

Over Helgoland:

‘Rovelli laat je achter met een andere blik op de wereld.’

NRC ●●●●

‘Een prachtig, verhelderend en verheffend essay over de revolutie die zich afgelopen eeuw heeft voltrokken in de natuurkunde.’

Trouw

Over Het mysterie van de tijd:

‘Een magistraal boek waarin Carlo Rovelli oude mythes verknoopt met moderne natuurkunde.’

NRC ●●●●

‘Goed schrijven over natuurkunde kunnen maar heel weinig mensen. Bestsellerauteur Carlo Rovelli is een van hen.’

de Volkskrant

Over Zeven korte beschouwingen over natuurkunde:

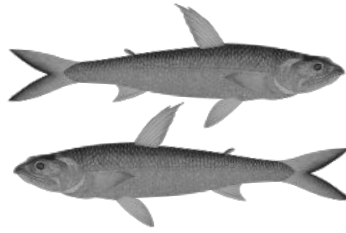
‘Alle natuurkunde en meer in een droomdebuut.’

de Volkskrant *****

‘Poëtische lofzang op de meesterwerken van natuur en natuurkunde.’

NRC ●●●●

Carlo Rovelli



over de
gelijkheid
van alle
dingen

Fysica en filosofie

Vertaald uit het Italiaans door

Hans van den Berg

2026 Prometheus Amsterdam

De uitgever heeft getracht alle rechthebbenden te achterhalen. Aan hen die desondanks menen aanspraak te kunnen maken op enig recht, wordt verzocht contact op te nemen met Uitgeverij Prometheus, Herengracht 48, 1015 BN Amsterdam.

Alle rechten voorbehouden. Tekst- en datamining van (delen van) deze uitgave is uitdrukkelijk niet toegestaan.

Oorspronkelijke titel *Sull'eguaglianza di tutte le cose*

© 2025 Carlo Rovelli

© 2026 Nederlandse vertaling Uitgeverij Prometheus en Hans van den Berg

Omslagontwerp Tessa van der Waals

Omslagbeeld Lizardfish, or Bekut Laut (genus Saurida) © Royal Asiatic Society/Bridgeman Images

Zetwerk en opmaak Willem Morelis

www.uitgeverijprometheus.nl

ISBN 978 90 446 6191 0

Inhoud

Woord vooraf	7
LES EEN	
De relationele structuur van de werkelijkheid	9
Aarde	13
Snelheid	17
Quanta	23
Perspectieven	32
LES TWEE	
Vanuit het inwendige van de cirkel	37
Kennis	39
Zekerheid	42
Informatie	52
Circulariteit	54
LES DRIE	
De ruimtetijd is een quantumproces	63
Tijd	65
Ruimte	71
Zwaartekracht	76
Netwerken	81

LES VIER

Leven in het verstrijken van de tijd	95
Stroom	97
Geheugen en oorzaken	102
Vrijheid	105

LES VIJF

Wat bestaat?	117
Multipliciteit	119
Eenheid	124
Moraal	134

LES ZES

Zonder zekerheid en zonder grondslagen	145
Relaties	147
Vissen	155
Fundamenten	164

APPENDIX

Hoe werkt de wetenschap?	173
Continuïteit met het gezond verstand	175
Historische continuïteit	179
Vanzelfsprekendheid is misleidend	181
Modale instrumenten, geen modellen	182
Begrippen ontwikkelen zich	186
We denken in metaforen	191
Fysica op de verkeerde weg	192
Noten	199
Verantwoording	223
Woord van dank	225
Persoonsnamenregister	227

Woord vooraf

Dit boek komt voort uit een uitnodiging van de afdeling filosofie van de Universiteit van Princeton voor november en december 2024. Mijn contact met de filosofen van Princeton dateert van ongeveer vijftien jaar geleden, toen Bas van Fraassen als een van de eersten belangstelling toonde voor de relationele interpretatie van de quantummechanica. Over dat onderwerp had ik in de jaren negentig van de vorige eeuw voor het eerst een artikel gepubliceerd.¹ Mijn dank gaat uit naar Hans Halvorson die deze relatie weer nieuw leven heeft ingeblazen. Ik dank Gideon Rosen, Mark Johnston en alle medewerkers van de afdeling, van de directeur tot de studenten, voor de warme gastvrijheid en de uiterst levendige discussies, die duidelijk sporen in deze tekst hebben achtergelaten. Het was een heel mooie tijd, vooral wanneer we het niet eens waren.

