

KEERPUNTEN IN DE NATUURWETENSCHAPPEN

door

Prof. dr. ir. F.A. Bais

Instituut voor Theoretische Fysica, Universiteit van Amsterdam

Deze lezing gaat over de betekenis van de natuurwetenschappen in de breedste zin van het woord, over waar natuurwetenschappelijke kennis uit bestaat en hoe deze tot stand komt. De keerpunten waar ik het over zal hebben zijn de belangrijkste wendingen in onze visie op de natuur. Wetenschap is een systematische zoektocht naar waarheid en is als zodanig een stapsgewijze bevrijding van uit de ijzeren omarming van het vooroordeel. De



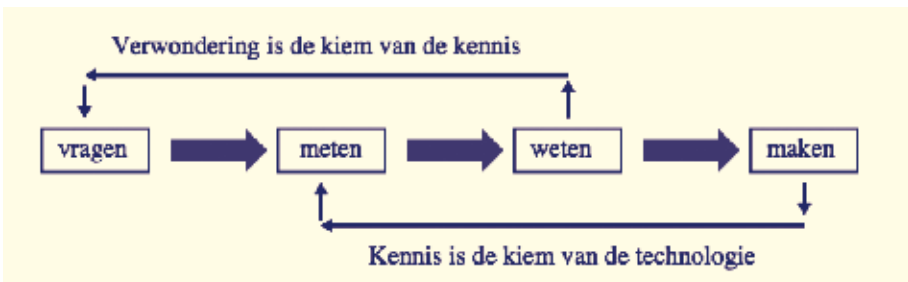
opbrengst van deze zoektocht is niet zozeer een collectie absolute waarheden maar eerder een aantal robuuste uitspraken over hoe de ons omringende werkelijkheid in elkaar steekt, maar ook over onszelf en over onze plaats in de kosmos. In die zin hebben de natuurwetenschappen een belangrijke culturele dimensie waarmee wij nodeloze angsten, collectieve mythen en onwetendheid kunnen overwinnen. Daarnaast zijn de natuurwetenschappen nauw verweven met de technologische vooruitgang die op zijn beurt weer enorme sociale gevolgen heeft en die meer dan wat ook de drijfveer is achter sociale evolutie, emancipatie en welzijn.

We kennen de uitspraak ‘kennis is macht’ maar toch is het goed om je te realiseren dat wetenschap een proces is dat a priori gericht is op het verwerven van kennis en dus niet op politieke macht of materiële rijkdom. De wetenschappelijke waarheid is relatief omdat zij altijd in ontwikkeling is. Desalniettemin hebben de robuuste uitspraken die ze doet een breed geldigheidsgebied en blijken buitengewoon duurzaam te zijn. Het proces van wetenschappelijke waarheidsvinding is cumulatief, hetgeen betekent dat achterhaalde uitspraken niet opeens irrelevant worden, maar door hun beperkte geldigheidsdomein op een natuurlijke manier ingebed worden in nieuwe meeromvattende inzichten. Zo neemt de klassieke natuurkunde van voor 1900 bijvoorbeeld een natuurlijke plaats in binnen de relativiteitstheorie enerzijds en de quantumtheorie anderzijds, en kan ze begrepen worden als bijzondere limietgeval van laatstgenoemde theorieën.

Natuurkundige Voordrachten Nieuwe reeks 87. Jong Diligentia Lezing gehouden voor de Koninklijke Maatschappij voor Natuurkunde ‘Diligentia’ te 's-Gravenhage op 17 november 2008.

De dubbele helix van de kennisverwerking

De natuurwetenschappen worden ten onrechte vaak geïdentificeerd met het verschijnsel techniek en daarmee wordt de wetenschap als geheel te kort gedaan. Natuurwetenschap heeft in eerste instantie te maken met verwondering, met het je verbazen over wat je om je heen ziet. Hulde aan de nieuwsgierigheid die de drijvende kracht is achter onze kennisverwerking. De Engelse filosoof Francis Bacon vatte dit samen in de uitspraak: “Verwondering is de kiem van de kennis”. Als credo is ‘Meten is weten’ natuurlijk een briljante doodoener, maar het bevat wel een harde kern van waarheid, want wie goed waarneemt komt veel te weten. Anderzijds leidt nieuwe kennis ook stevast weer tot nieuwe vragen. Dat is de cyclus weergegeven aan de bovenkant van onderstaande figuur.



Met de nieuwe vragen ga je als het ware terug naar af om nog beter te kijken. En dan kom je nog meer te weten en zo gaat het door, ad infinitum. Of is dat juist niet het geval en hebben we te maken met een cyclus die tot stilstand komt, doordat we op een goed moment tegen onze waarnemings-grenzen aanlopen en er niks nieuws meer te zien valt? Alle relevante vragen zijn op een goed moment gesteld en blijven onbeantwoord, dus dan beginnen we in herhaling te vervallen. We belanden in een vicieuze cirkel waarbij zelfs de verbeelding geen soelaas meer biedt. In de wetenschap is de verbeelding weliswaar onontbeerlijk maar niet oppermachtig. Zij moet zich voortdurend onderwerpen aan de feitelijke bevindingen. Dat is inderdaad anders in de kunsten, waar de vrijheid veel groter is omdat men niet gebonden is aan harde feiten, hoewel de werkelijkheid van dat moment wel vaak als een inspiratiebron fungeert. Vorm en stijl blijken uiteindelijk niet veel meer dan conventies en daar kun je met de nodige menselijke creativiteit doorheen breken, in dat opzicht kan de kunst altijd weer verder. Hoewel het op een goed moment natuurlijk moeilijk wordt om niet oude wijn in nieuwe zakken te blijven doen. Om een laag-bij-de-gronds voorbeeld te geven, als we Roodkapje of Hans en Grietje met cybersprookjes als Star Wars vergelijken, dan zien we dat vooral de verpakking drastisch is vernieuwd, terwijl de opbouw en inhoud van het verhaal benauwend veel overeenkomsten vertonen.

