

CARLO ROVELLI

DE  
WERKELIJK-  
HEID  
IS NIET  
WAT ZE  
LIJKT

A  
U  
P

De werkelijkheid is niet wat ze lijkt



Amsterdam  
University  
Press



Amsterdam  
University  
Press

# De werkelijkheid is niet wat ze lijkt

*Een reis in de wereld van de quantumzwaartekracht*

*Carlo Rovelli*

AUP



Amsterdam  
University  
Press

Deze publicatie is tot stand gekomen met steun van SEPS - Segretario Europeo per le Pubblicazione Scientifiche. Via Val d'Aposa 7, 40123 Bologna, Italië.  
seps@seps.it | www.seps.it



Oorspronkelijke uitgave: Carlo Rovelli, *La realtà non è come ci appare. La struttura elementare delle cose*. Raffaello Cortina Editore, 2014.  
[ISBN 978-88-6030-641-8]  
© 2014, Raffaello Cortina Editore

Vertaling: Hans van den Berg

Ontwerp omslag: Moker Ontwerp

Ontwerp binnenwerk: Crius Group, Hulshout

ISBN 978 94 6298 539 1  
e-ISBN 978 90 4853 648 1 (pdf)  
e-ISBN 978 90 4853 649 8 (ePub)  
NUR 910

Uitgeverij AUP is een imprint van Amsterdam University Press.

© C. Rovelli / Amsterdam University Press B.V., Amsterdam 2017

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

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

De uitgeverij heeft ernaar gestreefd alle copyrights van in deze uitgave opgenomen illustraties te achterhalen. Aan hen die desondanks menen alsnog rechten te kunnen doen gelden, wordt verzocht contact op te nemen met Amsterdam University Press.



Amsterdam  
University  
Press

# Inhoud

Opmerkingen vooraf 7

Voorwoord: Een strandwandeling 11

## Eerste deel – Wortels

1. Korrels 19
2. De klassieken 42

## Tweede deel – Het begin van de revolutie

3. Albert 65
4. Quanten 102

## Derde deel – Gequantiseerde ruimte en relationele tijd

5. De ruimtetijd is gequantiseerd 133
6. Ruimtequanten 145
7. De tijd bestaat niet 158

## Vierde deel – Voorbij ruimte en tijd

8. Voorbij de oerknal 179
9. Empirische bevestiging? 186
10. De warmte van zwarte gaten 197
11. Het einde van het oneindige 205
12. Informatie 212
13. Het mysterie 230



Noten	237
Geannoteerde bibliografie	251
Index	254

# Opmerkingen vooraf

Gedurende mijn hele loopbaan als onderzoeker hebben vrienden en belangstellenden mij gevraagd uit te leggen hoe het stond met het onderzoek naar de quantumzwaartekracht. Hoe was het mogelijk nieuwe manieren van denken over ruimte en tijd te ontdekken? Talloze malen is mij gevraagd een populairwetenschappelijk boek over dit onderzoek te schrijven. Er zijn talloze boeken over kosmologie of snaartheorie, maar er bestond nog geen boek dat het onderzoek naar het quantumkarakter van ruimte en tijd en meer in het bijzonder de lus-quantumzwaartekracht beschrijft. Ik heb lang gearzeld, want ik wilde mij concentreren op mijn onderzoek. Enkele jaren geleden, toen ik mijn technische boek over dit onderwerp had voltooid, voelde ik dat door de gezamenlijke inspanningen van velen het onderwerp zover gerijpt was dat de tijd was gekomen voor een populairwetenschappelijk boek. Het terrein dat wij verkennen is fascinerend, waarom zouden we dat nog langer verborgen houden?

Toch ik stelde het schrijven uit, want ik kon het boek nog niet 'voor me zien'. Hoe moet je een wereld *zonder* ruimte en tijd uitleggen? Op een nacht in 2012, toen ik in mijn eentje een lange autorit van Italië naar Frankrijk maakte, kwam ik tot de conclusie dat er maar één manier was om op begrijpelijke wijze de steeds voortgaande veranderingen van de begrippen ruimte en tijd uit te leggen, namelijk om bij het begin te beginnen en het verhaal te vertellen vanaf de tijd van Democritus tot aan de huidige tijd, waarin we spreken over de gequantiseerde ruimte. Per slot van rekening begrijp ik het verhaal zelf ook zo. Tijdens die rit begon ik het boek te bedenken en raakte ik steeds enthousiaster, totdat ik de sirene hoorde van een politieauto die mij maande te stoppen. Ik reed ver boven de toegestane maximumsnelheid. De Italiaanse agent vroeg mij beleefd of ik gek was, omdat ik veel te hard reed. Ik legde uit dat ik zojuist het idee had bedacht waar ik al zolang naar op zoek was geweest. Hij liet me zonder



boete doorrijden en wenste me succes met het boek. Dat is het boek dat voor u ligt.