Onderwerp van de colleges, en van dit boek, zijn de filosofische implicaties van de huidige wetenschappelijke revolutie. In het boek richt ik mij tot andere lezers, tot hen die geen technische kennis hebben en graag willen begrijpen wat de moderne wetenschap zegt over de aloude bekende filosofische vragen. Maar ik richt mij bovendien tot filosofen en wetenschappers die geïnteresseerd zijn in de conceptuele implicaties van zwaartekracht en quantummechanica in hun samenhang.

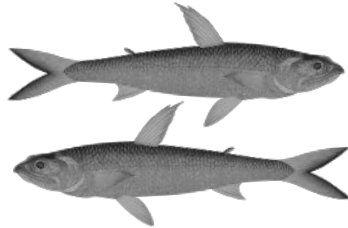
‘Over de gelijkheid van alle dingen’ (齊物論) is de titel van het zeer bijzondere tweede hoofdstuk van de *Zhuangzi*, een van de belangrijkste boeken uit de Oudheid. Daarin wordt al gespeeld op het antifundamentalisme waartoe de moderne wetenschap volgens mij leidt: elektronen en geest, stenen en wetten, oordelen en melkwegstelsels zijn naar hun aard niet fundamenteel verschillend van elkaar. Het zijn begrippen die elkaar verhelderen.

Dat is de wereld die ik zie opdoemen uit de wetenschappelijke revolutie van de twintigste eeuw en die ik op de hierna volgende pagina’s zal toelichten. Het is een wereld die niet uit objecten bestaat, die niet een ruimte bezet houdt, die zich niet in een tijd afspeelt en niet door oorzaak en gevolg wordt geregeerd. Het is een weefsel van relaties, samengesteld uit een vlechtwerk van perspectieven. Dat weefsel kan alleen van binnenuit worden beschreven. Het spoort ons aan om de begrippen waarmee we gewoonlijk de werkelijkheid ordenen te veranderen, om zekerheden op te geven en af te zien van ultieme fundamenteen.

Doordringen in die wereld, erover nadenken en er langdurig erover discussiëren, is voor mij eerst als student, daarna als onderzoeker, een bron van ontzaglijke verbazing geweest en dat is het nog steeds. Het is een vreemde wereld. Maar voor ons, voornamelijk uit gedachten en gevoelens bestaande sterfelijke wezens, lijkt ze mij tamelijk gemakkelijk toegankelijk en aangenaam.

LES EEN

De relationele structuur van de werkelijkheid



Wij zijn hier bijeen ter bevordering van de wiskunde en de fysica. In ons dagelijkse werk stuiten we uiteindelijk op hetzelfde soort vragen als die van de metafysica. We benaderen die vragen niet door te vertrouwen op het in onze geest aangeboren vermogen om erin door te dringen, maar door een langdurig volgehouden afstemming van onze manier van denken op de feiten van de externe natuur.

– James Clerk Maxwell, *Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association*, 1870

Nieuwsgierigheid brengt ons bij elkaar. In het stellen van vragen zijn wij broeders en zusters. We ontdekken voortdurend nieuwe perspectieven, die voor ons een nieuwe kijk op de werkelijkheid mogelijk maken. Het aspect van de wetenschap dat mij onweerstaanbaar aantrekt is het voortdurend bijshaven van onze begrippen. Die moeten zich aanpassen aan hetgeen wij leren. De begrippen waarmee we over de wereld denken zijn gevormd door de ervaring van de generaties vóór ons.