In de natuurwetenschappen gebeurt er iets belangrijks, waardoor die vicieuze cirkel altijd weer doorbroken wordt. Als we nieuwe inzichten hebben verworven, betekent dat meestal dat we datgene wat we hebben leren begrijpen ook kunnen manipuleren: we kunnen er iets mee doen, we kunnen iets nieuws ontwerpen of maken. De cyclus van verwondering, via waarneming naar kennis en weer terug, krijgt een zijtak, waarbij we Bacon kunnen parafaseren met de uitspraak: “Kennis is de kiem van technologie”. Dat is de cyclus aan de onderkant van de eerdergenoemde figuur. Laat ik dit proces illustreren met een tekening van Escher (zie afbeelding). Je verbaast je over het licht dat op een blad valt; in het blad ligt een dauwdruppel en opeens zie je dat die druppel de ondergelegen nerven van het blad vergroot. Je ziet opeens dingen die je daarvoor niet kon zien. Deze observatie brengt je misschien op het idee om die druppel van glas te maken en uit te zoeken wat de vorm is die de beste vergroting geeft. Zo doe je tussen neus en lippen een geweldige ontdekking, namelijk de lens, het vergrootglas, de beslissende stap naar de microscoop, de sterrenkijker

en de bril. Daarmee verleg je op een volstrekt objectieve manier je waarnemingsgrenzen en ontsluit aldus nieuwe werelden: de wereld van het microscopische en de macroscopische wereld van manen, van planeten en sterrenstelsels. Maar dat is niet alles, je verlegt de horizon voor alle mensen die niet goed kunnen zien. De bril is een duizelingwekkende technologische innovatie, een zegen voor het individu maar ook voor de samenleving als geheel.

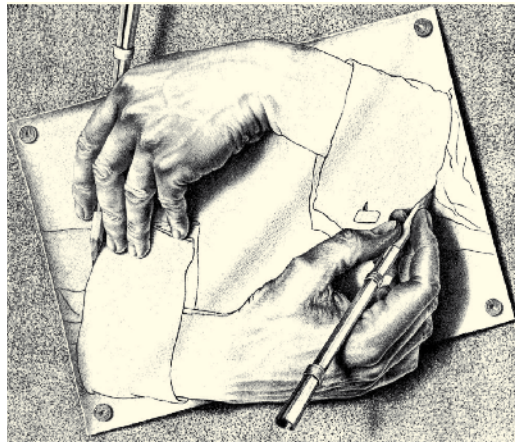
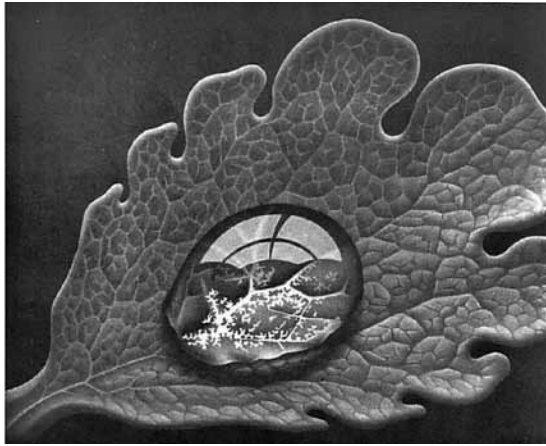
Wat ik in de context van mijn verhaal wil benadrukken, is dat we met het ontwikkelen van de lens in de meest letterlijke zin een

nieuwe, objectieve uitvalsbasis voor onze waarnemingen hebben geschapen. En dat brengt de cyclus van het meten naar weten direct op een hoger plan.

Een meer recent voorbeeld van dit mechanisme is de ontdekking van de structuur van DNA, waarmee de erfelijke code en het mechanisme van genetische replicatie werden blootgelegd. Ook daar kreeg men van de natuur als het ware een knip-en-plak-setje cadeau, een moleculair instrumentarium in de vorm van enzymen (meestal eiwitcomplexen), waarmee het DNA verder onderzocht maar ook gemanipuleerd kon worden. Genetische manipulatie is een technologie met grote toepassingen in het wetenschappelijk onderzoek en op termijn ook zeker daarbuiten. Weer een ander voorbeeld is de computer die het mogelijk maakt informatie op zeer grote schaal met een ongekennde snelheid en precisie te manipuleren, waardoor er allerlei onderzoek mogelijk is geworden dat daarvoor ondenkbaar zou zijn geweest. Je kunt hierbij ook denken aan grootschalig statistisch sociaal onderzoek.

Er zijn legio voorbeelden aan te dragen van deze wisselwerking tussen wetenschappelijke en technologische ontwikkelingen, denk bijvoorbeeld aan de laser of aan het moderne diagnostisch instrumentariumpark waarmee onze ziekenhuizen volgestouwd zijn (zoals MRI-, PET-, CT-scanners, echoscopie, etc.). Je ziet dat er in de natuurwetenschappen inderdaad sprake is van twee cycli die elkaar voeden en die aanleiding geven tot een dubbele helix van kennisverwerving, met enerzijds de verwondering en de waarneming, anderzijds het maken en ontwerpen van een steeds geavanceerder instrumentarium, dat weer een product is van die nieuw verworven kennis en dat nieuwe waarnemingen mogelijk maakt.

Er is een belangrijk ander aspect aan de twee gekoppelde cycli: het is namelijk niet mogelijk de cycli rigoureuus van elkaar te scheiden. Als we alleen maar met vragen en verwondering in de weer blijven, lopen we vast en eindigen als verstokte filosofen. En als we alleen maar dingen maken en niet bijtijds weer nieuwe fundamentele vragen stellen lopen we ook vast en eindigen als futiele productverbeteraars.



Het is deze dubbele spiraal van de vooruitgang¹ die een hechte band schept tussen wetenschap en technologie en ze als het ware tot elkaar veroordeelt.

Onze verbeelding stelde ons in staat om de vindingrijkheid van de natuur te begrijpen en zo na te bootsen in onze technologische vondsten, maar het tegenovergestelde proces doet zich evengoed voor: je kunt ook zeggen dat de nieuwe werkelijkheid een nabootsing is van de verbeelding. Denk bijvoorbeeld aan zoiets virtueels als het Internet, dat is duidelijk een vrucht van de verbeelding, maar wel een die diep ingrijpt in onze alledaagse realiteit. Dit duale mechanisme, prachtig gesymboliseerd in de hierbij afgebeelde prent van Escher, is werkzaam dankzij een even dynamische als delicate balans tussen waarneming en verbeelding, tussen creativiteit en ervaring, en wordt daardoor continue generator van radicaal nieuwe inzichten.

Einstein zei het in 1918 als volgt:

The most important task for scientists is to search for the most fundamental laws, from which a picture of the world can be deduced. There is no logical path that leads to these elementary laws, only an intuitive one, based on creativity and experience. With such a methodological uncertainty one would think that an arbitrary number of equally valid systems would be possible. However, history shows that of all conceivable constructions always a single one did stand out as absolutely superior to all others.