Ik schreef het eerst in het Italiaans. Het werd in het begin van 2014 gepubliceerd. Kort daarna schreef ik een paar artikelen over fundamentele natuurkunde voor een Italiaanse krant. Een vooraanstaande Italiaanse uitgeverij, Adelphi, vroeg mij om van die artikelen een uitgebreidere versie te maken die in boekvorm zou moeten verschijnen. Zo ontstond *Zeven korte beschouwingen over natuurkunde*, dat tot mijn enorme verbazing een internationale bestseller is geworden en mij een fantastische mogelijkheid tot communicatie heeft opgeleverd met talloze bevroegen lezers overal op de wereld. Dat boekje is dus ná dit boek geschreven en is tot op zekere hoogte een samenvatting van sommige van de onderwerpen die u hier aantreft. Als u *Zeven korte beschouwingen over natuurkunde* heeft gelezen en meer wilt weten, als u dieper wilt doordringen in de vreemde wereld die daarin wordt geschetst, dan kunt u in dit boek terecht.

Hoewel het verhaal over de gevestigde natuurkunde dat ik hier vertel wordt gepresenteerd vanuit het perspectief waarin ik het zelf begrijp, is het grotendeels onomstreden. Maar dat deel van het boek dat het lopende onderzoek in de quantumzwaartekracht beschrijft, geeft mijn eigen, persoonlijke visie op de huidige stand van zaken weer. Dit is het gebied op de grens van wat we al hebben begrepen en wat we nog niet begrijpen en waarover nog helemaal geen consensus bestaat. Sommigen van mijn collega's zullen het eens zijn met wat ik hier schrijf, anderen niet. Dat geldt voor alle presentaties van lopend onderzoek aan het front van de wetenschap en ik wil dat graag expliciet en duidelijk stellen. Dit is geen boek over zekerheden: het is een boek over het avontuur van een speurtocht naar het onbekende.

Het hele boek is een reisverslag waarin een van de spectaculairste reizen wordt beschreven die de mensheid ooit heeft ondernomen: weg van onze beperkte, huis-tuin-en-keukendenkbeelden over de werkelijkheid, naar een steeds omvattender

begrip van de structuur van de dingen. Een magische reis, weg van onze gezondverstandopvatting van de dingen, een reis die nog lang niet ten einde is.

Marseille, 4 mei 2016



Amsterdam  
University  
Press

# Voorwoord:

## Een strandwandeling

Wij zijn geobsedeerd door onszelf. We bestuderen *onze* geschiedenis, *onze* psychologie, *onze* filosofie, *onze* literatuur, *onze* goden. Veel van onze kennis draait om de zichzelf observerende mens, alsof wij het belangrijkste in het heelal zouden zijn. Ik geloof dat ik van natuurkunde houd omdat ze het raam opent en ons in de verte laat kijken. Ze geeft me het gevoel dat er frisse lucht in huis komt.

Over wat we door dat raam zien kunnen we ons alleen maar verwonderen. We hebben heel veel over het heelal geleerd. In de loop van de eeuwen hebben we ingezien hoeveel verkeerde ideeën we hebben gehad. We dachten dat de aarde plat was. Dat ze stilstond in het centrum van de wereld. Dat het heelal klein was en altijd gelijk aan zichzelf bleef. We geloofden dat de mens een op zichzelf staande soort was, niet verwant aan andere dieren. We hebben geleerd dat er quarks bestaan, zwarte gaten, lichtdeeltjes, ruimtegolven en zeer bijzondere moleculaire structuren in elke cel van ons lichaam. De mensheid is als een opgroeiend kind dat met schrik ontdekt dat de wereld niet alleen bestaat uit zijn eigen kamertje en zijn speeltuin, maar dat ze enorm groot is, dat er duizenden dingen vallen te ontdekken en dat je ideeën kunt leren kennen die anders zijn dan die waarmee je opgroeide. Het heelal is veelvormig en onbegrensd, en we ontdekken er voortdurend nieuwe aspecten van. Hoe meer we over de wereld leren, hoe meer we ons verbazen over haar gevarieerdheid, haar schoonheid en haar eenvoud.

