate bijdragen aan het totale risico. Intensief, grootschalig, multidisciplinair onderzoek zal daarom noodzakelijk zijn om verder te komen.

Preventie, identificatie van individuen met verhoogd risico, het ontwikkelen van biologische markers in een vroeg stadium van de ziekte en het vinden van nieuwe behandelingen (niet alleen via geneesmiddelen maar ook door gebruik te maken van elektrische stimulatie van hersenweefsel en nieuwe interfaces tussen hersenen en de computer), en het testen van die behandelingen op effectiviteit en veiligheid – het zijn allemaal onderwerpen en vragen waar de komende tien, twintig jaar spectaculaire vooruitgang kan worden geboekt.

Zowel in de neurogenetica als in *neuroimaging* zijn de afgelopen jaren majeure investeringen gedaan om de Nederlandse infrastructuur op internationaal niveau te brengen. Door de dichtheid aan kennis, expertise en apparatuur, en het opzetten van goed georganiseerde en gedocumenteerde patiënten-cohorten, is alles in stelling gebracht om tot een beter begrip van fundamentele hersenprocessen en hersenziekten te komen en tot betere preventie en behandeling.

Langzaam geven onze hersenen hun geheimen prijs – ons wachten nog heel wat verrassende inzichten.



26 Bestaan er universele wetten voor élke menselijke taal?

Wetenschappers ontdekken steeds grotere verschillen tussen menselijke talen. Dat zaait twijfel over de gedachte dat er wetten zijn die gelden voor élke taal. Toch komen alle talen voort uit dezelfde menselijke hersenstructuren. De botsing van deze inzichten roept nieuwe, fundamentele vragen op over menselijke taal.

Het onderzoek naar menselijke cognitie en taalvermogen vertoonde de afgelopen vijftig jaar twee, op het eerste gezicht tegenstrijdige, tendensen.

Aan de ene kant passen psychologien, biologen en hersenwetenschappers al sinds de negentiende eeuw met succes het concept toe van de *psychic unity of mankind* — het principe dat alle mensen, los van cultuur of ras, mentaal en cognitief op dezelfde manier functioneren, een reflectie van het feit dat zij allen over dezelfde neurobiologische mechanismen beschikken.

Anderzijds leggen taalkundigen steeds grotere verschillen bloot tussen talen in uiteenlopende streken van de wereld. Onderzoek aan bijvoorbeeld de Indianentalen van Noord-Amerika, talen van de Aboriginals in Australië en talen die gesproken worden in Nieuw Guinea vindt fundamentele verschillen, die het idee ondermijnen dat alle natuurlijke talen op zijn minst enkele kenmerken of structuren gemeen hebben. Zo blijkt in sommige talen de woordvolgorde willekeurig, kunnen niet alleen werkwoorden maar ook zelfstandige naamwoorden in tegenwoordige, toekomende of verleden tijd staan, of veranderen zelfstandige naamwoorden in werkwoorden wanneer ze als meewerkend voorwerp worden gebruikt. Het menselijk vermogen om te communiceren blijkt veel variabeler dan men lange tijd heeft gedacht.

Bevindingen uit beide tradities met elkaar in het reine brengen, is een van de meest fascinerende wetenschappelijke uitdagingen van dit moment. Die ene grote vraag inspireert taalwetenschappers tot een groot aantal deelvragen.

Babylonische spraakverwarring

Zijn er bijvoorbeeld grenzen aan de diversiteit van menselijke taal? Bestaan er universele taalwetten, die gelden voor elke gesproken taal, maar ook voor de gebarentalen van doven, met elk hun eigen gebarenschat en grammatica?

Waarom zijn talen zo verschillend, terwijl bijvoorbeeld het gezichtsvermogen in de hersenen voor alle mensen op dezelfde manier werkt?

Welke gevolgen hebben de grote verschillen tussen talen? Het Chinees heeft bijvoorbeeld veel korte woorden en het Turks veel lange. Maken Chinese kinderen zich hierdoor hun taal sneller eigen, of in een andere volgorde, dan kinderen in Turkije? En verwerken Chinezen daardoor informatie anders dan Turken?

Vragen zijn er ook over de evolutionaire ontstaansgeschiedenis van taalverschillen. Het bijbelboek Genesis beschrijft de 'Babylonische spraakverwarring' als een straf van god. Je zou inderdaad denken dat taal, sociaal bindmiddel bij uitstek, de neiging heeft zich te ontwikkelen in de richting van uniformiteit. Waarom bracht de evolutie dan toch zulke verschillende talen voort? En waarom blijven er zelfs in een tijd van globalisering en intensieve mediacommunicatie nog voortdurend nieuwe taalverschillen ontstaan?

Een groeiend aantal kenmerken van taal kan worden geanalyseerd met hulp van rekenmodellen en computers. Ook getalsmatig modelleren van taaldiversiteit is daardoor een grote uitdaging. Met steeds sterkere computers zal op dit terrein de komende jaren veel vooruitgang worden geboekt.

Onderzoek naar taal brengt vele disciplines bij elkaar. Een groot aantal wetenschapsgebieden, waaronder de taalwetenschappen, de biologie, de psychologie, de antropologie, de sociologie en de informatica, zullen de komende jaren helpen de reikwijdte én de grenzen van het menselijke taalvermogen te verkennen.

27 WAT BETEKENEN HERSENWETENSCHAPPEN VOOR HET RECHT?

Dankzij nieuwe technieken om in de hersenen te kijken weten we nu veel meer van het menselijk brein dan voorheen. We zijn bovendien in staat om neurofysiologische processen te manipuleren en daarmee menselijk gedrag te beïnvloeden. Al die kennis kan grote gevolgen hebben voor zowel de grondslagen als de praktijk van het recht. Zijn wij verantwoordelijk voor onze daden, of waren het onze oververhitte synapsen?

De hersenen- en cognitiewetenschappen ontraadselen in hoog tempo hoe mensen waarnemen, denken en voelen, en hoe hun geheugen werkt. Tot voor kort konden we die functies vrijwel alleen in psychologische en filosofische termen duiden, maar nu is een groeiend deel ervan te herleiden tot hersenstructuren of fysiologische processen.

Deze wetenschappelijke vooruitgang heeft grote consequenties op het snijvlak tussen recht en ethiek. Zo baseert ons recht zich veelal op een vrije wil. Maar hoe vrij is die wil als sommige gedragspatronen deels in onze hersenen zijn voorgeprogrammeerd of worden gestuurd en beïnvloed door chemische verbindingen?

Door middel van *magnetic resonance imaging* (MRI) valt aan te tonen dat de hersenen van een verdachte tijdens zijn misdaad waren aangetast of beschadigd, waardoor hij zichzelf niet in de hand had toen hij het delict pleegde. Het zal niet lang meer duren voordat de eerste MRI-scans opduiken in pleitnota's van advocaten. Moet de rechter ze accepteren en mee laten wegen in de bewijsvoering of de bepaling van de strafmaat?

Verhoren

De hersenwetenschappen stellen ons ook in staat op nieuwe manieren met het brein te communiceren. Dat zou van pas kunnen komen bij de rechtshandhaving, bijvoorbeeld in het verhoren van vermoedelijke slachtoffers, getuigen of daders.

Door middel van elektromagnetische prikkels kunnen we bepaalde hersendelen stimuleren en zo het geheugen opfrissen. Wanneer een kind mogelijk slachtoffer is geweest van seksueel misbruik, zouden we het plaatjes kunnen tonen van misbruiksituaties en registreren hoe kinderhersenen op die prikkels reageren. Het zou mogelijk kunnen worden mensen te 'verhoren' die niet kunnen, durven of willen praten. Nieuwe varianten van de aloude leugendetector, die in de hersenen kijken, komen eveneens binnen bereik.

Maar is bewijs dat tot stand kwam dankzij dit soort ondervragingstechnieken wel rechtmatig verkregen? Kan de overheid verdachten dwingen inzage in hun hersenen te geven, net zoals zij verdachten nu kan dwingen een bloed- of een DNA-test te ondergaan?

Een gestrafte die steeds weer de fout in gaat, is theoretisch te corrigeren door in zijn hersenen in te grijpen, bijvoorbeeld door een elektrode te plaatsen of door medicatie. Een vroege variant van dat laatste is 'chemische castratie', waarbij psychiaters door toediening van preparaten de hormoonhuishouding van zedendelinquenten beïnvloeden. Nu al stellen officieren van justitie deze vorm van hersenbeïnvloeding regelmatig als voorwaarde voordat patiënten vanuit een tbs-kliniek naar buiten mogen.

Kennis over de hersenen zal steeds meer neurofysiologische technieken voortbrengen die kunnen helpen gestraften in het gareel te krijgen. Ze kunnen wellicht meer succes hebben dan jarenlange, moeizame behandelingen in een tbs-kliniek, en zijn zeer waarschijnlijk goedkoper. Maar vinden we deze behandeling van gedetineerden ethisch aanvaardbaar? Hoe verdragen ze zich met het grondwettelijke recht op de onaantastbaarheid van het lichaam? Geldt dit recht onverkort ook voor de hersenen? Wanneer mag het wijken voor andere belangen?

De vooruitgang in de hersenwetenschappen stelt de rechtswetenschap voor zeer fundamentele vragen. Die vragen wachten op grondig bestudeerde antwoorden, waarbij het zaak is de nieuwe - harde - kennis over onze hersenen op een zorgvuldige wijze in verband te brengen en af te wegen tegen de zachte maar wezenlijke garanties van onze rechtsstaat.

28 Kunnen machines ons helpen kennis te creëren uit bergen informatie?

Informatietechnologie heeft onze cultuur, samenleving en wetenschap ingewikkelder gemaakt. Maar zij kan ons ook helpen die nieuwe complexiteit weer te beheersen. Menselijke kennis en de kracht van computers moeten daartoe zo efficiënt mogelijk worden gecombineerd. Hoe kunnen mens en machine het beste samenwerken? Wie is wanneer aan zet?

De verhouding tussen informatie (in de vorm van gecodeerde gegevens) en kennis (dat wat we weten over de wereld om ons heen) is altijd in beweging.

Het begon ermee dat de mens het schrift uitvond en daarmee voor het eerst informatie buiten zichzelf plaatste. Hij schiep zich een extern geheugen, waardoor hij voor het opslaan van kennis niet langer afhankelijk was van mondelinge overlevering.

De uitvinding van de boekdrukkunst zorgde voor een enorme sprong in de toegánkelijkheid van informatie. En de laatste decennia is gebleken dat we niet alleen de opslag van informatie, maar ook het analyseren van informatie en het denken en redeneren aan intelligente machines kunnen uitbesteden.

Veel impliciete informatie, zoals patronen in gegevens of de betekenis van beelden, kan de computer tegenwoordig expliciet maken. Met behulp van onder meer een uitgebreide structuur van trefwoorden kunnen ook computers tegenwoordig 'begrijpen'. Teksten worden toegankelijk, bevraagbaar en betekenisvol samengevat. Iets vergelijkbaars geldt voor beelden, video, spraak en muziek. Ook contextuele informatie wordt digitaal ontsloten: via het web is te zien wie met wie communiceert, wie welke bron raadpleegt en wie wat leuk vindt of juist niet.

Systemen kunnen zelf nieuwe verbanden leggen tussen gegevens. Zo kan informatie ook zonder tussenkomst van de mens de grondstof zijn voor nieuwe kennis. De verhouding tussen informatie aan de ene kant en menselijke kennis aan de andere kant verandert radicaal. Voor het eerst in de geschiedenis is er veel meer informatie beschikbaar dan menselijke kennis.

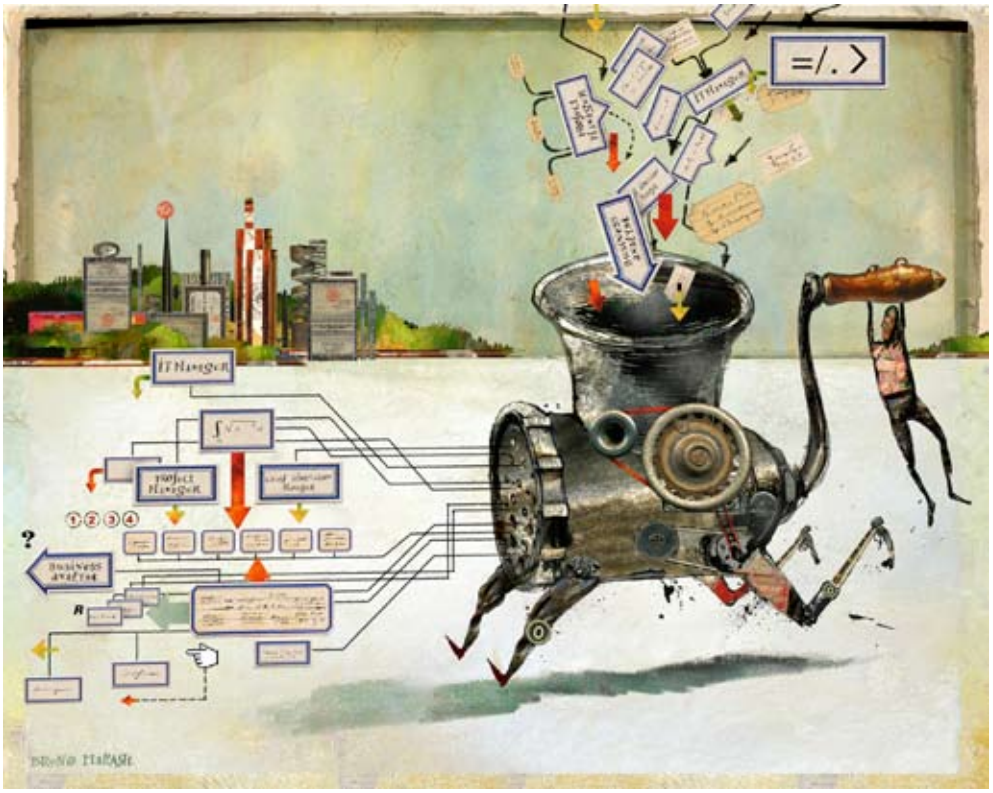
Nieuwe alliantie

Computers mogen dan in staat zijn om zelf te redeneren, er is wel een grens aan wat ze kunnen. Op het ene of het andere moment moet een mens zich ermee bemoeien. Zo zullen artsen die gebruik maken van digitale patiëntendossiers en gedigitaliseerde

protocollen toch zelf beslissen hoe zij patiënten behandelen. En als uit *text mining* van medische publicaties blijkt dat bepaalde stoffen in het menselijk lichaam tegelijkertijd met bepaalde ziekteverschijnselen optreden, dan zal toch een medisch onderzoeker de gegevens interpreteren en besluiten om het verschijnsel al of niet verder te onderzoeken.

Mens en machine zullen samen de groeiende berg gegevens te lijf moeten gaan om er nieuwe, zinvolle en bruikbare kennis aan te ontlenen. Informatiewetenschappers moeten zoeken naar de balans tussen de inzet van de mens en van de machine. Hoe kunnen we de interactie tussen beide modelleren? Hoe kunnen we zo veel mogelijk gebruik maken van de kracht van machinale systemen zonder in te boeten aan betrouwbaarheid of trefzekerheid?

Voor elk scenario zal het optimale evenwicht gevonden moeten worden door kenmerken van de gebruiker, de technologie en de te verrichten taak expliciet te maken en informatie volgens een bepaald algoritme te bewerken. Zo zullen mens en computer een nieuwe alliantie kunnen aangaan, samen bruikbare kennis ontlenen aan een ogenschijnlijk onmeetbare berg informatie en dus samen meer greep krijgen op de wereld om hen heen.



29 HOE VERANDERT DE ARCHITECTUUR VAN DE WETENSCHAP?

De wetenschap is ongekend vitaal en dynamisch. De invloed van wetenschappelijk onderzoek groeit, terwijl structuren en contexten van dat onderzoek verschuiven. Enerzijds neemt de specialisatie nog steeds toe, anderzijds vervagen traditionele grenzen tussen disciplines. Rond maatschappelijke vragen ontstaan nieuwe wetenschappelijke allianties. Die ontwikkelingen roepen nieuwe filosofische vragen op.