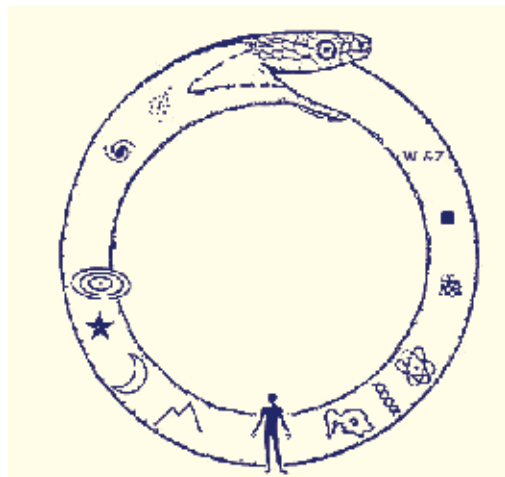
We hebben het over een cultuurmechanisme dat ons in een subtiele dialoog tussen waarneming en verbeelding van de het ene keerpunt naar het volgende drijft.

De Ouroboros van de wetenschap

Hiernaast ziet u een afbeelding van een mythisch monster, de zogenoemde Ouroboros (ook wel geschreven als Uroboros), die zichzelf lijkt te verzwelgen. Het is een slang die zichzelf in de staart bijt, een Oudgriekse voorstelling die in gebruik was bij alchemisten (maar ook bij de gnostici) en die de eenheid in natuur symboliseerde. Sheldon Glashow, Nobelprijs winnaar in de natuurkunde, voorzag dit symbool in 1975 van een moderne incarnatie, door met diezelfde afbeelding de eenheid in de moderne natuurwetenschappen voor te stellen op een hele specifieke manier waarop we uitgebreid terug zullen komen.

Die eenheid van alle krachten en processen in de kosmos werd oorspronkelijk beschreven met de woorden: “Eén ding nauwkeurig bestuderen en door en door kennen is hetzelfde als alles te kennen. De macrokosmos wordt weerspiegeld in de microkosmos”. Er wordt ook wel verwezen naar de Enneaden van Plotinus waarin gezegd wordt: “Want alles omvat alles in zich en ziet dan weer in een ander alles, zodat overal alles is en elk ding alles is”. De Ouroboros is daarmee een toepasselijk symbool voor de kern van mijn betoog, het herinnert er ons niet alleen aan dat de natuurwetenschappen mythische wortels hebben, maar symboliseert tegelijkertijd de eenheid in de natuurwetenschappen.

Ik zal deze Ouroboros als symbolische kapstok gebruiken om achtereenvolgens een aantal kenmerkende aspecten van de natuurwetenschap als geheel aan op te hangen. We zullen



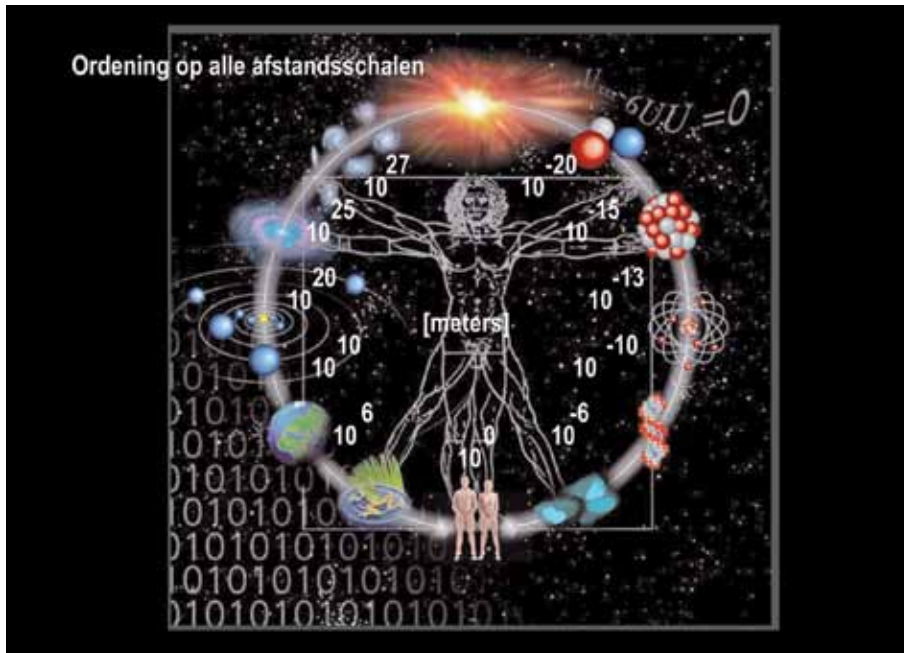
het als ondergrond gebruiken en er steeds een andere laag aan toevoegen. In het bijzonder geeft het een beeld van de waargenomen structuren op alle afstandsschalen, die de kiem vormden van de zeer verschillende deelgebieden van wetenschap die zich met deze afzonderlijke schalen bezighouden.

Dit leidt als vanzelfsprekend naar een beeld van de grote conceptuele keerpunten in de natuurwetenschappen en hun samenhang die het best tot uiting komen als we naar de evolutie van ons heelal kijken, vanaf de allereerste fractie van een seconde tot nu - 13,7 miljard jaar later - toe. Door deze verschillende, complementaire perspectieven op de Ouroboros van de wetenschap als een reeks te presenteren, ontstaat als het ware een hoordimensionaal perspectief dat een schat aan toegevoegde informatie blijkt te bevatten.

Afmetingen

In figuur 1 zien we de mens aan de onderzijde centraal staan, en de typische schaal waar je bij de mens aan denkt is de meter. Maar is de mens de maat aller dingen, zo kan de mens zich afvragen. Gedreven door een gezonde dosis nieuwsgierigheid, heeft de mens het mysterie van de hem omringende natuur uitgebreid onderzocht. Aan de linkerkant kijkt hij naar de buitenwereld of macrokosmos en richt zijn onderzoek zich op steeds grotere afstandsschalen, aan de rechterkant gaat het om de binnenwereld, de mikrokosmos en de natuurlijk ordening op steeds kleiner wordende afstandsschalen.

We zien dat de afstandsschalen, aangegeven in meters, enorm variëren. De grootste afmeting die fysisch toegankelijk is, is die van het hele zichtbare heelal, een gigantische 10^{25} meter, dat is bijna een miljard keer een miljard keer een miljard meter. Is dat een groot getal? Ja en nee; ter vergelijking, dat getal is ongeveer gelijk aan het aantal moleculen in een glas water. De kleinste afmeting waar we inzicht in hebben dankzij het onderzoek met grote versnellers zoals op het CERN te Genève, is een superminuscule 10^{-20} meter, een miljardste van een miljardste centimeter. Op die schaal zien we alleen maar de meest ele-



Figuur 1.