Zo overdenken we steeds opnieuw de aard van de fysische werkelijkheid, maar ook de aard van onze kennis en van onszelf: subjecten van kennis, getuigen van het bestaan, bedenkers en vertolkers van de betekenis van de door ons gebruikte termen, concrete wezens, delen van de fysische wereld, gewezen uit gedachten, wensen, projecten, gevoelens en dromen.

De conceptuele sprongen waartoe de wetenschap van de twintigste eeuw ons brengt zijn zelfs nog radicaler dan die van de grote wetenschappelijke revolutie die de moderne tijd heeft ingeleid. Deze begint bij Copernicus, loopt via Galilei naar Newton en heeft hiërarchieën van engelen en astrale invloeden vervangen door lichamen en krachten. Destijds had het succes van de *scientia nova*, zoals ze werd genoemd, een ingrijpende invloed op de Europese beschaving, en vervolgens op die van de hele wereld. Ze mondde uit in de Verlichting van Voltaire, Hume en Kant, in de industriële revolutie en in de moderniteit. De huidige wetenschappelijke revolutie is al

even overweldigend. Maar ik geloof dat de draagwijdte daarvan nog niet in zijn volle omvang wordt beseft.

Een deel van de filosofie houdt zich verre van de huidige wetenschap. Ik meen dat dat een vergissing is. De beste filosofie heeft altijd aandacht geschonken aan de wetenschap van haar tijd. Aristoteles, Hume, Kant, Husserl... lieten zich veel gelegen liggen aan de wetenschap. Het negeren van de huidige wetenschap is, alsof je na de copernicaanse revolutie blijft volhouden dat de aarde het centrum van de kosmos is. Het is een vorm van niet verder dan je eigen tuintje kijken. Maar ik heb de indruk dat ook het deel van de filosofie dat de wetenschap wél serieus neemt, moeite lijkt te hebben de kennis van de huidige, stormachtige revolutie *in haar geheel* te omarmen.

In dit boek vindt de lezer een bespiegeling over de conceptuele en filosofische implicaties van deze revolutie en van mijn bijdrage om de daarmee samenhangende problemen op te lossen. Ik probeer wat ik nu over deze materie meen te begrijpen samen te vatten, na een aan de fundamentele fysica gewijd leven, waarin ik mij bewoog langs de grenzen van onze kennis. Ik heb mijn best gedaan om de ideeën voor al mijn lezers zo duidelijk mogelijk weer te geven, maar dit is geen eenvoudig boek. Het presenteert een grote waaier van een samenhangend geheel van denkbeelden, om daarmee stap voor stap een coherente visie te ontwikkelen over wat wij volgens mij kunnen (of juist níet kunnen) zeggen over de dingen, over onze kennis, over ruimte, tijd en over onszelf. Dit alles in het licht van wat de huidige fysica ons heeft geleerd.

De lessen gaan beurtelings over de natuur en over onszelf. In les één neem ik, na een korte uiteenzetting over enkele aspecten van de op school geleerde fysica, direct een duik in de vreemde wereld van de quanta.¹ In les twee komen we te spreken over onze kennis. Over hoe we de cirkel tussen onze kennis en de wereld moeten sluiten.²

Les drie is gewijd aan ruimte en tijd³ en aan de begrippenstructuur die noodzakelijk is om de twee grote sprongen in het denken van de twintigste eeuw te combineren: enerzijds de quanta en anderzijds de ontdekkingen van Einstein over ruimte, tijd en de zwaartekracht.⁴ Les vier brengt ons terug bij onszelf, met een discussie over de fysische basis van het verstrijken van de tijd en de daarmee samenhangende verschijnselen. Het belangrijkste daarin is onze evidente vrijheid om zelf besluiten te nemen over onze toekomst.⁵