Moderne technisch-wetenschappelijke revoluties, zoals die in informatica en binnenkort ook die rond het brein, spelen zich af op intellectueel, maatschappelijk en cultureel vlak. Dergelijke stormachtige ontwikkelingen vragen op verschillende niveaus om filosofische reflectie.

De rol van de filosofie zelf verandert ook: van een afzonderlijke wetenschappelijke discipline ontwikkelt de filosofie zich toch een vak dat wetenschap en samenleving helpt bij het zoeken van antwoorden op nieuwe vragen — vragen die betrekking hebben op vrijheid, op verantwoordelijkheid, en op morele en politieke dilemma's in verdelings- en keuzevraagstukken.

Is een mens vrij, als fysiologische processen in het brein zijn handelen bepalen? Zouden we genetische verbetering van mensen straks accepteren, ook als dat dan is voorbehouden aan de rijken? Hoe beoordelen en wegen we de betrouwbaarheid van informatie, zeker als die niet meer met zekerheid is te herleiden tot een gezaghebbende bron?

Bovenaan de agenda van de filosofie staat de oude wijsgerige vraag naar de aard van onze kennis, en die vraag krijgt in de moderne tijd alleen maar nieuwe urgentie. Wat ís nog de wetenschap in een tijd waarin maatschappelijke opvattingen over wat al dan niet 'wetenschappelijk' is, in korte tijd radicaal kunnen verschuiven?

De boom van de wetenschap heeft veel nieuwe loten gekregen in de vorm van nieuwe disciplines. De dominantie van reductionistische methoden heeft deels plaats gemaakt voor het ideaal van multidisciplinair onderzoek waarin de grenzen tussen oude disciplines vervagen.

Dit alles maakt dat oude eisen aan 'waarheid' en 'geldigheid' van wetenschappelijke uitspraken of theorieën nieuwe doordenking behoeven.

Wereldwijde visie

In feite staat de hele architectuur van onze kennis ter discussie. Rondom actuele vragen ontstaan gelegenheidscoalities van samenwerkende wetenschapsvelden. Hoe verhouden zich deze nieuwe wetenschappelijke constellaties tot de klassieke wetenschapsdisciplines? Hoe kunnen, met almaar toenemende specialisatie en diversificatie, de

eenheid en samenhang van de wetenschap nog worden begrepen? Hoe verhoudt zich de rationaliteit van het wetenschappelijk denken tot die van de *common sense*: ons gewone, alledaagse redeneren en handelen, dat uiteindelijk de bron is voor alle gespecialiseerde denk- en kenvermogens?

Bevredigende antwoorden op deze belangrijke filosofische vragen zijn alleen te verwachten als wordt gewerkt vanuit drie perspectieven.

Om te beginnen een systematisch perspectief, waarin logica en wetenschapsfilosofie worden ingezet om brede denk- en communicatiepatronen bloot te leggen.

Daarnaast het historisch perspectief, dat voortbouwt op de geschiedenis van filosofie en wetenschap en zich toespitst op cruciale transformaties in het denken over samenhang en specificiteit van wetenschappelijke disciplines.

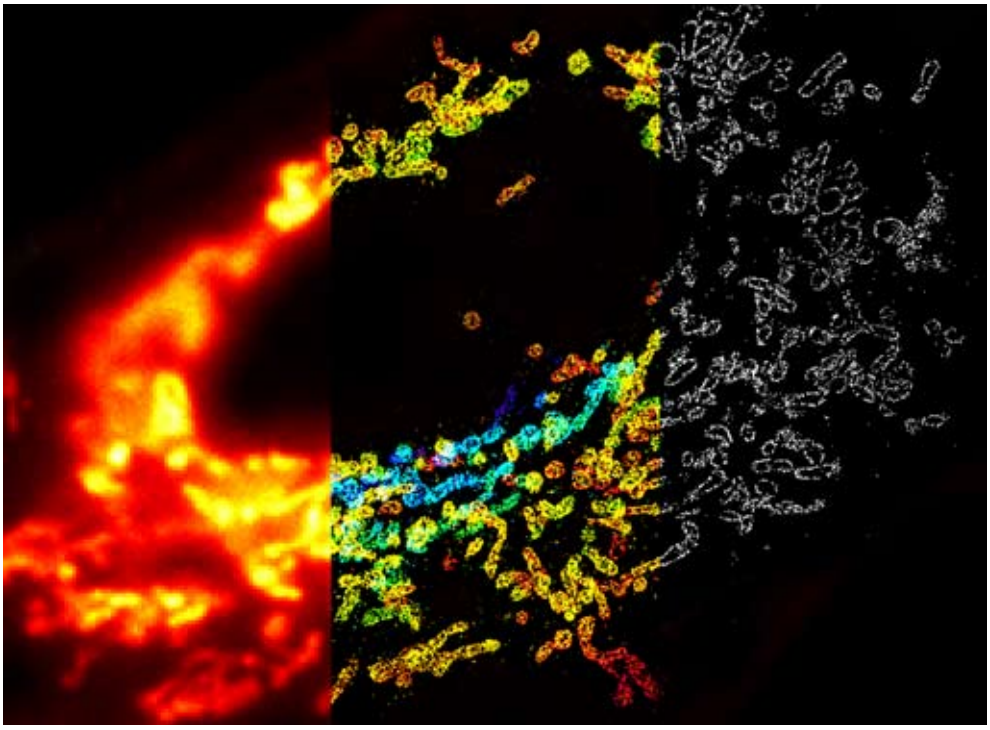
En dan ten slotte het vergelijkend perspectief, met daarin ruime aandacht voor logische en filosofische tradities uit bijvoorbeeld India, de Islambeschaving en China. Voor het ontwikkelen van een wereldwijde visie op de menselijke intellectuele geschiedenis zal een brede blik onmisbaar zijn.

VII. LEVEN EN CHEMIE

30 HOE VERLOPEN BIOCHEMISCHE REACTIES IN LEVENDE CELLEN?

Chemische processen die zich afspelen in levende cellen zijn in het verleden ontrafeld doordat biochemici ze imiteerden in de steriele omgeving van de reageerbuis. Nieuwe soorten microscopen gaan het mogelijk maken om plaatjes te schieten van diezelfde reacties terwijl ze zich afspelen in de levende cel. Hoe werkt biochemie écht, in de complexe realiteit van het leven?

In de geschiedenis van de biologie en de biochemie pluisden wetenschappers cellen en organellen steeds verder uiteen om te kunnen ontdekken welke processen zich afspelen in de levende cel. In laboratoria herhaalden en controleerden ze die processen onder kunstmatig vereenvoudigde omstandigheden.



Met geavanceerde detectiemethoden bepaalden ze de ruimtelijke structuur van tienduizenden eiwitten, waaronder veel enzymen. Elektronenmicroscopen maakten het mogelijk om dergelijke ingewikkelde moleculen soms tot op het detailniveau van atomen te zien. Maar al die technieken vertelden samen het verhaal van chemische reacties in een morsdode, kunstmatig geprepareerde omgeving.

De afgelopen jaren zijn nieuwe microscopische technieken ontwikkeld die de belofte in zich dragen om ook in een complexe, levende omgeving biochemische moleculen tot op het kleinste niveau zichtbaar te maken.

Oplossend vermogen

Een van die nieuwe technieken is bijvoorbeeld *photoactivated light microscopy* (PALM), waarin fluorescerende moleculen in de cel zelf als minuscule lichtbronnen voor de microscoop worden gebruikt.

Een andere techniek, *stimulated emission depletion* (STED) geheten, maakt slim gebruik van externe laserflitsen om van die moleculaire lichtbronnen ook nog eens alles behalve het middelste lichtpuntje af te dekken. Hoe kleiner het lichtpuntje, hoe groter het oplossend vermogen van de microscoop.

Op dit moment zijn biochemici met zulke microscopen in staat structuren te onderscheiden die meer dan enkele tientallen nanometers (1 nanometer is een miljardste meter) uit elkaar liggen. Dat is heel weinig, maar nog steeds te veel om kleine structuren in de cel scherp te zien.

De verwachting is echter dat het oplossend vermogen de komende jaren nog tien keer groter kan worden, misschien zelfs nog meer. Als dat lukt, dan kunnen de nieuwe microscopen straks even gedetailleerde plaatjes maken als de aloude elektronenmicroscoop, maar dan in een levende in plaats van een dode cel, en hopelijk zo snel achter elkaar dat het verloop van biochemische processen *live* kan worden gevolgd.

Met zulke technieken in aantocht durven wetenschappers te hopen dat we in de toekomst zullen begrijpen hoe biochemische reacties zich in levende cellen voltrekken. Verloopt de synthese van grote eiwitmoleculen in de viskeuze soep van de cel anders dan in de reageerbuis? Waar vindt die eiwitsynthese precies plaats en hoe snel? Hoe beïnvloeden al die verschillende biochemische processen elkaar? En verlopen biochemische reacties in de ene levende cel misschien anders dan in de andere? Welke rol speelt het toeval daarin?

Om al deze fascinerende vragen te kunnen beantwoorden moeten de microscopische technieken de komende jaren eerst verder worden ontwikkeld. Nodig zijn bijvoorbeeld methoden om fluorescerende moleculen op elke gewenste plek in de cel te krijgen en nieuwe manieren om het licht dat ze uitzenden nog nauwkeuriger en sneller te detecteren en te analyseren. Maar de te verwachten inzichten maken al dat werk meer dan de moeite waard.

31 KUNNEN WIJ ZELF EEN LEVENDE CEL IN ELKAAR ZETTEN?

Complete bouwpakketten voor cellen zijn er nog lang niet – de echte wetenschappelijke kwesties zijn voorlopig nog heel wat bescheidener, maar niet minder intrigerend. Kunnen we een levende cel zo verbouwen dat die nieuwe taken voor ons kan uitvoeren? Kunnen we losse onderdelen van levende cellen gebruiken voor de bouw van nieuwe materialen en misschien zelfs apparaten?

Synthetische biologie is een logisch vervolg op de explosieve groei in kennis en informatie van de moleculaire biologie, genetica, scheikunde en biochemie, die mogelijk is gemaakt mede door tal van technologische ontwikkelingen en de inbreng van andere disciplines als de natuurkunde, computerwetenschappen, bioinformatica en *bioengineering.*

We kunnen al bijna in een handomdraai het complete DNA van grote en kleine organismen ontrafelen, we kunnen grote stukken DNA in het laboratorium nabouwen, we kunnen nagaan welke genen in een organisme aan staan en welke uit – en dus welke stoffen er op dat moment worden gebouwd. De taak van verschillende moleculen en de levensloop van cellen kunnen nauwkeurig worden gevolgd.

Synthetische biologie maakt van al deze kennis gebruik om nieuwe, kunstmatige, cellulaire of niet-cellulaire systemen te creëren.

Herontwerpen

Het is nog lang niet zo ver dat we cellen op de tekentafel kunnen herontwerpen of veranderen en vervolgens in het laboratorium in elkaar kunnen knutselen. Het is meer een kwestie van steeds opnieuw modelleren, *trial and error* en slim gebruik maken van de mogelijkheden van natuurlijke selectie.

Het werkgebied van de synthetische biologie is enorm en omvat niet alleen het verbouwen of herontwerpen van levende cellen maar ook de constructie van nieuwe systemen op basis van celonderdelen zoals membraanlipiden, receptoren, kanaaleiwitten en enzymen. Zulke constructies *in vitro* ('in de reageerbuis') maken gebruik van de unieke eigenschappen van biomoleculen en van de ongekende mogelijkheden van de organische chemie om moleculen en materialen bijna naar wens te maken.

Synthetische biologie staat als technologie nog in de kinderschoenen, maar de mogelijkheden voor het construeren van cellen met bijvoorbeeld nieuwe detectiemogelijkheden en het maken van zelf-assemblerende biologische materialen zijn ongekend. Het gebied heeft daarom ook een grote vlucht genomen en wordt wereldwijd breed

ondersteund. Of we er ooit, en dan niet alleen voor de bühne, werkelijk in zullen slagen een zelfstandig levende cel vanuit een bouwpakket in elkaar te zetten, is nog steeds een open vraag. De mogelijkheden hiervoor komen echter steeds meer binnen bereik.

32 KUNNEN WE ORGANEN NABOOTSEN OP EEN CHIP?

Chips worden niet alleen meer gebruikt om computers te laten rekenen; wetenschappers bouwen tegenwoordig ook chips waarop ze biologische cellen nauwkeurig kunnen volgen. Via ragfijne kanaaltjes wisselen die cellen onderling stoffen en signalen uit. Kunnen we in de toekomst chips maken die kleine 'weefsels' of misschien zelfs 'organen' nabootsen?

De technische wetenschappen en de *life sciences* groeien steeds meer in elkaars richting. Biologische processen dienen als inspiratiebron voor technische ontwerpen, terwijl technologische innovaties het mogelijk maken biologische processen steeds nauwkeuriger te bestuderen. Steeds vaker ook schuiven de twee disciplines volledig ineen, bijvoorbeeld door elektronica de functies van levende cellen te laten overnemen.

Het omgekeerde gebeurt echter ook: biologische cellen die in leven worden gehouden in vloeistofcompartimentjes van een chip, onderling verbonden door haardunne kanaaltjes of halfdoorlatende membraantjes. Alles wat op de chip gebeurt, wordt in hoge resolutie gevolgd met microscopen en elektrische micro- en nanosensoren – het is alsof een heel laboratorium op één stukje silicium is samengebald.

Gecombineerde kennis op het gebied van life sciences, biofysica, nanotechnologie en het ontwikkelen van computerchips geeft wetenschappelijke kansen om misschien ooit te komen tot de ontwikkeling van 'een lichaam op een chip'. De eerste stappen op weg naar complexe biologische chips zijn in Nederland al gezet en het is haalbaar om op afzienbare termijn weefsels op chips te simuleren.

Modellen

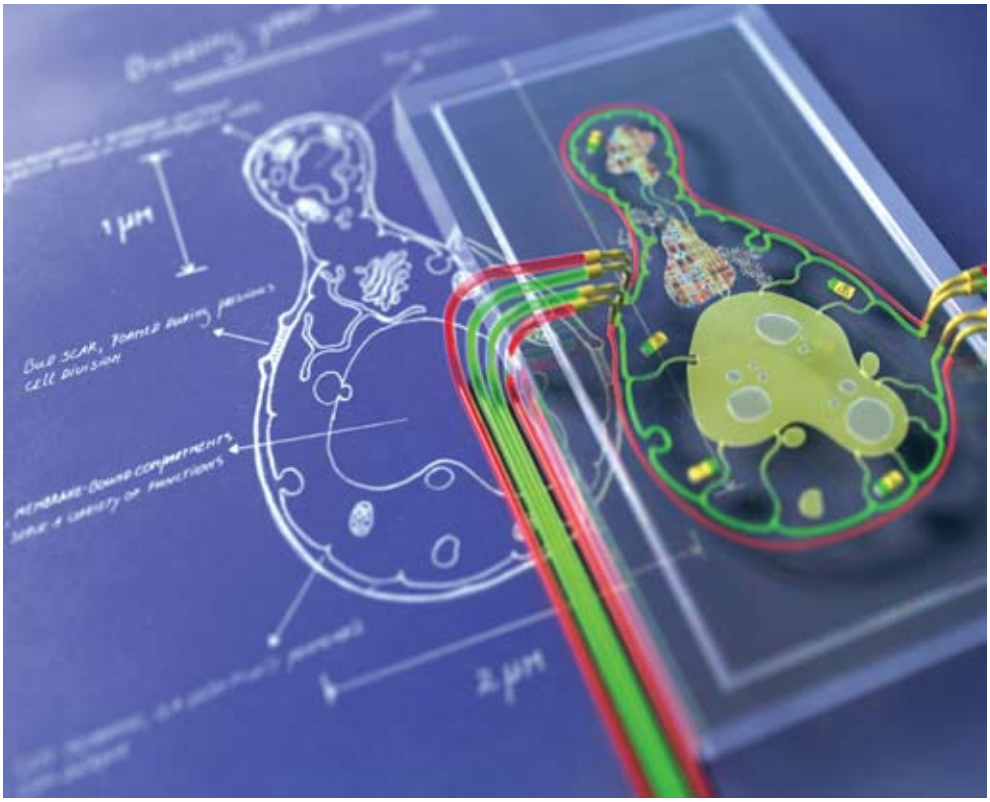
Op dit moment werken biofysici nog met relatief simpele modellen: hun chips bevatten bijvoorbeeld duizenden cellen van maar één type. De volgende stap zal zijn om met meerdere celtypen op één chip het biologische gedrag van een complex weefsel te imiteren, de opmaat naar het simuleren van een orgaan.