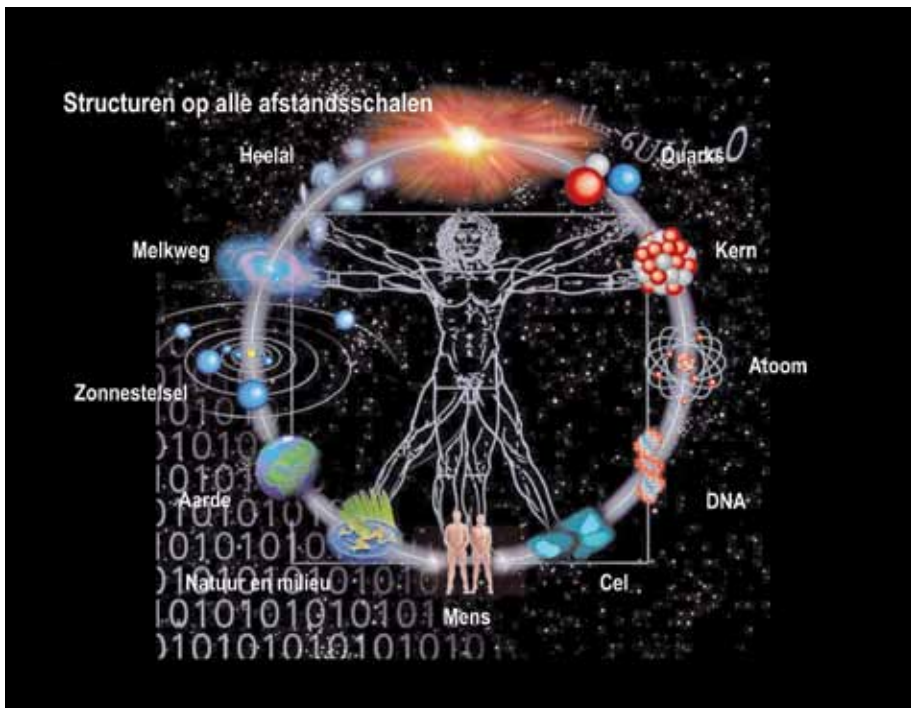
mentaire vormen van materie, zoals quarks en elektronen. We hebben nu alleen de meest extreme afmetingen genoemd, maar wat zo enorm fascineert is dat de natuur zich op al die tussenliggende schalen ook weer in stabiele structuren heeft georganiseerd. Dat komt simpelweg omdat die bouwstenen onderhevig zijn aan krachten die ervoor zorgen dat de bouwstenen op de meest gekke manieren met elkaar verbonden worden. Een ongekende vorm van Lego.

Structuren

De mens staat qua afmeting min of meer in het midden en heeft uitgaande van zijn eigen schaal gaandeweg inzicht gekregen in de structuren die karakteristiek zijn voor al die andere lengteschalen. In afbeelding 2 hebben we de fundamentele structuren die in onze kosmos voorkomen benoemd.

Vakgebieden

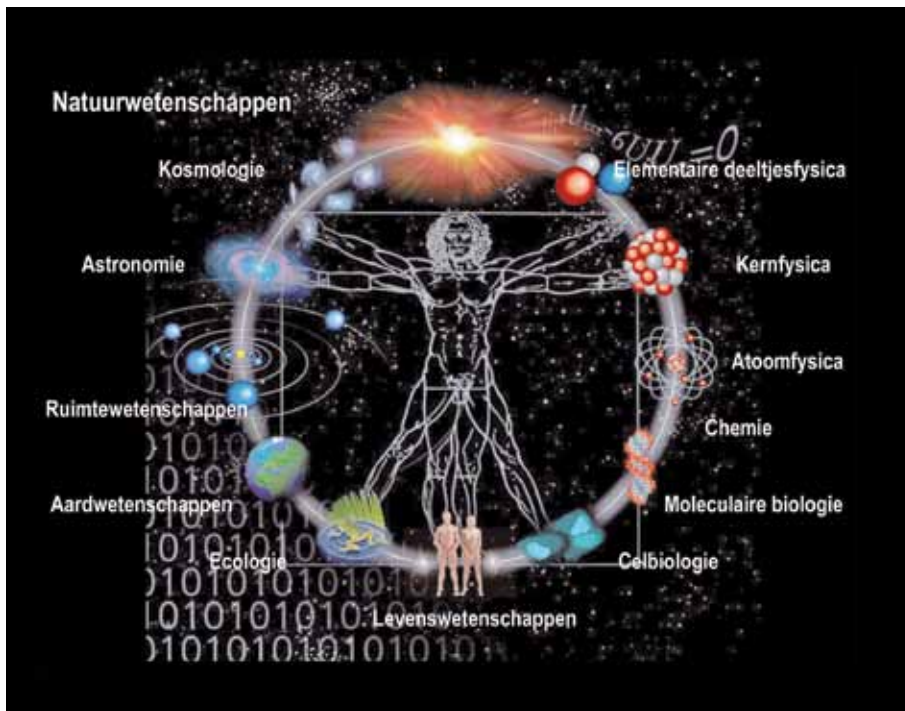
We merken nu op dat zich rond elke schaal waar zich een karakteristieke ordening voordoet, een eigen vakgebied heeft ontwikkeld met zijn eigen instrumentarium, zijn eigen jargon en vooral ook met zijn eigen (onopgeloste) problemen. Het ontstaan van nieuwe vakgebieden daar waar nieuwe structuren ontstaan heeft iets weg van het ontstaan van steden op plaatsen waar wegen en rivieren elkaar kruisten. Als je er op een andere manier naar kijkt is de Ouroboros dus ook een staalkaart van de natuurwetenschappelijke vakgebieden. Bij de kleinste schalen hoort de hoge-energiefysica, met zijn enorme deeltjesversnellers waarmee men de elementaire vormen van materie onderzoekt. Dat zijn typisch ook quarks waaruit de fundamentele kerndeeltjes het proton en het neutron zijn opgebouwd. Daarna



Figuur 2.

volgt de kernfysica, die atoomkernen onderzoekt, opgebouwd uit verschillende aantallen protonen en neutronen. De kernfysica is natuurlijk het gebied waar men processen als kernsplijting en kernfusie heeft leren begrijpen en probeert toe te passen.