Les vijf bespreekt hoe wij tegenwoordig over de natuur kunnen denken.⁶ In les zes probeer ik de draden van deze zeer rijke, echter niet tot zekerheden en ultieme grondbeginselen te herleiden kennis, samen te binden. In een gedetailleerde appendix bespreek ik hoe wetenschap werkt – de wetenschap die ons de vreemde wereld heeft geopenbaard waarover ik u in de volgende hoofdstukken zal vertellen.⁷

Aarde

Voordat we aan de quanta, het onderwerp van deze eerste les, toekomen, eerst een paar opmerkingen vooraf. Wij mensen wonen op het oppervlak van de planeet aarde. Dat is een eigenaardige plek, met in het universum als geheel beslist onge-

bruikelijke kenmerken. Ze zijn niet uniek – er zijn planeten die op de aarde lijken – maar de onmetelijke kosmos is heel anders dan ons huis. De eigenaardigheden van het oppervlak van onze planeet leiden tot vooroordelen die het voor ons moeilijk maken de grote wereld te begrijpen. Hier komen er een paar.

De aarde heeft een heel klein oppervlak. Zo klein dat licht een tiende van een seconde nodig heeft om één keer de aarde rond te gaan. Dat is korter dan wij met onze zintuigen kunnen waarnemen. Daarom communiceren wij op een manier die ons instantaan toeschijnt: we telefoneren vanuit New York met Shanghai alsof ze pal naast elkaar liggen. Dat zouden we niet kunnen doen met een vriend die dicht bij een andere ster zou wonen. Om boodschappen heen en weer te sturen naar de dichtstbijzijnde ster zijn vele jaren nodig. Een gesprek zou doodsaaï zijn. De geringe omvang van de aarde geeft ons het gevoel dat er overal een gemeenschappelijke tijd bestaat. Dat het altijd zin heeft om te vragen wat er precies op dit moment ergens anders gebeurt. Je hoeft maar een telefoontje te plegen om dat te weten te komen. In de grote wereld is dat niet zo. Het idee van een gemeenschappelijke tijd werkt hier op aarde, waar wij burens zijn, maar het werkt niet in de rest van het universum.

Op de aarde bevinden zich objecten. Een steen, een pen, een huis, dat zijn objecten. Stevige, welomschreven entiteiten, stabiel in de tijd. Voor ons geeft dat aanleiding om te denken dat de natuur uit dingen bestaat. Maar we hoeven maar aan Jupiter, aan Saturnus of aan de zon te denken om ons te realiseren dat dat niet altijd zo is. Dat zijn veel grotere werelden dan de aarde

en er treden allerlei verschijnselen op, maar ze zijn gasvormig. Dáár zijn verschijnselen niet interpreteerbaar in termen van objecten. Op Saturnus bevinden zich geen ‘dingen’.

Het oppervlak van de aarde is omgeven door lucht. Lucht is een vreemde materie. We doen alsof de lucht niet aanwezig is, want we zeggen ‘dit glas is leeg’, terwijl het vol lucht zit. De vluchtigheid van de lucht maakt dat wij denken dat de ruimte leeg is. Maar in de kosmos is het nergens echt leeg.

Een kwart van het aardoppervlak is zeer hard. Aardbevingen en verticale bodembewegingen zijn zeldzaam. De continenten bewegen zich uiterst langzaam. Die omstandigheid biedt ons een bijzondere kans om ons te lokaliseren: we kunnen namen aan plaatsen op de aarde geven en die gebruiken om te zeggen waar dingen zijn – ‘ik ben in Princeton’ of ‘ik sta op de Dam in Amsterdam’. Als er alleen maar zee was, met nooit stilstaand water, dan was het veel moeilijker om onze plaats te bepalen. Zeelieden weten dat heel goed. Het bestaan van op het harde oppervlak van de continenten gefixeerde plaatsen leidt ertoe dat we over de ruimte denken op een wijze die ergens anders niet werkt. Daardoor kunnen wij zeggen: ‘Ik blijf op dezelfde plaats.’ Daarmee geven wij aan: ‘Ik beweeg me niet ten opzichte van het vaste oppervlak van de aarde.’ Op Jupiter is het niet duidelijk wat ‘ik blijf op dezelfde plaats’ betekent.