Uiteindelijk zouden we zulke 'organen' weer kunnen koppelen en onderzoeken hoe ze samenwerken of reageren op een van buitenaf toegediende chemische stof. Dat zou ons niet alleen veel leren over de werking van échte organen, we zouden het ook kunnen gebruiken om bedoelde en onbedoelde effecten van medicijnen te voorspellen.

Deel van de uitdaging is het bouwen van systemen op meerdere biologische niveaus. Naast chips die de interacties tussen grote groepen cellen imiteren, kunnen ook chips worden ontwikkeld die juist nabootsen wat er binnenin één cel gebeurt. Zo'n chip zou het mechaniek van een individuele cel kunnen nabootsen door de afzonderlijke elementen van de cel apart te zetten en hun interactie te controleren.

Het onderzoek kan antwoord geven op fascinerende fundamentele vragen. Kunnen we op een chip systemen bouwen waarin cellen op nieuwe, onvoorspelbare manieren met elkaar beginnen samen te werken? Bij welke graad van complexiteit begint het systeem onvoorspelbaar gedrag te vertonen? Kunnen we de interacties leren begrijpen, bijvoorbeeld door individuele elementen van het systeem aan- en uit te schakelen? Kunnen we systemen bouwen met door ons gewenst complex gedrag?

Daarnaast zouden deze chips in de toekomst toepassingen kunnen krijgen in de geneeskunde, zoals bij het onderzoek naar de effecten van behandelingen en bij de ontwikkeling van nieuwe generaties geïmplanteerde sensoren.



33 KAN CHEMISCHE REACTIVITEIT THEORETISCH WORDEN VOORSPELD?

Het experiment speelt in de chemie traditioneel een cruciale rol: om te weten hoe een chemische reactie gaat aflopen, moet die reactie in het laboratorium worden uitgevoerd. Stap voor stap leren chemici echter om chemische reacties met rekenmodellen te simuleren. Met simpele moleculen werkt het al. Maar is het mogelijk om met zulke modellen ook het verloop van heel complexe reacties te voorspellen?

In de geschiedenis van de scheikunde heeft het principe van *trial and error* altijd een grote rol gespeeld. Chemische reacties speelden zich per definitie af in de 'reageerbuis', en wie nieuwe synthesemethoden, alternatieve reagentia, betere medicijnen of nieuwe materialen wilde ontwikkelen, ontkwam er niet aan om vele laboratoriumexperimenten te doen.

In de afgelopen vijftig jaar heeft de theoretische chemie gewerkt aan manieren om chemische processen te vangen in betrouwbare rekenmodellen. Combinaties met experimenteel onderzoek maakten het mogelijk die modellen te testen, bij te stellen en steeds verder uit te bouwen.

Het kunnen naspelen en voorspellen van chemische reacties in de computer zou chemici grote mogelijkheden bieden. Ze zouden nieuwe moleculen, reacties en materialen kunnen ontwerpen zonder voortdurend terug naar het laboratorium te hoeven om te controleren of wat ze hadden verzonnen in het echt ook mogelijk is.

Computermodellen zouden hen te voren kunnen vertellen welke structuur de tussen- en eindproducten hebben, hoe stabiel ze zijn, hoe gemakkelijk ze reageren met andere moleculen, welke fysische eigenschappen ze bezitten en hoe je hun aanwezigheid met spectroscopen kunt aantonen.

Het bezit van goede modellen zou voor veel chemici een heel andere manier van werken inluiden. Gebruiksvriendelijke computermodellen zouden de creatieve mogelijkheden van vrijwel elke chemicus sterk verruimen. Niet langer gehinderd door allerlei praktische beperkingen van het laboratorium zouden ze nieuwe moleculen, materialen en katalytische reacties kunnen verzinnen, die dan na afloop in het laboratorium alleen nog te hoeven worden gecontroleerd.

Nauwkeurigheid

In de afgelopen vijftig jaar is grote vooruitgang geboekt. Op dit moment is het al mogelijk chemische reacties tussen enkele atomen zeer nauwkeurig te modelleren: de computer berekent hoe de diverse atoomkernen en elektronen door de wetten van de kwantummechanica op elkaar inwerken en voorspelt met grote betrouwbaarheid wat de uitkomsten van de reacties zullen zijn.

Ook iets complexere chemische reacties tussen enkele tientallen atomen zijn al binnen het bereik van rekenmodellen, zij het dat wel concessies moeten worden gedaan op het gebied van nauwkeurigheid en detail. Naarmate de moleculen en hun onderlinge kwantummechanische relaties complexer worden, neemt de omvang van de benodigde berekeningen namelijk razendsnel toe. De benodigde rekenkracht van computers wordt dan al snel een beperkende factor.

De komende decennia wordt de grote uitdaging voor de theoretische chemie het ontwikkelen van efficiënte rekenmodellen die reacties met honderden atomen redelijk nauwkeurig kunnen simuleren. De berekeningen zullen, in chemische vaktermen gesproken, nauwkeurig moeten zijn tot 0,5 kilojoule per mol.

En net als in de harde werkelijkheid van het experiment of de natuur zullen de modellen die reacties ook in complexe omgevingen betrouwbaar moeten kunnen voorspellen, zodat ook enzymreacties en reacties in oplossing met behulp van de theoretische chemie kunnen worden aangepakt.

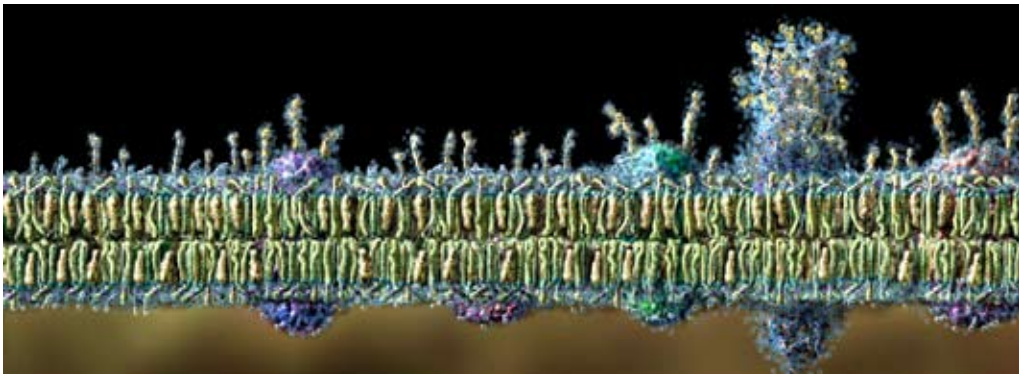
34 Kunnen we moleculen zichzelf laten assembleren tot nieuwe structuren?

Chemische synthese beperkte zich ooit tot het samenvoegen van atomen tot moleculen, met sterke elektronenverbindingen als 'lijm'. In de natuur gebruiken moleculen ook andere aantrekkingskrachten om zich spontaan te assembleren tot steeds grotere structuren. Hoe ver komen chemici met het imiteren van die werkwijze, en kunnen ze zo geheel nieuwe materie construeren?

Tegenwoordig zijn er vele geraffineerde methoden om moleculen te fabriceren en te analyseren. Door het synthetiseren van miljoenen nieuwe moleculen zijn de afgelopen eeuw tal van nieuwe materialen, medicijnen, energiedragers en hulpstoffen voortgebracht.

Moleculen zijn opgebouwd uit atomen die elkaar vasthouden door elektronen te delen. Bij het creëren van nieuwe moleculen kunnen zulke sterke, 'covalente' verbindingen gemaakt of juist verbroken worden. Daarnaast oefenen moleculen onderling krachten op elkaar uit, bijvoorbeeld via tegengestelde elektrische ladingen of door een gezamenlijke aversie tegen water. De meeste van deze krachten zijn zwakker dan covalente verbindingen, maar daarom zijn ze nog niet minder belangrijk. De functies van moleculen zijn rechtstreeks gerelateerd aan hun interacties met andere moleculen.

In de natuur spelen de wisselwerkingen tussen vele verschillende moleculen een essentiële rol. Ze helpen moleculen onder meer zichzelf spontaan te assembleren tot complexe, multi-moleculaire structuren, zoals chromosomen en de membranen die alle biologische cellen omgeven.



Symmetrie

De laatste jaren is het mogelijk geworden zelfassemblage van moleculen op beperkte schaal te imiteren. Zo kunnen we nu moleculen maken die zich spontaan tot microscopisch kleine bolletjes aaneenklonteren. Voorbeelden van zulke bolletjes zijn de 'liposomen' die worden gebruikt om, bijvoorbeeld, medicijnen te beschermen terwijl ze door de huid of door de bloedbaan worden getransporteerd.

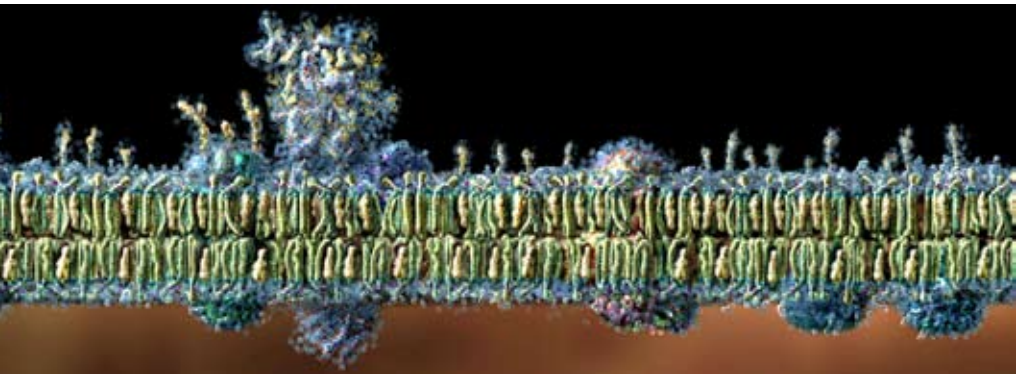
In de natuur gaat zelfassemblage nog veel verder en ze vindt plaats op vele niveaus. Vele verschillende (macro)moleculen assembleren zich tot onderdelen van cellen, en die onderdelen assembleren zich op hun beurt weer tot complete cellen. Cellen vormen weefsels, weefsels vormen organen en organen vormen organismen.

Nu we door middel van zelfassemblage complexer structuren met nieuwe eigenschappen willen synthetiseren, doemen nieuwe en fundamentele vragen op.

In nauwe samenwerking met biologen, fysici, natuurkundigen en technologen moeten chemici meer inzicht verwerven in het gedrag van grote aantallen moleculen en van mengsels van vele verschillende macromoleculen en andere verbindingen. Hoe organiseren moleculen zich onder deze complexe omstandigheden? Hoe belangrijk zijn de vorm en de symmetrie van de afzonderlijke moleculen, en hun vermogen om vormveranderingen te ondergaan? Onder welke omstandigheden (zoals temperatuur) vindt zelfassemblage plaats?

Wetenschappers willen toe naar het begrijpen en construeren van assemblages die bestaan uit steeds meer, en steeds meer verschillende componenten. Afzonderlijke componenten zouden complexe vormen hebben die precies in elkaar passen, net als in de natuur. Ze zouden ook betrokken kunnen zijn bij allerlei chemische omzettingen.

Uiteindelijk dromen onderzoekers ervan zelfassemblage te gebruiken om nieuwe materialen met bijzondere optische, biomedische of andere eigenschappen te ontwerpen en te synthetiseren. Dynamische materialen zouden steeds meer gaan lijken op wat we kennen uit de biologie, en de huidige kloof tussen dode en levende materie zou deels gevuld kunnen worden. Geen wonder dus dat chemische zelfassemblage behoort tot de meest uitdagende vakgebieden binnen de moleculaire wetenschappen.



35 HOE ONTWERPEN WE DUURZAME CHEMISCHE PRODUCTIEMETHODEN?

De chemie heeft een grote rol bij het zoeken naar oplossingen voor een centrale uitdaging in de 21ste eeuw: meer en duurzame welvaart bewerkstelligen voor een groeiende en zich ontwikkelende wereldbevolking. Fundamenteel nieuwe chemische synthesemethoden zullen complexere moleculen moeten maken met minder afvalproducten, en ons moeten helpen nieuwe energie- en grondstofbronnen aan te boren.

De twintigste eeuw kende vele doorbraken, niet het minst in de chemie. We leerden hoe moleculen eruit zien en werken, en hoe we ze kunnen omzetten in bijna elk gewenst eindproduct.

Het leidde in de loop van de jaren tot een rijkdom aan meststoffen, kunststoffen, farmaceutica en nieuwe materialen, en daarmee tot voldoende voedsel, gezondheid en welvaart. Maar het heeft nog niet geleid tot een duurzame, eerlijk verdeelde wereldeconomie die volledig voorbereid is op de toekomst.

Ondanks de enorme voortgang die is gemaakt, is de chemie in de kern tot nu toe relatief weinig veranderd. Een groot deel van de chemische productie is nog steeds afhankelijk van fossiele grondstoffen zoals aardolie. In kolven en tanks laten we stoffen

met elkaar reageren tot nieuwe verbindingen. Hoe ingewikkelder het eindproduct, hoe meer reacties er nodig zijn, elk met hun eigen afvalproducten. Bij de fabrikage van veel farmaceutica ontstaan daardoor voor elke kilogram geneesmiddel honderden kilogrammen chemisch afvalproduct.

De raffinagesector is wel veel schoner (minder dan 0,01 gram afval per kilogram product), maar produceert desondanks afval omdat de omvang van de productie vele malen groter is.

Het zijn maar enkele aspecten van wat voor de mensheid de komende eeuw een centrale uitdaging zal zijn: nieuwe, hernieuwbare grondstoffen en duurzame productiemethoden vinden voor het genereren van voldoende voedsel, materialen en energie.

Voor een werkelijk CO_2-neutrale samenleving zal fundamenteel nieuwe kennis nodig zijn. Chemici moeten daarom op zoek naar grote doorbraken op het gebied van (bio)chemische en katalytische syntheseroutes, chemische proces- en nanotechnologie en combinaties daarvan.

Niet-fossiele grondstoffen

Om de hoeveelheid chemisch afval terug te brengen, zullen we efficiënte manieren moeten vinden om, net als in de natuur, restproducten die tijdens de synthese ontstaan te hergebruiken. Een alternatief kan zijn het ontwerpen van dermate selectieve syntheseroutes dat geen restproducten meer worden gevormd. Dit kan alleen maar gerealiseerd worden via slimme combinaties van nieuwe reactorconcepten en katalysematerialen.