Op een volgend niveau zien we de atoomfysica, waarbij de negatief geladen elektronen zich aan de positief geladen kern hebben gebonden, zodat er een elektrische neutrale combinatie ontstaat. Als we kijken naar de wereld van zeer veel atomen ontstaat de enorme structurele rijkdom van de gecondenseerde materie: vloeistoffen, gassen, vaste stoffen, polymeren en de zeer complexe moleculen van het leven zoals DNA en RNA. We maken dan eigenlijk de stap naar achtereenvolgens de chemie, de organische chemie, de biochemie, de moleculaire biologie en tenslotte de cluster van de levenswetenschappen, in de afbeelding gesymboliseerd door de mens.



Figuur 3.

Als we aan de andere kant van de Ouroboros beginnen zien we de grenzen van het zichtbare heelal, waarbinnen de clusters van melkwegstelsels, dan de sterrenstelsels zelf, waarbinnen weer de sterren zoals onze zon, de planeten. Daarbij horen als vakgebieden: de kosmologie, de astrofysica, de aardwetenschappen en de evolutionaire biologie met ook weer als (voorlopig) eindpunt het meest complexe organisme dat we kennen, de mens.

Het is leuk om te zien hoe alle wetenschappelijke disciplines in deze afbeelding zij aan zij staan, enerzijds autonoom maar anderzijds steeds meer verweven. Dat komt door de enorme verscheidenheid aan verschijnselen die we in de loop der tijd door nauwkeurig waar te nemen in kaart hebben gebracht, en dankzij de denkkraft en verbeelding waarmee we die verschijnselen hebben leren doorgronden. Zo ontstond een uitermate robuuste en samenhangende hiërarchie van structuren, allemaal opgebouwd uit precies dezelfde bouwstenen en tengevolge van slechts een viertal fundamentele krachten. Het

staat ons niet langer vrij zomaar iets te veranderen in het ene vakgebied omdat ons dat leuk lijkt, want dat zou onmiddellijk consequenties hebben ergens anders. Ik gebruik het woord robuuste kennis, omdat zoals ik eerder zei het in de wetenschap geen pas heeft om te spreken van absolute waarheid. In een wetenschap die zich op het falsificatieprincipe baseert, kan men alleen de onjuistheid van een veronderstelling aantonen maar nooit de (absolute) juistheid ervan. We zijn onderweg, bezig een ladder te beklimmen waaraan nog de nodige sporten ontbreken en waarvan we niet weten waar die uiteindelijk heen leidt.

Ultieme grenzen

Wanneer we heel veel afstand nemen en alleen naar de echt grote lijnen in de wetenschap kijken, valt op dat er eigenlijk maar drie fundamentele fronten zijn waar de natuurwetenschappen zich geconfronteerd zien met grote mysteries. Dat is waar de mens, gedreven door zijn nieuwsgierigheid, in een hevige strijd verwickeld is met grote onbekenden.

In de eerste plaats is dat het front van de grootste afstandsschalen, met de typische vraag wat de grenzen van ons heelal zijn als die er al zijn. Hoe oud het is, hoe het is ontstaan en wat er in de verre toekomst mee gaat gebeuren.

Aan het front van de kleinste schalen stellen we de tegenovergestelde vraag: is alles opgebouwd uit steeds kleinere bouwstenen, of houdt dat ooit een keer op? Zijn quarks en elektronen misschien de kleinste objecten die in de natuurvoorkomen of moeten we dan denken aan veel kleinere objecten zoals supersnaren? Zou het zo zijn dat er zich op heel kleine afstandsschalen meer ruimtelijke dimensies voordoen zoals de supersnaartheorie voorspelt?

Dat zijn typisch vragen waar noch de melkboer, noch een politicus, noch een bankdirecteur van wakker ligt, maar gelukkig een behoorlijk aantal wetenschappers van over de gehele wereld wel! Het heeft iets opwindends je voor te stellen dat het heelal, als het er echt op aankomt, tien of elf dimensies heeft. Op dit moment lijkt dat onvoorstelbaar maar misschien is het wel een geaccepteerd inzicht in het jaar 2050.

Tenslotte is er het grote front van de complexiteit, waarbij vooral de complexiteit van levende organismen buitengewoon gevarieerd en groot is. Een gebied met machtige vragen, zoals hoe en waar het leven is ontstaan. Of de vraag naar de precieze werking van ons brein. Het fascinerende is dat ook die complexiteit een gevolg lijkt van de wetmatigheden van de onderliggende fysica en de chemie, en niets meer dan dat. Complexiteit ontstaat al heel snel als men bouwstenen zich laat ontwikkelen tengevolge van heel simpele regels (algoritmes). Hieruit putten onderzoekers de hoop dat uiteindelijk de complexiteit toch weer een onderliggende eenvoud tot uitdrukking brengt die te begrijpen valt. Dat zijn dan niet zozeer de structuren, maar eerder de processen die leiden tot die structuren. Deze grote ontdekkingsreis is nog in volle gang in duizenden laboratoria over de hele wereld en in de hoofden van miljoenen gedreven onderzoekers.

Inderdaad, wat de mens misschien meer dan welk ander ding ook uniek maakt, is dat hij als eerste in een situatie zou kunnen komen om de 'kosmische code' te kraken en zo mogelijk erwijs zijn eigen wezen te leren doorgronden. Dit lijkt mij de grootste uitdaging waarmee wij ooit geconfronteerd zijn. Wetenschap is in dat opzicht niet alleen leuk, maar in zijn totaliteit één van de meest belangwekkende historische processen die de mens in gang heeft gezet. Het is een doorlopende uitdaging die grote collectieve inspanningen vereist, maar die we volgens mij vol overgave moeten aangaan. Is het dan niet verbijsterend om je te bedenken dat dat hele proces een bottom-up proces is, dat begonnen is met niets weten en het stellen van eenvoudige haast voor de hand liggende vragen, zoals: waar is alles van gemaakt, of wat is ruimte, wat is tijd, en wat is leven, wat is dood?