Op de aarde is de zwaartekracht overal min of meer even sterk. Daarom is de tijd die verloopt tussen het moment dat we afscheid nemen en het moment dat we elkaar weer tegenkomen dezelfde voor ons allemaal. Maar in het grote universum is dat niet het geval. Voor verschillende reizigers verstrijkt de tijd met

verschillende snelheden. Wanneer ze elkaar weer ontmoeten, zijn ze in het algemeen niet evenveel jaren ouder geworden.

* * *

Een kind dat in een dorp opgroeit denkt dat de wereld overal hetzelfde is als zijn dorp. Hij denkt dat hij dezelfde gewoontes zal tegenkomen, dezelfde kleren, dezelfde taal. Wanneer hij ontdekt dat de wereld anders is, verbaast hij zich. Die verbazing maakt leren mooi. Dat is wetenschap.

Het is echter niet altijd gemakkelijk je los te maken van de ideeën van je geboortedorp. Ook al leren we dat katten in Londen *cats* worden genoemd en in New Delhi *billee*, het kost ons toch wat moeite om het idee te accepteren dat de echte naam van dat dier niet 'kat' is.

Instinctief denken we dat lokale bijzonderheden universele waarheden zijn. Het is voor ons niet gemakkelijk te accepteren dat dingen die voor ons vanzelfsprekend lijken slechts aspecten zijn van 'het bloemperk dat ons zo bloeddorstig maakt'.⁸ Zo noemt Dante de aarde wanneer hij haar, aan het eind van het Paradijs, vanuit de hoge hemel van de vaste sterren heel klein onder zich ziet.

De kenmerken van het aardoppervlak in het dorp waarin we zijn opgegroeid doen bij ons vooroordelen ontstaan die we niet gemakkelijk kunnen loslaten. Als we niet zo willen zijn als het kind dat alleen zijn eigen dorp kent, moeten we leren ons daarvan wél los te maken.

In de grote wereld bestaan er geen objecten, lege ruimte, absolute methoden om gebeurtenissen te lokaliseren. Daar betekent het niets als we spreken over een 'nu' in ver weg gelegen plaatsen, er bestaat geen gemeenschappelijke tijd... De werkelijkheid is, zoals we stap voor stap zullen zien, complexer, meer gevarieerd, dan de ons vertrouwde werkelijkheid.

Snelheid

Staat u me toe om, voordat ik me bezig ga houden met de wetenschap van de twintigste eeuw, nog even bij een ander elementair feit stil te staan. Het betreft een idee dat een belangrijke rol in het boek zal spelen.

Kijk eens, beste lezer of lezeres, naar een object in uw directe omgeving, bijvoorbeeld de stoel waarop u zit (of de bank waarop u ligt). Kijk ernaar en vraag u af of het beweegt of stilstaat. Behalve natuurlijk wanneer u dit in een trein of in een vliegtuig leest. In dat geval beweegt de stoel zich even snel als de trein of het vliegtuig en zijn snelheid kan ook honderden meters per seconde bedragen.

Maar misschien heeft u zich al gerealiseerd dat de aarde beweegt: ze draait rond en cirkelt om de zon. We bewegen allemaal met haar mee, met een aanzienlijke snelheid. De stoel beweegt dus in ieder geval, samen met de aarde.

Daarmee zijn we er nog niet. Ook de Melkweg draait rond, en daarmee ook ons zonnestelsel. De stoel beweegt zich met de Melkweg, op hoge snelheid. En de Melkweg? Beweegt die niet ook met een of andere snelheid? ... ten opzichte van wat?