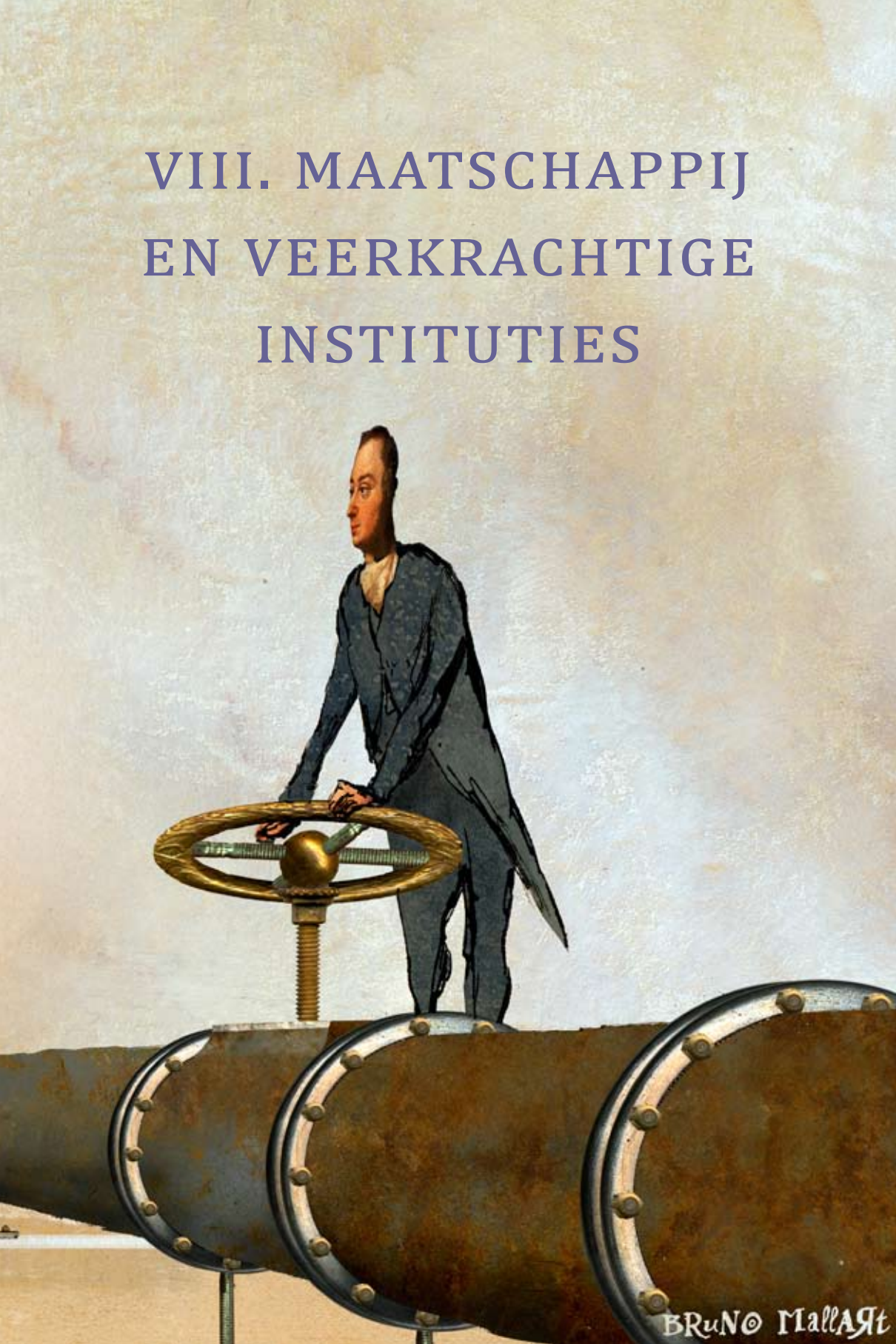
Waar veel van de hedendaagse chemie is ontworpen om zuurstofatomen in te brengen bij zuurstofarme fossiele grondstoffen, zoals aardolie en aardgas, zal het in de toekomst steeds belangrijker worden om zuurstofatomen selectief te verwijderen uit plantaardige grondstoffen, die rijk zijn aan zuurstof. Biomassa, het product van de fotosynthese in groene planten, bestaat hoofdzakelijk uit koolhydraten. Echter om toepassingen te vinden als chemische bouwsteen moet uit deze koolhydraten op een selectieve manier zuurstof verwijderd worden. Dit vergt een grondige verandering in het arsenaal aan katalysatoren dat chemici de afgelopen decennia ontwikkeld hebben om fossiele grondstoffen nuttig te gebruiken.

Een grote en fascinerende uitdaging ligt in het ontwerpen van kunstmatige fotosynthese-systemen die zonlicht kunnen gebruiken om kooldioxide en water rechtstreeks om te zetten in methanol, ethanol en koolwaterstoffen. Zulke stoffen zouden direct kunnen worden toegepast, als brandstof of als chemische bouwstenen voor complexere moleculen en materialen. Dit alles vergt een substantiële verhoging van de katalytische rendementen en het actief aansturen van chemische processen op moleculaire schaal.

Chemici willen snel fundamenteel nieuwe kennis genereren op al deze terreinen, uit academische nieuwsgierigheid én vanuit de wens om, samen met de industrie, te werken aan oplossingen voor een urgente behoefte: een wereld waarin veel meer mensen, op duurzame wijze, kunnen profiteren van voldoende welvaart, voedsel, grondstoffen en energie.

8334/10
34
ONE
AMERICA
5
E. DE WINTER
AMF
20

VIII. MAATSCHAPPIJ EN VEERKRACHTIGE INSTITUTIES



36 HOE MOETEN WE MARKTEN INRICHTEN EN BEWAKEN?

Meer concurrentie leidt niet altijd tot optimale marktwerking. Soms pakt het zelfs slecht uit. Voor het vormgeven en bewaken van markten zijn sterke instituties nodig. Multidisciplinair experimenteel onderzoek kan antwoord geven op de vraag hoe deze instituties moeten worden ingericht om optimale welvaart te brengen.

Het economisch beleid van westerse overheden onderkent niet altijd dat markten gemaakt en bewaakt moeten worden en dat de vrije markt ook een slecht instrument kan zijn. Veel van het beleid gaat uit van drie hypothesen: liberalisering leidt tot meer concurrentie; concurrentie leidt tot kostenverlaging, hogere productiviteit, betere kwaliteit van producten en meer innovatie; en elk van deze elementen draagt bij aan welvaartverhoging. Samengevat: concurrentie is goed en meer concurrentie is beter.

De economische theorie en werkelijkheid zijn echter niet zo simpel. De hoofdstelling van de welvaartseconomie (gegeven bepaalde condities, wordt welvaart gemaximaliseerd als ieder individu zijn eigen belang nastreeft op een vrije markt) wordt door beleidsmakers soms ook toegepast op situaties waarin absoluut niet aan die voorwaarden is voldaan. De kredietcrisis heeft overtuigend laten zien wat er mis kan gaan.

De vraag is: welke instituties voor de inrichting en regulering van markten zijn onder de hedendaagse omstandigheden optimaal?

De afgelopen 65 jaar deden economen veel onderzoek naar gevolgen van het versoepelen van relatief 'technische', niet fundamentele, voorwaarden voor de vrije markt. Meer recent verschuift de aandacht echter naar meer fundamentele oorzaken van marktfalen: het ontbreken van de vereiste institutionele structuur (bijvoorbeeld door scheve machtsverhoudingen), fundamentele onzekerheid en onvoorspelbaarheid, en actoren die hun behoeften op begrensd rationele wijze bevredigen.

Berg

Uit onderzoek weten we bijvoorbeeld al dat in marktsituaties waarin kwaliteit niet te garanderen is, meer concurrentie in de praktijk slecht kan uitpakken. Ook weten we dat traditionele indicatoren van concurrentie-intensiteit misleidend kunnen zijn, reden waarom in Nederland een betere indicator werd ontwikkeld (de winstelasticiteit). De grafiek van de relatie tussen deze concurrentie-indicator en welvaart (of innovatie) toont niet een rechte lijn omhoog ('meer concurrentie betekent altijd meer welvaart') maar een kromme in de vorm van een berg: té hevige concurrentie leidt weer tot daling van welvaart en innovatie.

Empirisch onderzoek kan ons helpen te bepalen waar het omslagpunt, de top van de berg, precies ligt. De theorie van *mechanism design* vertelt hoe we markten of instituties moeten ordenen om in de buurt van de top uit te komen. De uitdaging is voldoende rekening te houden met beperkte rationaliteit van marktpartijen en '*agency*-problemen' van bedrijven – zoals strijdige belangen van directies en aandeelhouders.

Vragen zijn bijvoorbeeld: hoe transparant moet de markt zijn om consumenten te kunnen laten kiezen? Hoe moeten markten en instituties eruit zien? Hoe kan het recht helpen om fundamentele onzekerheid te verminderen en gedrag te normeren maar ook creatieve experimenten mogelijk te maken?

De resultaten van zulk onderzoek worden experimenteel getoetst, in de hoop sterkere instituties te ontwerpen. Instituties kunnen bijvoorbeeld op kleine schaal worden nagebouwd en in een economisch laboratorium getest.

Kunnen marktprikkels negatief uitwerken op de intrinsieke motivatie van actoren? Leidt meer marktwerking tot meer zelfzucht of juist tot moreler gedrag? Multidisciplinaire samenwerking tussen economen, juristen en psychologen zal essentieel zijn om dergelijke vragen overtuigend te beantwoorden.

37 HOE KUNNEN WE NIEUWE VORMEN VAN SOCIALE ONGELIJKHEID HET BEST TEGENGAAN?

Toenemende economische gelijkheid tussen hoogopgeleide mannen en vrouwen leidt, ironisch genoeg, tot groeiende ongelijkheid tussen sociale klassen. Rijke tweeoudergezinnen lopen uit op de rest. Internationale vergelijking kan uitwijzen welke (overheids)maatregelen het best bijdragen aan het beperken van nieuwe vormen van sociale ongelijkheid onder jonge én oudere generaties.

Het ontstaan en voortbestaan van sociale ongelijkheid tussen groepen mensen – sociale klassen, generaties of seksen – is een oud studiethema binnen de sociale wetenschappen.

Voor de verklaring van ongelijkheid gebruiken sociale-wetenschappers gestandaardiseerde statusverwervingsmodellen, die gebruik maken van gegevens over kennis/

opleiding en sociaal-culturele achtergronden en vaardigheden. Deze modellen blijken echter maar gedeeltelijk te voldoen, want ze beperken zich tot kenmerken van het individu.

Om sociale ongelijkheid goed te begrijpen, zullen we meer dan voorheen ook moeten kijken naar de invloed van sociale verbanden, zoals families waar het individu deel van uitmaakt en soms van afhankelijk is. Tot nu toe werd dat perspectief eigenlijk alleen meegenomen in onderzoek dat specifiek keek naar de jeugd.

Individuele prestaties en levenskansen zijn echter op vele manieren afhankelijk van gezins- en familierelaties en andere sociale netwerken. Ongelijkheden worden bijvoorbeeld ook doorgegeven, versterkt of weggewerkt door 'homogame' gezinsvorming – de gewoonte om een partner in de eigen sociale klasse te zoeken. Twee partners met een academische opleiding hebben aanzienlijk meer te besteden dan twee partners met een laag opleidingsniveau.

Ook zorg- en financiële verplichtingen hebben grote effecten op de prestaties en kansen van individuele leden van een familie. Een vrouw die veel investeert in zorg voor de kinderen en/of hulpbehoevende ouders, kan geen carrière maken. Intergenerationele overdracht van vaardigheden en gedragsstijlen, zoals leermotivatie of criminaliteit, vergroot de verschillen in jongere generaties.

Echtscheidingen

Onderzoek heeft laten zien dat de toenemende economische gelijkheid tussen mannen en vrouwen, die vooral optreedt in relaties van hoogopgeleiden, op haar beurt leidt tot toenemende ongelijkheid tussen sociale klassen bij jonge én oude generaties.

Hoog opgeleide stellen, met grote *gender*-gelijkheid, hebben de beste arbeidsmarktposities. Sinds het midden van de jaren negentig hebben ze ook een kleinere kans op echtscheiding dan laag opgeleide stellen. Ze zijn ook beter in staat zorg en opvang te regelen voor hun hulpbehoevende ouders. Al die factoren dragen eraan bij dat ze jonge én oude familieleden betere levenskansen kunnen bieden.

Omgekeerd heeft het toenemende aantal echtscheidingen onder laag opgeleiden een versterkend negatief effect. Kinderen van laag opgeleide ouders hadden altijd al een sociaal-economische achterstand, maar een groter aantal gebroken gezinnen (met alle emotionele schade van dien), en grotere moeite bij het regelen van zorg voor (groot)ouders, vergroten de achterstanden nog verder.

Tussen diverse geïndustrialiseerde landen bestaan grote verschillen op het gebied van zorgarrangementen voor kinderen en hulpbehoevende (groot)ouders. Ook zijn er grote variaties in financiële en praktische steun voor alleenstaanden, kinderen, jongeren, ouderen, werklozen en arbeidsongeschikten.

Systematisch, theoriegestuurd, empirisch onderzoek kan helpen (beleids)arrangementen te identificeren die nieuwe vormen van sociale ongelijkheid onder jonge én oude generaties kunnen tegengaan, bijvoorbeeld door de risico's van zorg- en financiële verplichtingen terug te brengen.

38 Verkeert de representatieve democratie in een legitimiteitscrisis?

In veel landen lijkt de steun van burgers voor de representatieve democratie onder druk te staan. Internationaal vergelijkend onderzoek zoekt naar micro- en macrofactoren die de steun voor politieke stelsels beïnvloeden. Neemt de steun voor het Nederlandse democratische bestel af? Hoe is dat in vergelijking met ontwikkelingen elders?

Een legitiem politiek stelsel is, kort samengevat, een stelsel dat berust op de instemming van de burgers. In vrijwel elk westers land bestaat dezer dagen discussie over de kwaliteit van de representatieve democratie. De legitimiteit van de indirecte democratie lijkt daardoor op veel plaatsen onder druk te staan.

De legitimiteit van een politiek stelsel is een systeemkenmerk, maar wordt doorgaans gemeten op microniveau, via enquêtes die individuele burgers bevragen over hun instemming met (onderdelen van) het politieke stelsel. In Nederland beschikt het Nationaal Kiezersonderzoek bijvoorbeeld over veertig jaar aan onderzoeksgegevens. Die maken het mogelijk om de ontwikkeling van de legitimiteit van het Nederlandse politieke stelsel gedetailleerd in beeld te brengen.

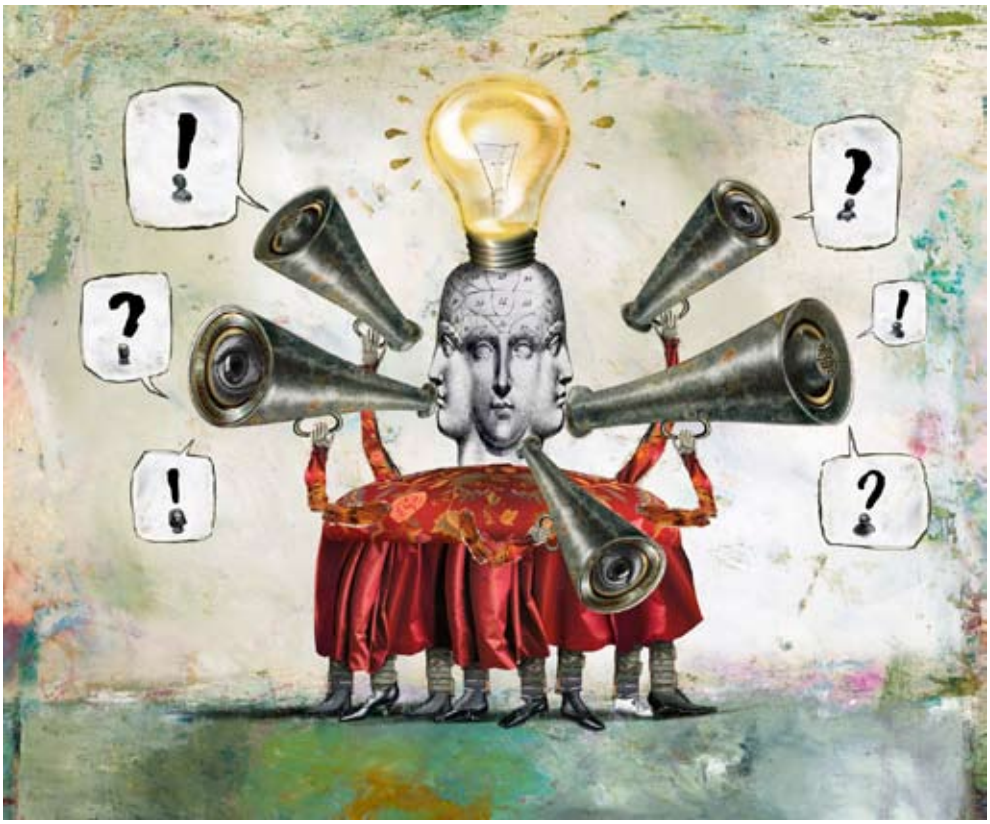
Staat ook in ons land de indirecte democratie ter discussie? Meer specifiek: erodeert de legitimiteit van het Nederlandse democratisch bestel? Wijst de grote toeloop naar politieke partijen die zich afzetten tegen het politieke establishment op onvrede met ons traditionele partijpolitieke systeem of, veel breder, op onvrede met het functioneren van de democratie? Indien het laatste aan de hand is, wat zijn dan de oorzaken daarvan? Zou het mogelijk zijn deze ontwikkeling te stoppen? En verschillen de Nederlandse ontwikkelingen van die in het buitenland?