Keerpunten

In de Ouroboros kunnen we ook de belangrijkste keerpunten in ons denken over de natuur een duidelijke plek geven. We beginnen in de Verlichting met de klassieke natuurkun-



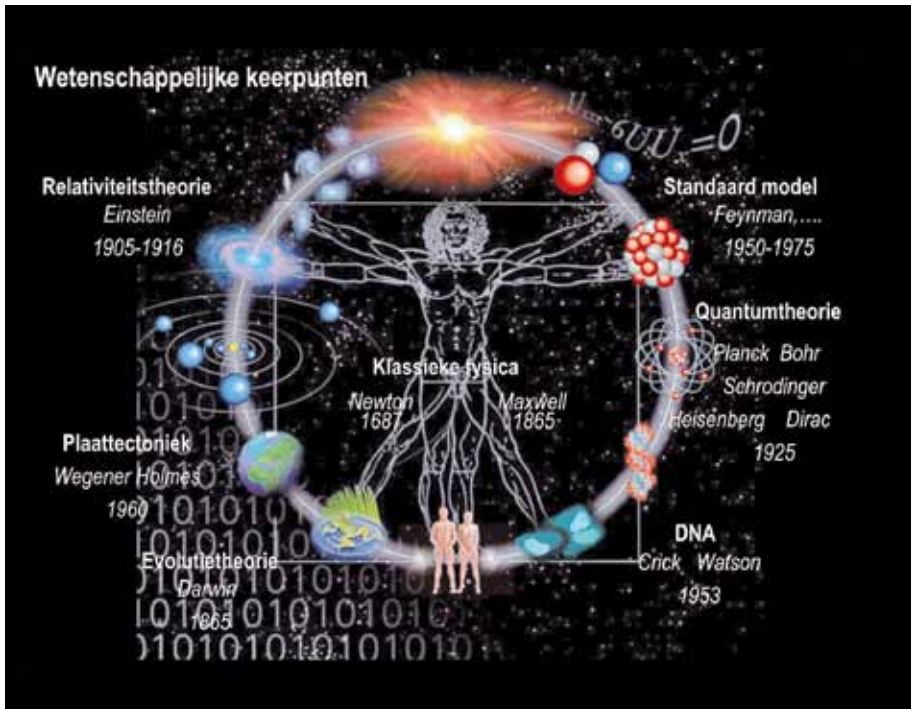
Figuur 4.

dige theorie van Newton die een beschrijving van de zwaartekracht gaf en die daarmee de aardse en hemelse mechanica onder één noemer bracht. Deze verklaarde waardoor de maan om de aarde draaide en de planeten om de zon, maar ook waardoor de appel van de boom viel, en dat alles in indrukwekkend kwantitatief detail. Het betekende ook de definitieve doorbraak van het besef dat wiskunde de taal is waarin de natuur zich ongekend zuiver en ondubbelzinnig uitdrukt. De fundamentele wetten die elektriciteit, magnetisme en optica samenbrachten, werden ongeveer twee eeuwen later door Maxwell neergeschreven. Ook hier was er sprake van een unificatie van verschillende verschijnselen in één theoretisch raamwerk. Je zou de klassieke fysica ook in het centrum van de afbeelding hebben kunnen plaatsen.

Eerst vindt dan de ontwikkeling plaats naar grotere afstandsschalen, naar de fundamentele eigenschappen van ruimte en tijd; het daarmee verbonden *keerpunt* is de relativiteitstheorie van Einstein (1915). Daarin wordt de zwaartekracht geïnterpreteerd als een manifestatie van de meetkundige structuur van ruimte en tijd. Die theorie liet ook zien dat de notie van een dynamisch heelal - een uitdijend heelal - onontkoombaar was.

Dan is er de ontwikkeling aan de rechterzijde die naar boven gericht is, en dit betreft de structuur van de subatomaire wereld. Het bijbehorende *keerpunt* is de quantumtheorie (1925) waarmee o.a. de namen van Bohr, Heisenberg, Schrödinger en Dirac verbonden zijn. Deze theorie opende de poort naar de microscopische wereld.

Aan de linkerzijde naar beneden gericht zien we de aarde en zijn ontstaansgeschiedenis en de ontwikkeling van het leven op aarde, met als *keerpunt* in ons macrobiologische perspectief de evolutietheorie van Darwin (1859). In zijn *On the Origin of Species* vat hij



Figuur 5.

zijn grote inzicht kernachtig samen en laat geen twijfel bestaan over het belang van zijn ontdekking:

Finally, the several classes of facts which have been considered..., seem to me to proclaim so plainly, that the innumerable species, genera, and families of organic beings, with which this world is peopled, have all descended, each within its own class or group, from common parents, and have all been modified in the course of descent, that I should without hesitation adopt this view, even if it were unsupported by other facts or arguments.

Tot slot, aan de rechterkant naar beneden, zien we de opmars van het moleculaire denken in de levenswetenschappen met als *keerpunt* de ontdekking van de structuur van het DNA door Crick en Watson (1953).

Het gaat, afgezien van de klassieke fysica, dus om maar vier grote wendingen in ons denken die de moderne natuurwetenschappen in al hun diversiteit opspannen. Deze fundamentele wendingen in ons collectieve bewustzijn hebben de natuurwetenschappen in het hart van de menselijke cultuur geplaatst. Deze keerpunten suggereren dat het ook in de toekomst niet anders zal gaan – altijd weer nieuwe wendingen, nooit meer rechtdoor.

Kosmische evolutie

We hebben van diverse kanten beschreven dat er een gigantische hiërarchie van stabiele structuren in de natuur bestaat. We hebben ook aangegeven wat het conceptuele raamwerk is waarbinnen die structuren begrepen moeten worden. We stellen ons nu de vraag hoe die structuren feitelijk tot stand gekomen zijn. Dat heeft alles te maken met het uitdijende heelal en wat zich daarbinnen in de loop van een dertien miljardjarige evolutie heeft afgespeeld.

Ook hier bewijst de Ouroboros weer zijn goede diensten. Het heelal begon ten tijde van de oerknal als een zeer hete soep van de meest elementaire vormen van materie en straling, zoals quarks, elektronen en lichtdeeltjes of fotonen. We zitten dan dus rechtsboven in de afbeelding. Door de uitdijning van het heelal koelde dat gaandeweg steeds meer af en daardoor konden zich stap voor stap steeds gecompliceerdere structuren vormen, zonder dat die door heftige thermische bewegingen weer uit elkaar geslagen werden. De uitdijning en de daarmee gepaard gaande afkoeling zijn dus het drijvende mechanisme achter de vorming van structuur in ons heelal.