Systeemkenmerken

Als het gaat om oorzaken van afnemende legitimiteit, bestaan er twee onderzoekstradities.

De eerste probeert verschillen in steun voor politieke stelsels vooral te verklaren door variabelen en dynamiek op het microniveau van de individuele burger.

De tweede traditie zoekt de achtergronden van de variatie juist in systeemkenmerken van het politieke stelsel of in andere macrofactoren. Internationaal vergelijkend onderzoek, met projecten als de *Comparative Study of Electoral Systems*, de *European/World Values Study*, het *European Social Survey (ESS)* en de *European Election Study*



(*EES*), heeft zulke analysemogelijkheden de afgelopen jaren een stuk verder gebracht.

Theoretische en empirische doorbraken zijn te verwachten nu internationale samenwerkingsprojecten ons voor het eerst in staat stellen de wisselwerking tussen micro- en macro-effecten te onderzoeken.

Zo weten we dat polarisatie tussen politieke partijen positief uitwerkt op de opkomst bij verkiezingen, maar we weten niet zeker waarom dat zo is. Vergroot polarisatie de interesse voor politiek, of de perceptie dat er iets te kiezen valt?

En waarom zijn kiezers die stemmen op oppositiepartijen over het algemeen minder tevreden met het functioneren van hun politieke stelsel dan kiezers die stemmen op een regeringspartij? Waarom is dit verschil veel groter in *majoritarian democracies*, zoals het Verenigd Koninkrijk, waar partijen elkaar afwisselen in *majority rule*, dan in *consensus democracies*, zoals Nederland, waar politieke partijen elkaar moeten vinden in wisselende coalities?

Bestudering van de interacties tussen micro- en macro-effecten zal deze verschillen mogelijk voor het eerst kunnen verklaren. Bovendien zal het tot een beter inzicht leiden in welke eventuele veranderingen in het politieke systeem een positief dan wel juist eerder een negatief effect op het functioneren van de democratie zouden hebben.

39 Welke instituties bepalen de vitaliteit van een samenleving?

Het ideaal van de open samenleving staat onder druk door onder meer globalisering en migratiestromen. Kunnen de verworvenheden van de rechtsstaat, de parlementaire democratie en de verzorgingsstaat in hun huidige vorm in stand blijven, wanneer veel belangrijke processen zich buiten de grenzen van die staat afspelen? Welke instituties bepalen eigenlijk de vitaliteit van een samenleving en hoe zijn deze ontstaan?

De kracht van een samenleving wordt in belangrijke mate bepaald door de kwaliteit van haar instituties. Een goed werkend stelsel van formele en informele regels, praktijken en organisaties – zonder dat kunnen markten, overheden en het maatschappelijk middenveld niet goed functioneren.

Zonder wetboeken, economische toezichthouders en een betrouwbare rechterlijke macht komen markten niet van de grond; zonder een stelsel van transparantie en publieke verantwoording en een traditie van actief burgerschap blijft de kwaliteit van publieke dienstverlening pover; en zonder praktijken van zelforganisatie, wederkerigheid en onderling vertrouwen is er geen vitale *civil society*.

Wetenschapsbeoefening is al evenzeer gebaat bij een vrije uitwisseling van ideeën.

Alhoewel de gewenste samenleving, en de institutionele kwaliteit van de onderdelen van die samenleving, politiek omstreden kan zijn, bestaat er wetenschappelijk gezien aanzienlijke consensus over het optimale resultaat. Dat valt wellicht het best te omschrijven als wat de filosoof Popper een *open society* heeft genoemd: een democratische samenleving met veel burgerlijke vrijheden, een hoge mate van rechtsbescherming en transparantie, en met een sociaal-egalitaire inslag. De *open society*, kortom, berust op een aantal kenmerkende instituties.

De hedendaagse westerse burger mag dit misschien vanzelfsprekend in de oren klinken, vanuit historisch of vergelijkend perspectief is dat zeker niet het geval. De moderne westerse samenleving is het product van een langzame ontwikkeling van eeuwen. Hij is geworteld in de stedelijke communes van de Middeleeuwen en de representatieve organen die toen ontstonden. De voordelen daarvan zijn enorm geweest. Men hoeft slechts te denken aan verworvenheden als democratie en verzorgingsstaat, maar ook wetenschappelijke vooruitgang en technologische vernieuwing.

In de afgelopen decennia zijn kenmerken van de open samenleving echter onder druk komen te staan. Zaken als religieuze verdraagzaamheid en een laagdrempelig sociaal vangnet zijn niet langer vanzelfsprekend. Het ideaal van een open samenleving

kraakt in haar voegen, haar identiteit is omstreden geraakt en haar instituties in opspraak. Functioneert de representatieve democratie nog wel naar behoren, is de rechterlijke macht opgewassen tegen de problemen van onze tijd? Dergelijke vragen worden steeds vaker gesteld.

Laboratorium

Een centrale wetenschappelijke vraag is hoe open westerse samenlevingen tot stand zijn gekomen, en welke onderliggende waarden en normen, die tezamen de 'identiteit' vormen, in deze ontwikkeling een rol hebben gespeeld. Wat leert het ons over de moderne vitaliteit en duurzaamheid van deze instituties?

Voor een grondige beantwoording van de vraag is niet alleen de expertise van historici cruciaal; ook andere geesteswetenschappers, zoals juristen, filosofen en godsdienstwetenschappers, zullen belangrijke bijdragen moeten en kunnen leveren. Dat geldt evenzeer voor de sociale wetenschappen, waarbinnen dit type vragen eveneens actueel is.

Hoewel de problematiek zelf internationaal van karakter is, kan Nederland worden beschouwd als een soort laboratorium van de open samenleving, waarvan de wortels ver teruggaan in de geschiedenis. Dat maakt ons land geschikt om als basis te dienen voor vergelijkingen in een mondiaal perspectief.

Veranderende instituties: 'Poptempel' Paradiso in Amsterdam was ooit het kerkgebouw van de Vrije Gemeente

40 Leven we straks in de 'Verenigde Staten van Europa'?

Tussen het Europese recht en het nationale recht bestaat geen simpele hiërarchie meer. De twee rechtsniveaus vormen een ingewikkeld stelsel met doorlatende lagen. Hoe werken de EU en het Straatsburgse Mensenrechtenhof door in het Nederlandse rechtssysteem en dus in de Nederlandse economie, maatschappij en politiek? Maakt de gemeenschappelijke munt op termijn een federaal 'Verenigde Staten van Europa' onontkoombaar?

Lange tijd was de verhouding tussen Europees en nationaal recht simpel, want hiërarchisch: het internationale recht had voorrang boven het nationale recht en internationale instanties waren binnen hun specifieke bevoegdheden machtiger dan de nationale

staat. Het geringe verlies aan autonomie op een beperkt aantal terreinen was een geringe en aanvaardbare prijs die Nederland als handelsnatie betaalde voor het economische voordeel van een open Europese markt.

Inmiddels krijgt de Europese Unie echter gaandeweg meer trekken van een federale staat, met de lidstaten als een soort deelstaten, de Europese Commissie in de rol van federale regering, de euro als gemeenschappelijke munteenheid en het Europees Verdrag tot Bescherming van de Rechten van de Mens en het Handvest van de Grondrechten van de Europese Unie als Grondwet.

Het Europese Unierecht en het daarop gebaseerde Handvest beperkt zich al lang niet meer tot de klassieke vrijheidsrechten. Het zelfde geldt voor de jurisprudentie van het Europese Hof voor de Rechten van de Mens: dat spreekt zich ook uit over gelijkheid, sociale aanspraken en nationaal vreemdelingenbeleid. Vooral op dat laatste onderwerp legt het Mensenrechtenhof wezenlijke beperkingen op aan Nederlandse rechters en instituties.

Marges

Steeds meer zien we in het Europese rechtsstelsel dat vele rechtslagen elkaar beïnvloeden, waarbij afhankelijk van het onderwerp nu eens het ene, dan weer het andere rechtssysteem de overhand heeft. Het is urgent om dit ingewikkelde stelsel grondig te analyseren, te duiden en te evalueren. Het heeft immers niet alleen juridische, maar ook maatschappelijke, economische en politieke gevolgen.

Een belangrijke vraag is bijvoorbeeld hoe nationale rechters bij hun uitspraken internationale normen moeten meewegen. Het Europees Hof voor de Rechten van de Mens gaat uit van een *margin of appreciation:* het Hof vindt dat uiteenlopende lidstaten de Europese mensenrechten binnen bepaalde marges mogen interpreteren vanuit de eigen culturele, historische en filosofische achtergrond. De nationale rechter, die dichter op de zaak zit en meer voeling heeft met de lokale situatie, is de eerst aangewezen instantie om te toetsen of de mensenrechten geschonden zijn. Het Europese Hof functioneert slechts als vangnet op afstand. Het principe is duidelijk, maar de gevolgen voor rechters op het nationale niveau, dus ook rechters in Nederland en de Nederlandse Antillen, zijn nog lang niet uitgekristalliseerd. Hoe breed zijn hun marges?

Ook de meer praktische vraag naar de optimale organisatie van Europa zal de komende jaren op de agenda staan. Het Europese Hof voor de Rechten van de Mens wordt bedolven onder meer zaken dan het aan kan, maar het blijkt uiterst lastig dit anders te organiseren. Binnen de Europese Unie zijn de gevolgen van de ingebouwde spanning tussen Europese Commissie, Europees Parlement en de Raad van (nationale) Ministers duidelijk merkbaar. Zo is er weliswaar een muntunie, maar zijn de politieke instrumenten om bijpassend beleid af te dwingen nog zeer gebrekkig.

Zal de huidige financiële crisis een verdergaande federalisering van Europa en de totstandkoming van een politieke unie onvermijdelijk maken? En zo ja, hoe moet deze federalisering dan vorm krijgen? Zijn er alternatieven?

41 WANNEER BEVORDEREN SOCIALE NETWERKEN DUURZAME SAMENWERKING?

Voor een samenleving zijn duurzame vormen van samenwerking belangrijk. Bij hun keuzes tot samenwerking laten mensen zich niet alleen leiden door economische afwegingen of mogelijke sancties, maar ook door evolutionair verankerde sociale overwegingen. Kunnen we een model ontwikkelen dat voorspelt welke rol groepsverbanden en sociale netwerken spelen bij de keuze voor samenwerking?

Alle vormen van menselijke samenleving berusten op samenwerking. Het geldt voor kleinschalige verbanden, zoals families en bedrijven, maar ook voor grootschalige collectieve acties zoals sociale bewegingen, stakingen, demonstraties of revoluties.

In een samenwerkingsrelatie dragen de betrokken partijen bij tot het realiseren van een collectief goed: de potentiële opbrengsten door samenwerking zijn hoger dan wat de individuele partijen zonder samenwerking zouden kunnen realiseren.

Vele collectieve goederen, zoals een schone buurt, hygiëne in een ziekenhuis, of productiviteit in een bedrijf, vereisen duurzame vormen van samenwerking. In sociale dilemmasituaties, waarin mensen een eigen belang moeten opofferen voor een collectief belang, heeft samenwerking echter per definitie een wankele basis. Duurzame samenwerking is maatschappelijk gezien dus lastiger te realiseren.

De oplossing voor dit probleem werd lange tijd gezocht in het creëren van formele instituties gesteund door *incentives* – beloning of straf. De benadering was gegrond in een model van economische rationaliteit, waarin bewuste, individuele kosten-batenafwegingen en egoïstische nutsmaximalisatie centraal stonden.

Recent empirisch onderzoek laat echter zien dat de werkwijze van incentives beperkt is, dat voor samenwerking juist 'sociale rationaliteit' een belangrijke rol kan spelen. Onder bepaalde omstandigheden blijken mensen beter samen te werken als incentives niet centraal staan. Wetenschappers hebben dankzij deze nieuwe inzichten het model voor het ontstaan van samenwerking herzien. Evolutionair verankerde menselijke socialiteit krijgt in het nieuwe model een grote plek. Het model verschuift de oplossing niet simpelweg van formele naar informele instituties, maar doet recht aan de interactie tussen deze twee.

Centraal staat dat individuen zijn ingebed in groepsverbanden, sociale netwerken en autoriteitsstructuren, en de interacties daarbinnen beïnvloeden de kwaliteit en de duurzaamheid van hun samenwerking.

Geen garantie

Empirisch onderzoek naar het verband tussen sociale netwerkstructuren en samenwerking roept tot nu toe meer vragen op dan het oplost. Hechte sociale netwerkstructuren zoals in teams op het werk blijken geen garantie te zijn voor het oplossen van sociale dilemma's. Sterke sociale banden tussen samenwerkingspartners kunnen averechts uitwerken op samenwerking, terwijl samenwerkingsverbanden die lang stabiel waren opeens uit elkaar kunnen vallen. Zeer duurzame samenwerking blijkt soms mogelijk in heel losse sociale verbanden, soms zelfs zonder enig rechtstreeks contact tussen individuen of groepen, zoals bij het werken aan open-source software of Wikipedia.

Het samenspel van sociale relaties, sociale netwerkstructuren en samenwerkingspatronen verandert met de tijd, maar we weten nog weinig over zijn evolutie, zijn dynamiek en zijn erosie. Nog minder is bekend over de wisselwerking tussen sociale netwerkstructuren en formele autoriteitsstructuren.

Om te begrijpen wanneer en waarom mensen duurzaam samenwerken, zullen psychologen, economen en sociologen voortbouwen op twee sterke deelterreinen: onderzoek naar theoretische modellen van sociale rationaliteit, en onderzoek naar empirische modellen die de complexe wisselwerking tussen sociale netwerken, autoriteitsstructuren en samenwerkingsrelaties, ook statistisch, in kaart kunnen brengen.

42 KAN HET RECHT HET MILIEU BESCHERMEN?

Het traditionele rechtssysteem schiet tekort om wereldwijde milieuproblemen aan te pakken. Om beter te kunnen omgaan met grensoverschrijdende milieuschade zal het vernieuwd moeten worden. Maar hoe? Welke nieuwe, samenhangende juridische instrumenten zijn nodig?

Nederland is een dichtbevolkt, verstedelijkt land, laag gelegen aan zee en doorsneden door twee grote rivieren. Net als andere deltagebieden op aarde is het land bovengemiddeld kwetsbaar voor de gevolgen van grensoverschrijdende milieuproblemen, zoals klimaatverandering en verlies aan biodiversiteit.

De gevolgen van deze problemen zullen de komende decennia een grote wissel trekken op onze economie. De problemen kunnen door hun aard alleen effectief worden aangepakt in internationaal verband. Dat dit tot nu toe onvoldoende lukt is voor een deel te wijten aan een inadequaat internationaal rechtssysteem.

Er bestaan wel internationale milieuverdragen, maar ze zijn erg versnipperd en soms te klein. Afzonderlijke verdragen regelen de bescherming van rivieren, zeeën, bodem en lucht. Het ene verdrag is door vijf staten geratificeerd, het andere door twintig, een derde door honderdvijftig. Onder sommige verdragen staan de handtekeningen van milieuministers, onder andere die van ministers van Buitenlandse Zaken. Sommige verdragen zijn zeer bij de tijd, andere zijn verouderd.

Veel verdragen werden opgesteld in reactie op incidenten, zoals de ramp met de kerncentrale bij het Russische Tsjernobyl of grote olierampen.