Na enkele fracties van een seconde vormden zich eerst de kerndeeltjes (zoals protonen en neutronen, gemaakt van ieder drie quarks). Na drie minuten ontstonden de eerste eenvoudige kernen van chemische elementen (zoals deuterium, helium en lithium) op hun beurt als gebonden toestanden van verschillende kerndeeltjes. Na driehonderdduizend jaar (en dan hebben we het nog steeds over het zeer vroege heelal) vormden zich de eenvoudige atomen, voornamelijk waterstof en helium, wat inhoudt dat elektronen door de elektromagnetische krachten aan de kernen gebonden werden, waarbij het aantal gebonden elektronen precies zo was dat het resulterende atoom elektrisch neutraal werd. Toen het heelal eenmaal gevuld was met neutrale materie in de vorm van atomen en straling, kon het licht zich ongehinderd voortplanten en werd het heelal voor het eerst doorzichtig. In dat elektrisch neutrale medium ging de veel zwakkere zwaartekracht overheersen. Gigantische gaswolken trokken steeds verder samen zodat er een ongelijke ruimtelijke verdeling van energie en materie in het heelal ontstond, waaruit later de miljarden melkwegstelsels zouden ontstaan. In het binnenste van die gaswolken werd de materie door de aantrekking van de zwaartekracht weer zo sterk op elkaar gedrukt dat daar de druk en de temperatuur weer



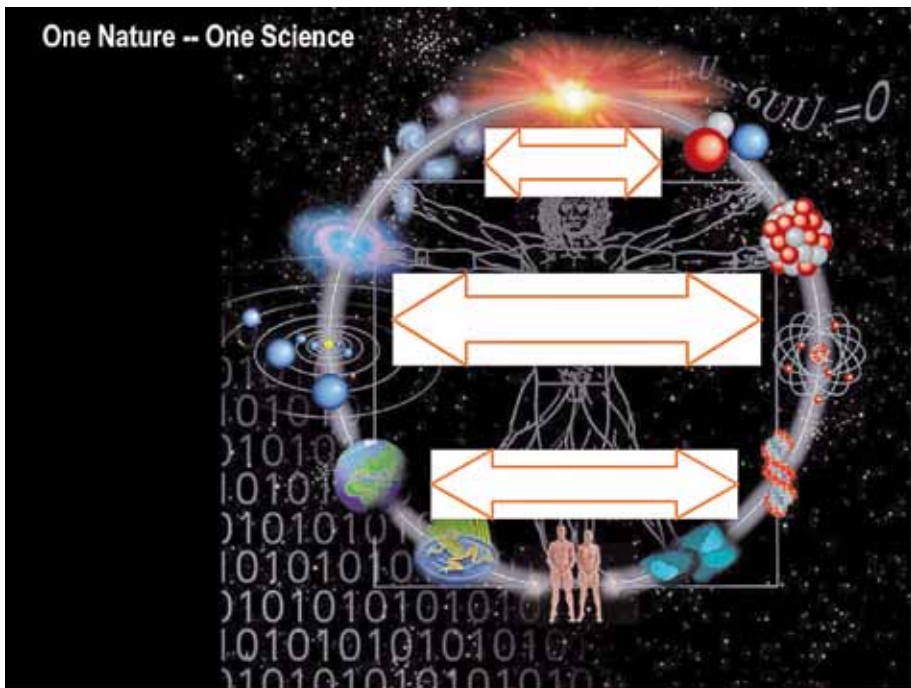
Figuur 6.

zo hoog opliepen dat zich daar sterren vormden die spontaan tot ontbranding kwamen. Vele, zeer vele zonnen gingen schijnen. We leven in een heelal gevuld met honderden miljarden gigantische fusiereactoren, extreem hete ovens, waarbinnen trouwens de meer gecompliceerde atoomkernen - koolstof, stikstof, fosfor gemaakt zijn. De atoomkernen waar u en ik uit zijn opgebouwd, zijn gebrouwen in het binnenste van sterren die inmiddels het loodje hebben gelegd. In de nabijheid van sterren ontstonden (zoals we nu weten) in veel gevallen ook planetenstelsels en nu zijn we bijna thuis.

Merk op dat er een kosmische evolutie van ongeveer acht miljard jaar nodig was om planeten als de aarde voort te brengen en pas daarna krijgen we te maken met de processen die op aarde zelf plaats hebben gevonden. Dankzij een aantal toevallige maar wel uiterst gunstige randvoorwaarden, zoals de aanwezigheid van water, een atmosfeer en een zeer milde temperatuurschommelingen, ontstond op aarde de mogelijkheid voor de vorming van zeer complexe moleculen, zoals aminozuren en ten slotte zelfs voor het ontstaan van leven. Leven, dat zelf weer evolueerde van de primitiefste eencellige tot het verschijnsel mens. Puur fysisch gesproken is de mens inderdaad een uiterst curieuze opeenstapeling van elementaire materie. We zien de rijkdom van deze Ouroboros: niet alleen vertelt hij ons iets over de verschijnselen en structuren op elke ruimtelijke schaal, maar tegelijkertijd ligt ook hun ontstaansgeschiedenis in de afbeelding besloten.

Dwarsverbanden

In het zojuist geschetste wereldbeeld zitten veel uitermate verrassende dwarsverbanden waaraan dat beeld zijn robuustheid te danken heeft. Ik wil op twee tot de verbeelding sprekende voorbeelden kort ingaan.



Figuur 7.

Er is bijvoorbeeld sprake van een direct verband tussen de natuurkunde van de allerkleinste en die van de allergrootste afstandschalen. Dat zit zo: om kennis te vergaren over de dingen die heel erg groot zijn, moeten we heel erg ver kijken. Wij bestuderen dan licht dat van heel erg ver weg gelegen sterrenstelsels of quasars komt. Nu heeft licht een eindige snelheid die weliswaar erg groot is naar onze maatstaven (300.000 km/sec), maar dat licht doet er desondanks toch heel erg lang over om van de rand van het heelal hierheen te komen. Dat licht is miljoenen of soms miljarden jaren onderweg en dat betekent dat wat wij hier nu zien zich miljoenen of miljarden jaren geleden heel erg ver weg heeft afgespeeld. We verkennen dus niet alleen de grenzen van de ruimte maar tegelijkertijd de grenzen van de tijd. De informatie die we van heel ver weg ontvangen, vertelt ons dus iets over wat zich heel lang geleden, d.w.z. in het vroege heelal, heeft afgespeeld.

Maar nu de andere kant van dit verhaal. Zoals ik al zei, was het in het zeer vroege heelal zo heet dat complexe materie gewoonweg niet kon bestaan. Er was geen leven, er waren geen eiwitten, moleculen, atomen of zelfs maar kernen; alle beschikbare energie was aanwezig in de meest elementaire vormen van materie en straling – dus quarks, elektronen, fotonen en wat dies meer zij. Daar begrijpen we als wetenschappers erg veel van, omdat we zo ijverig de natuurkunde van de elementaire deeltjes, d.w.z. de fysica van de allerkleinste afstandschalen bestudeerd hebben. Les extrêmes se touchent.