Is het juridisch regime al verbrokkeld, nog beperkter zijn de mogelijkheden om naleving van de verdragen af te dwingen. Er bestaat geen 'wereldmilieupolitie', er is geen internationale rechtbank voor milieudelicten en er bestaan nauwelijks sancties op niet-naleving.

Onderzoek en vernieuwing

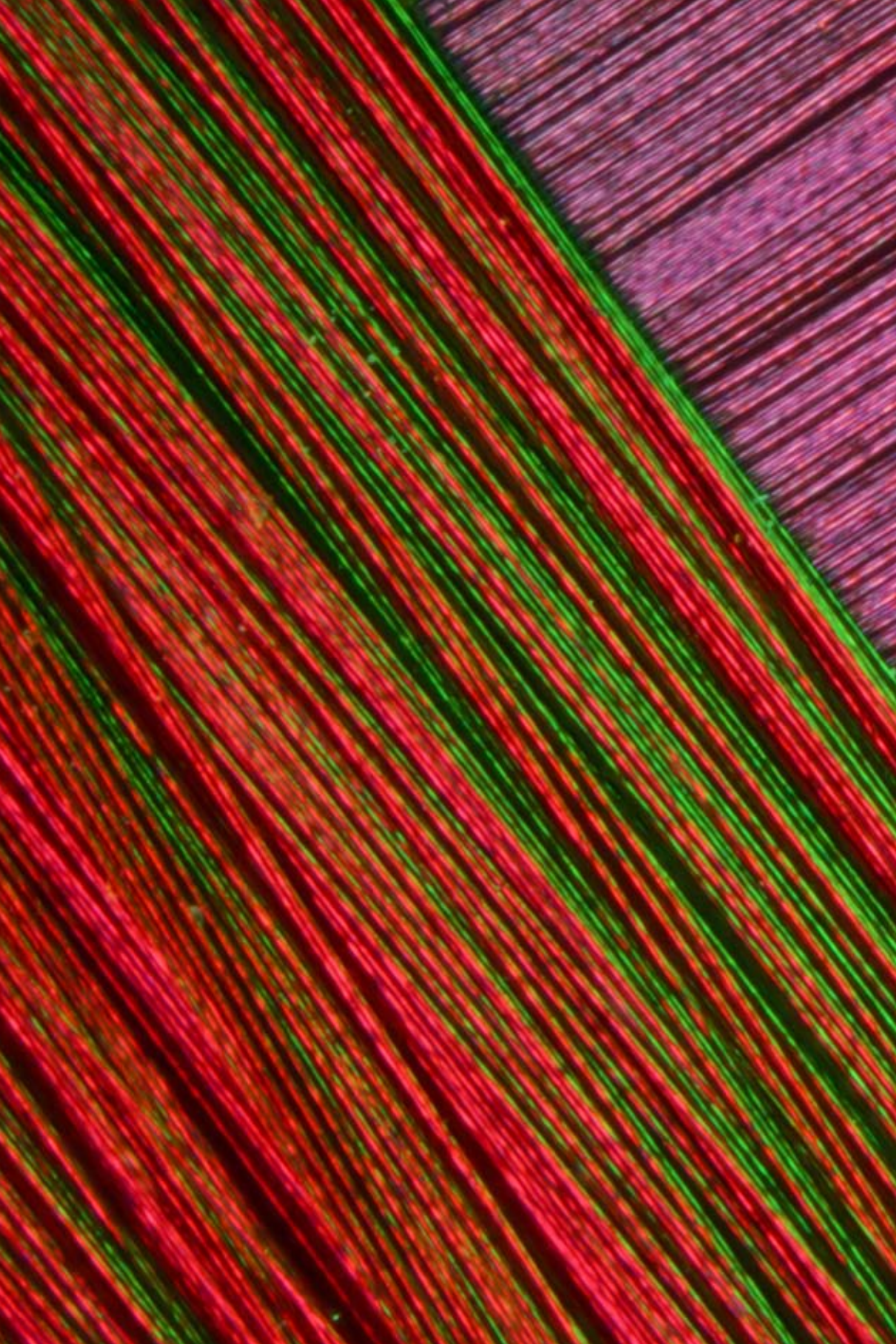
De laatste jaren zijn er hoopgevende trends, zoals zelfregulering die door het internationale bedrijfsleven wordt opgezet. Samen met non-gouvernementele organisaties creëren bedrijfstakken wereldwijde keurmerken voor duurzame productie, zoals de Forest Stewardship Council voor tropisch hardhout en de Roundtable on Sustainable Palm Oil voor palmolie. Banken, pensioenfondsen en verzekeraars, bezorgd over de financiële consequenties van milieuschade en klimaatverandering, beleggen in duurzaam opererende ondernemingen.

Daarnaast komen economische instrumenten op. Boetes onder de verdragen voor bescherming van de ozonlaag slaagden erin de schadelijke heliogassen uit spuitbussen en ijskasten te bannen; CO_2-emissiehandel laat landen of bedrijven handelen in het recht CO_2 uit te stoten; het *clean development mechanism* staat geïndustrialiseerde landen toe hun reductie in ontwikkelingslanden te bereiken als dat efficiënter is.

Niet duidelijk is echter wat de gecombineerde effecten van deze marktgedreven reguleringsmechanismen zullen zijn. Zijn ze afdoende? Stimuleren of hinderen ze overheidsregulering op internationaal of nationaal niveau? Welke mix van instrumenten is het meest effectief? Kan de wisselwerking tussen mechanismen en niveaus worden verbeterd, en zo ja, hoe?

De vragen zijn dringend, en wetenschappelijk onderzoek naar antwoorden erop is broodnodig. Zulk onderzoek zal interdisciplinair moeten zijn, want juridische en economische instrumenten vallen deels samen en hun effecten zijn ook psychologisch, sociologisch en ecologisch van aard.

Daarnaast zal het internationale recht zich moeten vernieuwen. Er is een grensoverschrijdend rechtssysteem nodig dat meer is dan de som der delen, dat ad hoc regelwetgeving reduceert en dat vele instrumenten zoals sancties, subsidies en *naming and shaming* gebruikt en onderling afstemt. Hoe zo'n systeem vorm te geven zonder onnodig aan nationale soevereiniteit te tornen, is voor de wereld en de wetenschap een fundamentele, uitdagende én dringende vraag.



IX. MATERIALEN EN TECHNIEK

43 Kunnen we nieuwe materialen ontwerpen op de schaal van atomen?

Hoe een materiaal zich in het groot gedraagt, wordt bepaald door hoe het in het klein is opgebouwd. Maar hoe het één tot het ander leidt is vaak niet zo duidelijk. Stel, we willen een nieuw materiaal ontwerpen dat zich precies zo gedraagt als wij nodig hebben. Weten we dan hoe dat materiaal er op de schaal van atomen uit moet zien?

De vraag kan optreden bij metalen balken die in een constructie de juiste combinatie van hardheid en buigzaamheid moeten hebben. Die eigenschappen worden uiteindelijk bepaald door de atomen waaruit het metaal is opgebouwd, en de krachten die zij op elkaar uitoefenen.

Maar het zelfde geldt voor alle soorten materialen – composietvezels, biomaterialen of iets basaals als stromend water. Zelfs orkanen in de aardse atmosfeer bestaan uiteindelijk uit oneindige hoeveelheden minuscule atomen die krachten op elkaar uitoefenen en zo op enorme schaal in werveling komen.

Materiaalwetenschappers willen het gedrag van materialen in het groot kunnen begrijpen en voorspellen op basis van hoe ze eruit zien op atomaire schaal. Het mooist zou het zijn als ze gedetailleerde wetmatigheden ontdekken die voor elk type materiaal geldig blijken te zijn.

Dan, als ze zover zouden zijn, hebben ze nóg een droom: die wetten gebruiken om nieuwe materialen, met nauw omschreven eigenschappen, op de tekentafel te ontwerpen, zuiver op basis van de atomen waaruit ze worden opgebouwd.

Slimme manier

Om de relatie tussen verschillende schalen te doorgronden worden rekenmodellen gebruikt. Door op de kleine schaal de krachten tussen vele atomen onderling te berekenen, kan het gedrag van een materiaal op grotere schaal in de computer worden gesimuleerd. Door de voorspelling vervolgens te verifiëren aan de werkelijkheid, kan het model stap voor stap worden verbeterd.

Weer- en klimaatmodellen illustreren de kracht en beperkingen van zulke modellen. Supersnelle computers kunnen het gedrag van de atmosfeer tegenwoordig redelijk

goed voorspellen, maar uiteindelijk is elk model een versimpeling van de werkelijkheid. Het ideale model zou de hele aardatmosfeer opdelen in 'celletjes' van een paar kubieke centimeter, maar geen computer zou in staat zijn die berekening af te krijgen.

In de praktijk moet veel informatie worden weggelaten om de berekening praktisch te houden, maar dat weglaten moet op een slimme manier. 'Multischaalmodellen' gebruiken zulke methodes.

Eén aanpak is bijvoorbeeld om de rekenkracht te concentreren op die plekken waar de krachten het grootst zijn. Een andere is om iets dat optreedt in een tussenliggende schaal zo op te nemen in het model voor de grootste schaal dat het mogelijk is de rekenkracht flink te beperken.

De ontwikkeling van multischaalmodellen is de laatste jaren al flink gevorderd. Nieuw is bijvoorbeeld dat wetenschappers proberen ook toevalsprocessen mee te nemen in hun modellen, en de wisselwerking tussen een materiaal en zijn omgeving.

Multischaalmodellen helpen antwoord te geven op grote wetenschappelijke vragen. De opties om op termijn deze kennis toe te passen in uiteenlopende gebieden als biomaterialen, energie en milieu en veiligheid, zijn legio.

44 Kunnen we materialen maken die defecten zelf herstellen?

Eeuwenlang probeerde de mens materialen bestand te maken tegen beschadigingen door ze almaar sterker te maken. Sinds kort exploreren materiaalkundigen een andere route: ze proberen materialen te maken die, net als in de natuur, lang meegaan door schade of verval van binnenuit zelf te herstellen.

In 1635 stelde Galileo Galilei zich in zijn 'Dialoog' een fundamentele wetenschappelijke vraag: 'Waarom valt de boel in duigen?' Ieder materiaal vertoont defecten en verliest na verloop van tijd of onder zware belasting zijn functionaliteit.

Sterke en duurzame materialen zijn essentieel voor moderne vooruitgang. Staal stond aan de basis van de industriële revolutie, plastic maakte goedkope massaproductie

mogelijk, ultra-zuiver silicium was nodig voor de computerrevolutie en zonder duurzame fotovoltaïsche materialen zal grootschalig gebruik van zonneënergie niet mogelijk zijn.

Materialen moeten over specifieke mechanische, chemische en fysische eigenschappen beschikken, maar ze moeten deze vaak ook lang behouden. Tot voor kort was er maar één ontwerpstrategie om materialen betrouwbaar te maken: het optreden van defecten zo lang mogelijk tegengaan door materialen sterker of chemisch inert te maken.

De laatste jaren realiseren materiaalkundigen zich dat de natuur het zelfde ontwerpprobleem doorgaans anders benadert. Planten en dieren maken hun materialen niet zo sterk mogelijk, maar zorgen ervoor dat de onderdelen die het meest degraderen zichzelf kunnen herstellen. Onze huid is niet ultra-sterk maar verjongt zich voortdurend en herstelt kleine beschadigingen. Onze brosse, keramische botten zijn niet zo sterk als staal maar kunnen zich wel herstellen van barsten of kleine breuken.

Om de levensduur van een materiaal te verlengen kiest de natuur dus vaak voor een strategie die kan worden samengevat als 'genezen is beter dan voorkomen'.

Bio-implantaten

Materiaalkundigen proberen de natuurlijke ontwerpstrategie toe te passen door te zoeken naar manieren om door de mens gemaakte materialen 'zelfherstellend' te maken. Dat is in het bijzonder aantrekkelijk wanneer het erg duur of moeilijk is materialen op andere manieren te vernieuwen of te herstellen.

Elk materiaal is anders, dus de precieze oplossingen zullen er steeds anders uitzien. Alle zelfherstellende materialen moeten echter beschikken over elementen die zich door het materiaal heen naar beschadigde plekken kunnen bewegen, en ter plaatse de schade zo kunnen corrigeren dat de functionaliteit behouden blijft.

Nederlands onderzoek op dit gebied heeft al geleid tot zelfherstellende polymeren waarin chemische verbindingen opnieuw kunnen worden gelegd, tot beton waarin kalk-producerende bacteriën kleine scheurtjes opvullen, tot asfalt dat zichzelf kan 'verjongen' door van binnenuit op te warmen en tot zelfherstellende hittecoatings voor bijvoorbeeld turbines in straalmotoren en energiecentrales.

Nieuwe onderzoeksrichtingen zijn ook het ontwikkelen van zelfherstellende materialen voor gebruik in het menselijk lichaam. Zulke materialen zouden bijvoorbeeld kunnen voorkomen dat patiënten herhaaldelijk operaties moeten ondergaan om versleten implantaten te vervangen. Het menselijk lichaam kent echter strikte randvoorwaarden wat betreft temperatuur, elektrochemische activiteit en giftigheid, wat het ontwerpen van zelfherstellende bio-implantaten uitzonderlijk complex en uitdagend maakt.

45 Kunnen we het gedrag van complexe en levende materie begrijpen?

Voor zowel levenloze als levende materie geldt dat hun eigenschappen worden bepaald door de bouwstenen waaruit ze zijn opgebouwd en de wisselwerking ertussen. Levend materiaal bestaat doorgaans uit veel meer verschillende bouwstenen dan levenloze. De basisvraag blijft echter de zelfde: kunnen we de complexiteit van beide tot eenvoudige principes terugbrengen?

De natuurkunde kent niet alleen mysteries op de schaal van het hele grote (het heelal) en het hele kleine (de elementaire deeltjes), maar ook op de schalen daartussenin, van de dingen uit de dagelijkse wereld om ons heen.

Lange tijd heeft de natuurkunde successen geboekt met een reductionistische aanpak, die macroscopische verschijnselen vanuit microscopische eigenschappen probeert te begrijpen. Voor complexe materialen, waarin de wisselwerking tussen vele verschillende bouwstenen cruciaal is, loopt de reductionistische aanpak echter tegen grenzen op.

Begrip van het gedrag van elementaire deeltjes of atomen is onvoldoende om het gedrag van een verzameling moleculen te begrijpen: één watermolecuul maakt nog geen water. Dit geldt nog veel sterker voor complexe materialen zoals melk, rubber, plastic, haargel, maïzena en verf, die uit grote moleculen bestaan.

Complexe materialen gedragen zich verrassend anders dan een ogenschijnlijk simpele vloeistof als water. Zo gedraagt maïzena zich als een vloeistof wanneer je een tennisbal er langzaam in duwt, maar als een vaste stof wanneer je de bal er met een flinke snelheid op gooit.

De reductionistische klein-naar-groot-aanpak blijkt in de praktijk vaak onuitvoerbaar, zeker wanneer we het gedrag van uiterst complexe levende materialen willen begrijpen. Daarom zoekt de natuurkunde naar wetten waarmee we het macroscopische gedrag van complexe materialen kunnen vatten in simpeler termen. Natuurkundigen hebben, dankzij een combinatie van experimenten en computersimulaties, al flinke stappen op dit terrein gezet.

Levende cel

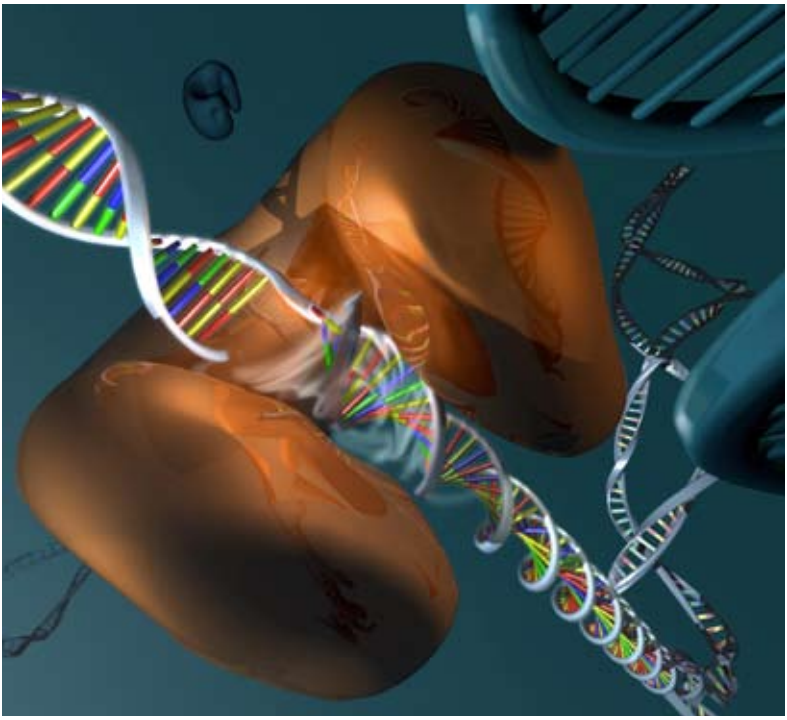
Zoals zo vaak is ook bij materialen het geheel meer dan de som der onderdelen. Dat geldt al voor niet-levende materialen, maar het geldt des te meer voor levende materialen,

die nog veel complexer zijn. Uiteindelijk blijven het natuurkundige principes en processen die maken dat een levende cel doet wat hij behoort te doen.

Het bestuderen van het gedrag van levende materialen leidt tot fundamenteel nieuwe uitdagingen voor de natuurkunde, en tot een nieuw wetenschapsveld dat nog maar net in de kinderschoenen staat. Hoe communiceren en interacteren levende cellen en hun bouwstenen? Uit welke bouwstenen moet een levende cel minimaal bestaan om te kunnen functioneren? En, één van de grootste mysteries uit de wetenschap: hoe vormt een verzameling levenloze materie samen een levend brein dat zich bewust is van zijn eigen bestaan?

Begrip van het gedrag van levende, complexe materialen heeft ook grote praktische waarde, bijvoorbeeld in de geneeskunde. Vragen als 'hoe groeit een embryo?' en 'hoe ontstaat kanker' kunnen en moeten ook vanuit natuurkundige hoek worden bestudeerd.

Met hulp van moderne moleculair-biologische en natuurkundige technieken hebben onderzoekers al vele stappen gezet op weg naar het ontrafelen van de fysica van het leven. Dankzij de voortschrijdende precisie van meetmethoden en rekentechnieken zullen zij de complexiteit van levende materie de komende jaren steeds beter kunnen doorgronden.



46 WANNEER VERVANGT DE KWANTUMCOMPUTER DE KLASSIEKE COMPUTER?

Uitvindingen als de transistor, de laser en supergeleidende materialen kwamen rechtstreeks voort uit onderzoek naar kwantummechanica in de eerste helft van de 20ste eeuw. Ook in de 21ste eeuw zullen antwoorden op kwantummechanische vragen leiden tot baanbrekende toepassingen, zoals ultrasnelle kwantumcomputers en ultragevoelige kwantumsensoren.

De kwantumtheorie beschrijft alles wat zich op de schaal van atomen of nog kleiner afspeelt. In de kwantumwereld gedragen materiedeeltjes, zoals elektronen, zich soms ook als golven. Andersom kunnen lichtgolven zich soms ook als deeltjes, *fotonen*, gedragen. Dit bijzondere 'kwantumgedrag' vindt op tal van manieren verrassende toepassingen, vooral in de elektronica.

In de klassieke wereld van digitale informatie kan een 'bit' – de meest basale informatie-eenheid – slechts één van twee waarden aannemen: op zeker moment is een bit óf een 0 óf een 1. In de kwantummechanica daarentegen kan een 'kwantumbit' zich ook in een 'superpositie' bevinden, waarin hij én 0 én 1 is. Een ander bijzonder element van de kwantumwereld is 'verstrengeling'. Waar bij klassieke bits de waarde van het ene bit geen invloed heeft op de waarde van het andere, kan de waarde van het ene kwantumbit wél de waarde van het andere beïnvloeden.

Dankzij kwantumverschijnselen als superposities en verstrengeling moet het mogelijk worden kwantumcomputers te bouwen die sommige rekenproblemen revolutionair veel sneller kunnen oplossen dan elke denkbare klassieke computer. Hoewel elke nieuwe generatie klassieke computers sneller is dan de vorige, is het eindpunt van die ontwikkeling wel in zicht. Een kwantumcomputer zou zich tot een gewone computer verhouden als een gewone computer tot een telraam. Kwantumcomputers zouden bijvoorbeeld kunnen worden toegepast bij het veilig versleutelen van gevoelige informatie.

Springplankje

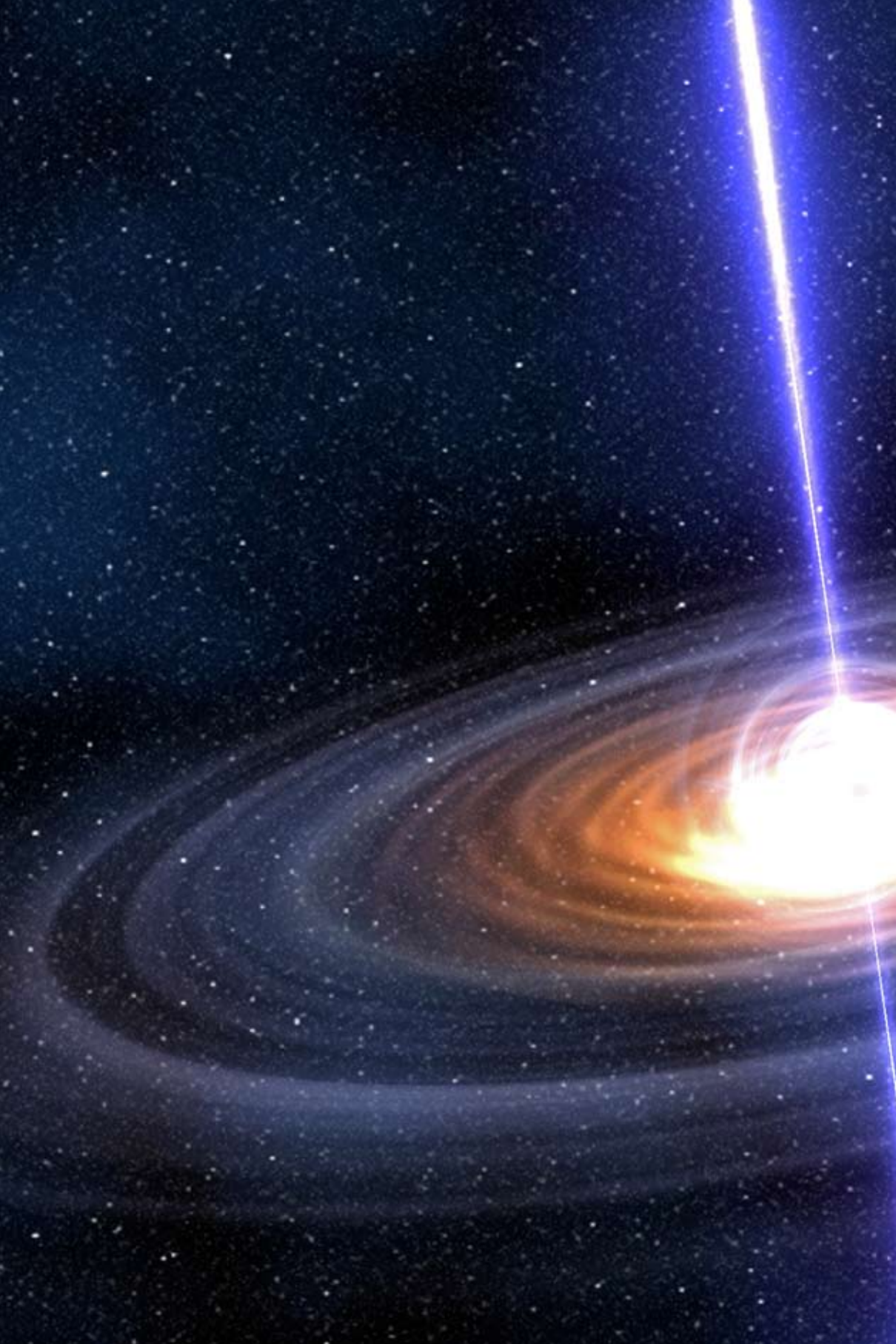
Naast de kwantumcomputer biedt de kwantummechanica nog andere mogelijkheden om te ontsnappen aan de natuurlijke snelheidslimiet van klassieke, hedendaagse computerchips. Zo is het theoretisch mogelijk de digitale informatie niet op te slaan als elektrische lading, zoals nu gebeurt, maar vast te leggen in de draairichting, de *spin*, van

elektronen. Daardoor hoeft de chip minder warmte af te voeren, en kan hij kleiner en sneller worden.

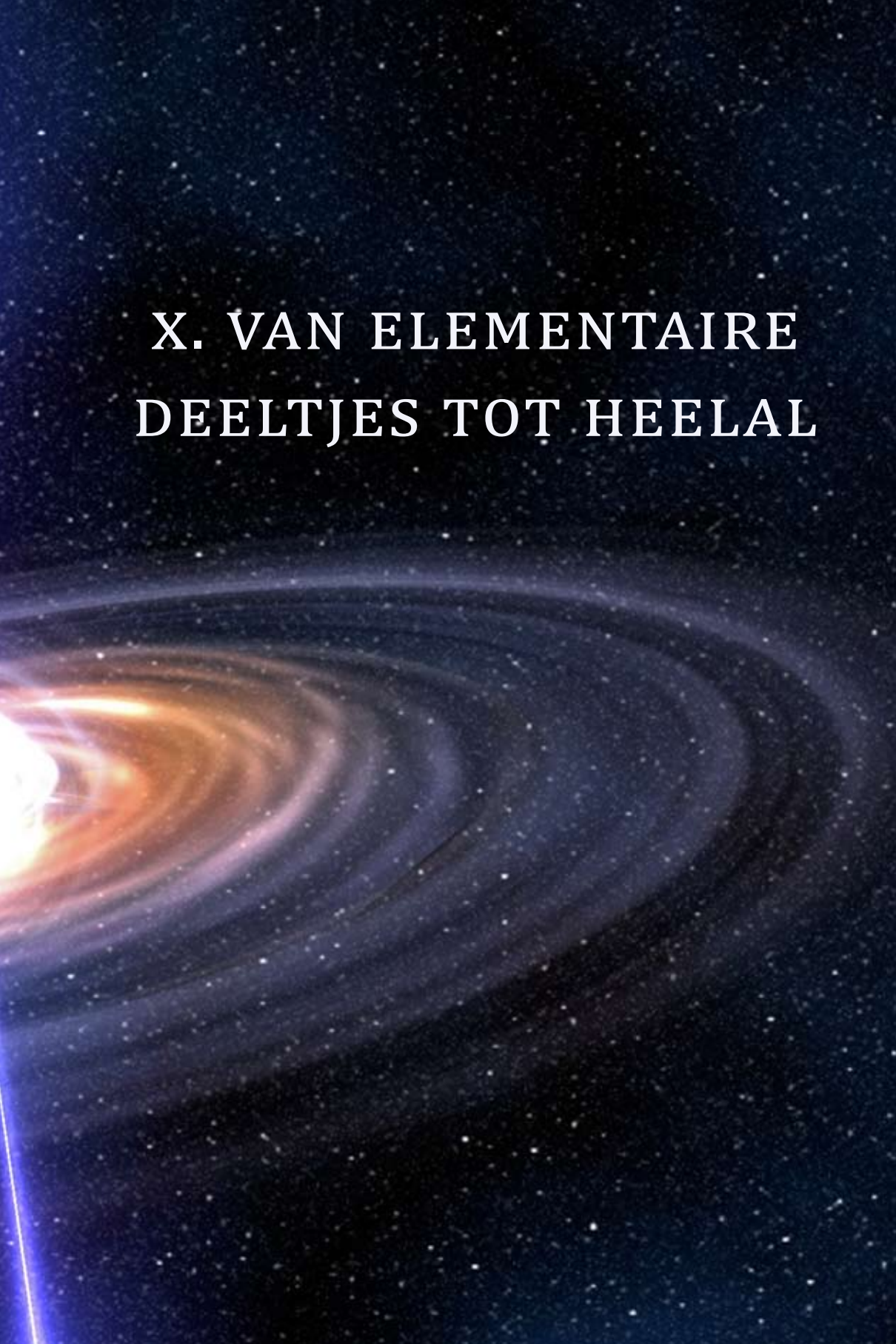
In 2004 ontdekten Andre Geim en Konstantin Novoselov, beiden jaren werkzaam in Nederland, een methode om *grafeen* te maken, een materiaal dat is opgebouwd uit één enkele laag koolstofatomen. In 2010 ontvingen ze er een Nobelprijs Natuurkunde voor. Tot de grote vragen van de kwantumtechnologie behoort of grafeen in de elektronica silicium kan opvolgen als materiaal waaruit chips worden gemaakt.

Het jaar 2010 zag de primeur van een met het blote oog zichtbaar voorwerp – een miniatuur 'springplankje' – dat in een kwantumtoestand werd gebracht. Het plankje kon tegelijkertijd wel én niet trillen. In de toekomst zou het bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden als ultragevoelige kwantumsensor.

Kwantumtechnologie bergt grote beloften in zich, maar commerciële toepassingen vormen nog een grote uitdaging. Onder invloed van de omgeving kunnen kwantumtoestanden zoals verstrengeling en superpositie namelijk gemakkelijk verloren gaan. Naar een goede bescherming van de kwantumtoestand wordt dan ook naarstig gezocht.



X. VAN ELEMENTAIRE DEELTJES TOT HEELAL

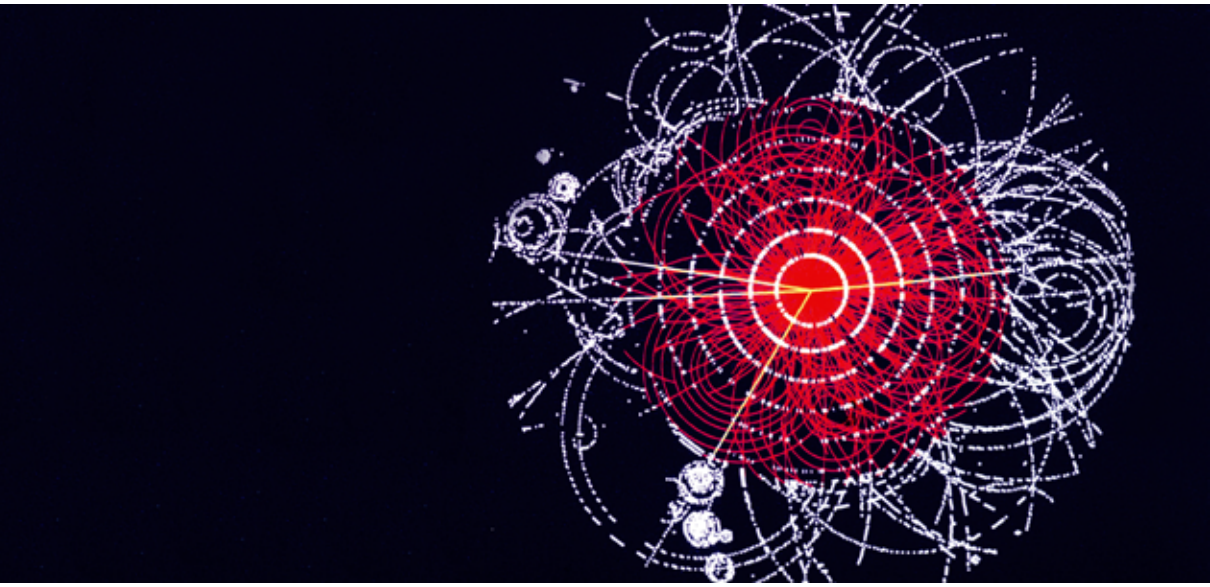


47 UIT WELKE ELEMENTAIRE DEELTJES EN KRACHTEN IS ALLE MATERIE OPGEBOUWD?

Op het meest fundamentele niveau beschrijft de natuurkunde het heelal in termen van elementaire deeltjes en elementaire natuurkrachten tussen die deeltjes. Het in de twintigste eeuw ontwikkelde Standaardmodel gaf tot nu toe de beste beschrijving van deze deeltjes en krachten. Het model heeft echter nog veel losse eindjes, die natuurkundigen de komende decennia definitief aan elkaar hopen te knopen.