Er is sprake van een kosmische ‘kortsluiting’ tussen de grootst en kleinst denkbare afstandschalen in ons heelal. Waar we misschien eerst dachten dat de fysica van de grootst en de kleinst voorstelbare afmetingen volstrekt niets met elkaar van doen zouden hebben, blijken ze elkaar in de staart te bijten; het gaat uiteindelijk over één en hetzelfde probleem. Dat is een mooie conclusie: om de rechterkant van de Ouroboros te kunnen bevatten, moeten we de linkerkant begrijpen en vice versa. De fundamentele vragen naar de ultieme binnen- en buitengrenzen van het heelal en dus van onze waarneming, komen samen in de grote vraag naar het ontstaan van dat heelal. Dat gebeurt precies waar de Ouroboros zichzelf in de staart bijt. Daar vindt dus ook de confrontatie plaats tussen twee grote theoretische concepten, dat van de *quantumfysica* als theorie van de materie enerzijds en dat van de relativiteitstheorie als beschrijving van de *ruimtetijd* anderzijds.

Deze theorieën – hoe succesvol ook – blijken echter op een fundamenteel niveau incompatibel met elkaar. Onder de vraag naar de oorsprong van ons heelal ligt dus een fundamenteel conceptueel conflict tussen de twee belangrijkste paradigma's van de moderne natuurwetenschappen. Zo'n fundamenteel conflict is vaak de kiem van een totaal nieuw concept dat beide theorieën op de een of andere manier zal overstijgen. Deze oplossing zal een theorie zijn waarin ruimtetijd en materie als verschillende kanten van dezelfde zaak worden opgevat en dat vereist een interpretatie van wat de *quantumruimtetijd* nu precies is. Anders gezegd: wat zou er gebeuren als de Ouroboros erin zou slagen inderdaad zichzelf te verzwelgen?

Een belangrijk theoretisch raamwerk waarin deze ultieme unificatie plaats kan vinden, is de theorie van de supersnaren, die nu in het centrum van de belangstelling staat en waarin zowel ruimtetijd als alle soorten materie gemaakt zijn van één soort elementaire snaartjes met een typische afmeting van zo'n 10^{-35} cm, heel veel kleiner dus dan de afstandschaal van 10^{-18} cm die we nu met quarks en elektronen associëren. Dit spectaculaire probleem vraagt om een oplossing. Nu begrijpt u waarom de Ouroboros zo'n passend symbool is van wat er in de natuur en de natuurwetenschappen gaande is. Een meer realistische vorm van holisme lijkt me niet denkbaar.

Aan de onderzijde van de Ouroboros doet zich een soortgelijke complementariteit tussen macro- en mikrokosmos voor. Daar zien we de mens als een uiterst gecompliceerd organisme: vooralsnog het summum van complexiteit en daarom ook een ultiem studieobject voor de natuurwetenschappen. Het is duidelijk dat complexiteit de gezamenlijke noemer is van zowel de macroscopische als de microscopische invalshoek; er is daar sprake van een reusachtig kennisfront, dat zich bezig houdt met het leven in al zijn uit-

eenlopende facetten. Aan de linkerkant staan de meer traditionele wetenschappen, zoals de aardwetenschappen, de geologie, de paleontologie, culminerend in de evolutionaire biologie. Immers bij Darwin ontstond het grote inzicht dat de toenemende complexiteit van de verschillende levensvormen begrepen moest worden als verschillende stadia van een dynamisch proces, dat volgens bepaalde wetmatigheden (variatie en natuurlijke selectie) verliep. Het geheel van de levende natuur in al haar complexiteit kon in één klap overzichtelijk en begrijpelijk worden door al die verschijnselen langs een tijdas te ordenen. Dit macrobiologisch evolutieproces heeft, zoals we later zouden ontdekken, een microscopisch evenbeeld in de structuur en evolutie van het DNA. Het DNA is niet alleen een blauwdruk van al het leven op aarde, maar zeker ook een boek of beter bibliotheek, waarin de geschiedenis van het verschijnsel leven objectief en nauwkeurig beschreven staat. Een gigantische, nog grotendeels ongelezen bestseller, die zich naar het zich laat aanzien nog wel een eeuw in de toptien zal weten te handhaven.

Bij dit kennisfront van de complexiteit hoort uiteindelijk ook de natuurwetenschappelijke oplossing voor het probleem van het ontstaan van het leven, maar uitdagender nog, de vraag naar geheugen en cognitie. Ook daar staan een aantal verschillende natuurwetenschappelijke paradigma's omheen met elk een volstrekt andere invalshoek, die uiteindelijk moet leiden tot een eenduidige beschrijving van het functioneren van het brein. De gapende kloof tussen geest en materie zal hier uiteindelijk gedicht moeten worden. Een opwindende ontmoetingsplaats voor celbiologen, hersenonderzoekers, psychologen, ontwikkelingsbiologen en informatici. En daarmee zijn ook aan de onderkant van de Ouroboros de linker en rechter helft met elkaar verbonden. Het lijkt me evident dat de inzichten die nodig zijn om het functioneren van het brein te begrijpen, stap voor stap verkregen kunnen en zullen worden met dezelfde wetenschappelijke methoden. We staan hier nog maar aan het prille begin van een lange weg, die ons in een andere dimensie van ons wetenschappelijke inzicht voert. Dat inzicht zal naar mijn mening een ingrijpende ontmythologisering van de menselijke geest en het bewustzijn met zich meebrengen. In deze lezing heb ik getracht om aan de hand van de Ouroboros een kaleidoscopische perspectief op de wetenschap te geven. De vele facetten die achtereenvolgens zijn belicht, hebben hopelijk duidelijk gemaakt wat ik bedoel met de culturele rijkdom van de natuurwetenschappen. Het blijft een verontrustend feit dat deze rijkdom in ons alledaagse culturele leven zo'n volstrekt marginale rol speelt. Er is alle reden ons daarover druk te maken en ons in te spannen om daar verandering in te brengen.

Dit is een aangepaste vertaling van een hoofdstuk uit mijn boek *One Nature One science: Turning points in the pursuit of truth*, dat zal verschijnen in 2010. De inhoud van dit hoofdstuk vormde de basis van de Jong Diligentia Lezing.

Het auteursrecht van bovenstaande tekst berust bij prof.dr.ir. Sander Bais.

Noot

1. In 1962 hield de toenmalige directeur van het Natlab van Philips, H.B.G. Casimir bij gelegenheid van het lustrum van de Federatie van Natuurwetenschappelijke Faculteitsverenigingen in Groningen een rede waarin hij reeds sprak over deze onderzoekstechnologie spiraal. Deze staat ook beschreven in zijn autobiografie 'Het toeval van de werkelijkheid' (Meulenhof, 2000).