Het Standaardmodel bundelt drie van de vier bekende natuurkrachten in één kwantummechanische theorie. Deze kwantumtheorie verklaart het gedrag van minuscuul kleine atomen en moleculen en beschrijft de zes typen elementaire bouwstenen (quarks) waaruit die atomen op hun beurt weer zijn opgebouwd.

Voor hun bijdrage aan de theorie van deze bouwstenen ontvingen de Nederlanders Gerard 't Hooft en Martinus Veltman in 1999 een Nobelprijs.



Het Standaardmodel klopt opmerkelijk precies met alle experimenten aan kleine deeltjes die tot op heden zijn gedaan.

De vierde fundamentele natuurkracht, de zwaartekracht, die vooral relevant is voor grote objecten, past helaas echter niet in het kwantumbouwwerk. Het is de relativiteitstheorie van Albert Einstein, die ruimte, tijd en materie verenigde, die juist uitstekend uit de voeten kan met de allergrootste en allerzwaarste objecten in ons heelal, zoals neutronensterren en zwarte gaten.

Dé uitdaging in de theoretische fysica is het verenigen van de kwantumtheorie van het hele kleine met de zwaartekrachttheorie van het hele grote.

Higgsdeeltje

De fysica van natuurkrachten op de allergrootste en de allerkleinste schalen komt op een natuurlijke manier samen bij onderzoek naar de oorsprong van het heelal. Kwantumfysica en relativiteitstheorie zouden daar moeten opgaan in een nieuwe theorie die antwoord kan geven op vragen als: Waarom heeft ruimte drie dimensies en de tijd één dimensie? Waarom ziet het heelal er in alle richtingen hetzelfde uit? Hadden de natuurconstanten die we nu meten in het verleden altijd dezelfde waarde? Zijn er echt maar vier fundamentele natuurkrachten, of zijn er toch meer?

Ook het onderzoek naar elementaire bouwstenen van materie is nog in volle gang. Natuurkundigen kijken reikhalzend uit naar de eerste resultaten van experimenten in de krachtigste deeltjesversneller ter wereld, de *Large Hadron Collider* (LHC) van het Europese deeltjesversnellerinstituut CERN in Genève.

De LHC, die in 2010 definitief van start ging, laat kleine deeltjes met fenomenale snelheden tegen elkaar botsen. Uit de brokstukken van die botsingen zal nieuwe kennis over de fundamenten van de natuur kunnen worden afgeleid.

Nederland doet mee aan onderzoek in drie van de vier LHC-detectoren. Met de grootste van de vier detectoren wordt gezocht naar het Higgsdeeltje, dat al jaren bovenaan de verlanglijst van gehoopte ontdekkingen staat. Het Higgsdeeltje is een door het Standaardmodel voorspeld, maar tot nu toe nog nooit waargenomen elementair deeltje dat kan verklaren waarom de andere elementaire deeltjes massa hebben.

Een tweede detector gaat de chemische wolk herscheppen die heerste net na de Big Bang, dus toen het heelal net geboren was. De derde detector richt zich op de vraag waarom er tegenwoordig veel meer materie is dan antimaterie, terwijl de twee elkaar kort na de geboorte van het heelal in evenwicht hielden.

De komende jaren worden in de LHC steeds heviger botsingen tot stand gebracht. Met elke stap komt het moment van baanbrekende antwoorden op fundamentele vragen dichterbij.

48 Sterren en planeten: hoe worden ze geboren, hoe gaan ze dood?

Gas- en stofwolken in het heelal vormen de kraamkamers van sterren en planeten. Nieuwe instrumenten, zowel in de ruimte als in laboratoria op aarde, stellen de sterrenkunde in staat steeds meer te onthullen over de opkomst en ondergang van hemellichamen.

Nederlanders zijn altijd nieuwsgierig geweest naar de donkere, schijnbaar onmetelijke ruimte waarvan de aarde deel uitmaakt. Waar komen de sterren en planeten vandaan? Is er elders in het heelal ook leven? Pas met de uitvinding van de telescoop, in 1608 in Nederland, kon de mens zulke vragen wetenschappelijk onderzoeken.

Christiaan Huygens ontdekte in 1655 Titan, een maan van Saturnus. De Oort-wolk, de bolvormige wolk van miljarden stukken ijs en steen die de zon op grote afstand omringt en van waaruit nieuwe kometen naar binnen vallen, is genoemd naar de Nederlandse astronoom Jan Hendrik Oort. En de Kuipergordel, een vergelijkbare, cirkelvormige band van ijs en steen dichterbij aan de rand van ons zonnestelsel, dankt zijn naam aan de astronoom Gerard Kuiper.

Recente ontwikkelingen in onder meer de telescoop-technologie maken het mogelijk om vandaag de dag niet alleen natuurkundige vragen over het heelal te beantwoorden, maar ook chemische. Hoe kunnen, in de extreme kou en de extreme leegte van het heelal, en onder een voortdurend bombardement van gevaarlijke ruimtestraling, zich toch complexe moleculen vormen?

Kringloop

Sterren die na miljarden jaren aan het eind van hun leven zijn gekomen, slingeren grote hoeveelheden materiaal de ruimte in. Daar wordt het getroffen door ruimtestraling en andere deeltjes, met chemische interacties als gevolg. De veranderingen in gas en stof stellen astronomen in staat de fysische processen bij het afsterven van sterren in kaart te brengen. Daarnaast vormen de nieuw gevormde atomen en moleculen het ruwe bouwmateriaal voor de volgende generatie sterren en planeten. Zo sluit de kringloop zich: van stof tot ster en weer terug.

Tot de snelst groeiende takken van de sterrenkunde behoort de zoektocht naar planeten die horen bij andere sterren dan de zon, de zogenaamde ‘exoplaneten’. De eerste exoplaneet werd in 1995 ontdekt, maar inmiddels kennen we al meer dan vijfhonderd.

Hoe meer exoplaneten we kennen, hoe meer de vraag opkomt hoe al die planeten zijn gevormd, hoe ze verschillen van onze 'eigen' Jupiter of Saturnus, en waarom de banen van exoplaneten helemaal niet lijken op die van planeten rond de Zon.

Op sommige exoplaneten zal de temperatuur, net als op aarde, zo gematigd zijn dat er vloeibaar water zou kunnen bestaan. Omdat vloeibaar water een voorwaarde is voor het ontstaan van leven zoals wij dat kennen, zullen astronomen bij deze planeten beginnen met zoeken naar sporen van buitenaards leven.

Zulk leven zou zich onder meer kunnen verraden door 'vingerafdrukken' van moleculen en stofdeeltjes, in de atmosfeer of op het oppervlak van een exoplaneet.

De komende decennia zullen astronomen steeds krachtiger telescopen ontwikkelen en inzetten om te zoeken naar planeten die lijken op de aarde. Als ze die hebben gevonden, dan wacht de volgende opdracht: het karakteriseren van bestanddelen in atmosferen van hemellichamen ver weg.

49 HOE IS HET HEELAL ONTSTAAN, EN HOE GING HET VERDER?

Als er één vraag is die de wetenschappelijke nieuwsgierigheid prikkelt, is het wel: hoe is ons heelal ontstaan? En toen het eenmaal was ontstaan, hoe ging het toen verder? Wanneer ontstond het licht, wanneer vormden zich atomen, en waardoor is materie zo ongelijk verdeeld over het universum?

Sinds het eind van de twintigste eeuw weten we vrij zeker dat het heelal is ontstaan in een oerknal zo'n 13,7 miljard jaar geleden, en dat de sterrenstelsels die we nu waarnemen het resultaat zijn van de onregelmatige structuur die ons heelal vanaf het begin is opgelegd.

Zo'n 400 duizend jaar na de oerknal was ons uitdijend heelal zo koel dat uit kerndeeltjes en elektronen de eerste atomen konden worden gevormd, maar het duurde nog een paar honderd miljoen jaar voordat de eerste sterren, sterrenstelsels en zwarte gaten ontstonden. De straling van deze eerste sterren en zwarte gaten kon de atomen weer splitsen in kernen en elektronen: het tijdperk van de her-ionisatie. Juist voor dit tijdperk heeft de Nederlandse sterrenkunde traditioneel altijd een grote belangstelling gehad.

Donkere materie

In de laatste decennia is allereerst gebleken dat er, naast die kerndeeltjes en elektronen, ook een enorme hoeveelheid 'donkere materie'in het heelal moet zijn: materie die wel invloed heeft op de bewegingen van sterren, maar die we nog niet direct kunnen waarnemen.

Volledig onverwacht was vervolgens de ontdekking, zo'n tien jaar geleden, dat de lege ruimte mysterieuze 'donkere energie' bevat, die het heelal sneller doet uitdijen dan de natuurwetten voorspelden. De donkere energie beslaat ruim zeventig procent van alle energie in het heelal, maar is nog volledig onbegrepen.

Na honderd jaar waarnemen kennen we dus nog steeds maar een klein deel van het universum!

Veel astronomisch en fysisch onderzoek probeert nu te achterhalen waar donkere materie precies uit bestaat, en wat zich achter al die donkere energie in het heelal schuil houdt.

De oerknal produceerde vrijwel zeker gelijke hoeveelheden van materie en antimaterie – in 'onze' materie zijn bijvoorbeeld elektronen negatief geladen en draaien ze om een positieve kern, in antimaterie zijn de elektronen positief geladen en draaien ze om een negatief geladen kern. Als een materiedeeltje en een antimateriedeeltje botsen, volgt een explosie en worden ze beide 'geannihileerd' – ze keren terug tot energie. Net zo kunnen paren van deeltjes en hun antideeltjes spontaan uit energie ontstaan.

De consensus van wetenschappers is dat, toen na de oerknal uit energie de eerste materie ontstond, evenveel materie als antimaterie ontstaan is. Maar nu bestaat de wereld om ons heen geheel uit gewone materie – alle antimaterie lijkt uit het heelal verdwenen te zijn! Hoe is deze asymmetrie tot stand gekomen?

Experimenten met de deeltjesversneller bij het CERN, met een sterke Nederlandse inbreng, kunnen hierover opheldering verschaffen.

BIJLAGE 1. SAMENSTELLERS DE NEDERLANDSE WETENSCHAPSAGENDA

Voorzitters

Prof. dr. Marian Joëls, Bestuur Afdeling Natuurkunde
Prof. mr. Marc Groenhuijsen, Bestuur Afdeling Letterkunde

Deelnemers

Prof. dr. Klaas van Berkel, Sectie Historische Wetenschappen
Prof. dr. ir. Henk Dijkstra, Sectie Aardwetenschappen
Prof. dr. Jan Willem Gunning , Sectie Gedrags- en Maatschappijwetenschappen
Prof. dr. Pieter Hooimeijer, prof. dr. P. Hagoort, Sociaal-Wetenschappelijke Raad
Prof. dr. Paul Hooykaas, Sectie Biologie
Prof. dr. Jeff de Hosson, prof. dr. ir. Jozeph Braat, Sectie Technische Wetenschappen
Prof. dr. André Knottnerus, Sectie Geneeskunde
Prof. dr. Ben de Kruijff, Sectie Scheikunde
Prof. dr. Sacha Lubotsky, dr. Jelle Koopmans, prof. dr. Aad Quak, Sectie Taal- en Literatuurwetenschappen
Prof. dr. ir. Rudy Rabbinge, Raad voor Aard- en Levenswetenschappen
Prof. dr. ir. Wim van Saarloos, Sectie Natuur- en Sterrenkunde
Prof. dr. Rutger van Santen, prof. dr. Frank den Hollander, Raad voor de Technische Wetenschappen, Wiskunde en Informatica, Natuur- en Sterrenkunde en Scheikunde
Prof. mr. Arend Soeteman, Sectie Rechtswetenschappen
Prof. dr. Theo Verbeek, Sectie Filosofie en Theologie
Prof. dr. Henk van der Vorst, Sectie Wiskunde
Prof. dr. Liesbeth de Vries, prof. dr. Ton Berns, Raad voor Medische Wetenschappen
Prof. dr. Erik-Jan Zürcher, prof. dr. Rob Zwijnenberg, Raad voor Geesteswetenschappen

Secretariaat

Dr. ir. Wim de Haas (projectleider)
Drs. Irene van Houten
Ir. Arie Korbijn
Drs. Jaap Kuiper
Drs. Shu-Hui Tan (tot 8-2-2011)
Dr. Esther van Tienhoven
Dr. Ans Vollering
Drs. Suzanne Wagenaar (tot 8-2-2011)

BIJLAGE 2. FOTOVERANTWOORDING

Coverplaat Bruno Mallart

II. opening Joan van Nispen tot Sevenaer – 1. Patrick Taschler, 2. Josef Friedhuber, 3. Ulistx, 4. Spike Walker, 5. Spike Walker.
III opening Bruno Mallart – 6. Bruno Mallart, 7. Jean Luc, 8. Ivonne Wierink, 9. Bruno Mallart, 10. Oliver Sved, 11. Bruno Mallart.
IV opening Joan van Nispen tot Sevenaer – 12. Homo heidelbergensis. Reconstructie Elisabeth Daynes Paris, 13. Peter Akkermans Collectie Rijksmuseum van Oudheden, Leiden, 14. Rijksmuseum Amsterdam, 15. Joan van Nispen tot Sevenaer, 16. Joan van Nispen tot Sevenaer, 17. Aramese toverschaal, die helpt de kloof tussen Aramese schrijftalen van de Late Oudheid en spreektalen te overbruggen. (The Schøyen Collection, Oslo and London).
V. opening Spike Walker – 18. Bruno Mallart, 19. Een borstkankercel. (Wellcome Trust), 20. Stefan Schurr, 21. Op een schilderij van Ernest Board dient Edward Jenner in 1796 's werelds eerste pokkenvaccin toe aan een kind. (Wellcome Trust), 22. Joan van Nispen tot Sevenaer, 23. Koshtu.
VI opening Bruno Mallart – 24. Bruno Mallart, 25. Diffusion tensor imaging (DTI) geeft informatie over verbindingen tussen verschilllende regio's in de hersenen (UMC Utrecht), 26. Bruno Mallart, 27. Martijn Beekman, 28. Bruno Mallart, 29. Bruno Mallart.
VII opening Spike Walker – 30. Ribosomen in een levende cel. Van links naar rechts: nieuwe microscopische technieken tonen steeds meer detail. (Xiaowei Zhuang, Harvard), 31. In 2010 implanteerden onderzoekers een synthetisch Mycoplasma-genoom in een bacteriëel celomhulsel. De elektronenmiscroscopische foto toont delende 'synthetische' cellen. (Tom Deerinck/Mark Ellisman/NCMIR-UCSD/JCVI), 32. Lab on a Chip (www.rsc.org/loc) / Harpal Minhas, 33. Olga Miltsova, 34. Animatie van het membraan rond een dierlijke cel. Zulke membranen ontstaan door zelfassemblage uit afzonderlijke macromoleculen (Russell Kightley), 35. Stephen Strathdee.
VIII opening Bruno Mallart – 36. Patrick Post, 37. Joan van Nispen tot Sevenaer, 38. Bruno Mallart, 39. Joan van Nispen tot Sevenaer, 40. Bruno Mallart, 41. Bruno Mallart, 42. Greenpeace – Christian Åslund.
IX opening Spike Walker – 43. 50u15pec7a70r, 44. Jamie VanBuskirk, 45. Animatie van een topoisomerase, een enzym dat gedraaide DNA-moleculen ontrolt zodat de erfelijke code kan worden gekopieerd of gebruikt om eiwitten te maken. (TU Delft/Tremani), 46. Bruno Mallart.
X opening Michael Taylor – 47. Cern (Mette Høst), 48. NASA / JPL-Caltech / STScI, 49. NASA and the Hubble Heritage Team.