Maar hoe meer we ontdekken, hoe meer we ook beseffen dat wat we nog niet weten meer is dan wat we al hebben begrepen. Hoe krachtiger onze telescopen zijn, hoe meer vreemde en onverwachte delen van de hemel we kunnen zien. Hoe meer we naar de kleinste details van de materie kijken, hoe meer onderliggende structuren we zien. Tegenwoordig kunnen we

bijna tot aan de Oerknal (Big Bang) kijken, de grote explosie waaruit 14 miljard jaar geleden alle melkwegstelsels in het heelal zijn ontstaan; maar we beginnen te ontdekken dat er voorbij de Oerknal mogelijk iets zou kunnen zijn. We hebben geleerd dat de ruimte gekromd is en we beginnen nu te vermoeden dat diezelfde ruimte een weefsel is van vibrerende quantumkorrels.

Wat we weten over de fundamentele structuur van de wereld neemt voortdurend toe. Als we proberen samen te voegen wat we in de loop van de twintigste eeuw over de fysische wereld hebben geleerd, vinden we aanwijzingen voor iets dat fundamenteel verschilt van de ideeën over materie en energie, over ruimte en tijd, die ze ons op school hebben geleerd. Er komt een basisstructuur van de wereld aan het licht waarin tijd en ruimte niet bestaan; ze wordt gegenereerd door een wirwar van quantumgebeurtenissen. Ruimte, tijd, materie en licht worden gevormd door quantumvelden die informatie uitwisselen tussen gebeurtenissen. De werkelijkheid is een netwerk van korrelige gebeurtenissen en de dynamica die ze met elkaar verbindt, is probabilistisch van aard. Tussen de ene en de andere gebeurtenis lossen ruimte, tijd, materie en energie op in een wolk van waarschijnlijkheid.

Deze nieuwe, vreemde wereld wordt momenteel stukje bij beetje zichtbaar nu we het belangrijkste open probleem bestuderen van de fundamentele natuurkunde: de *quantumzwaartekracht*. Het gaat om het probleem een consistent geheel te vormen van wat we over de wereld hebben geleerd door middel van de twee grote ontdekkingen van de natuurkunde van de twintigste eeuw: de algemene relativiteitstheorie en de quantumtheorie. Dit boek is gewijd aan de *quantumzwaartekracht* en aan de vreemde wereld die het onderzoek daarnaar voor ons ontsluit.

Het vertelt ons over lopend onderzoek, over wat we leren, wat we weten en over wat we denken te gaan begrijpen van de aard van de basisstructuren waaruit de dingen bestaan. Het begint bij de oorsprong, ver terug in de tijd, van enkele fundamentele ideeën die ons tegenwoordig in staat stellen orde te scheppen in onze gedachten over de wereld. Het beschrijft de twee grote

ontdekkingen van de twintigste eeuw, de algemene relativiteitstheorie van Einstein en de quantummechanica, en probeert de centrale kern van hun fysische inhoud in het juiste licht te plaatsen. Het vertelt over het wereldbeeld dat nu tevoorschijn komt uit het onderzoek van de quantumzwaartekracht, en gebruikt daarbij de meest recente gegevens die de natuur ons heeft verschaft, zoals de bevestigingen van het kosmologische standaardmodel die zijn verkregen met de Planck-satelliet (2013), het niet waarnemen van de door velen voorspelde supersymmetrische deeltjes bij CERN (2013) en de detectie van zwaartekrachtgolven (2016). Het bespreekt de gevolgen van deze ideeën: de korrelstructuur van de ruimte, het verdwijnen van de tijd op de kleinste schaal, de natuurkunde van de Oerknal, de oorsprong van de warmte van zwarte gaten, tot aan de rol die informatie speelt in de basisbegrippen van de natuurkunde.

In de beroemde mythe die Plato in Boek VII van *De Staat* vertelt, zijn de mensen vastgeketend aan een muur achter in een donkere grot en zien ze alleen schaduwen die door een vuur achter hen worden geprojecteerd op de muur vóór hen. Ze denken dat dat de werkelijkheid is. Een van hen bevrijdt zich, ontsnapt en ontdekt het licht van de zon en de reusachtige buitenwereld. In het begin verblindt en verwacht dat licht hem, zijn ogen zijn er niet aan gewend. Maar hij slaagt er toch in te kijken en keert als gelukkig mens naar zijn metgezellen terug om te vertellen wat hij heeft gezien. Zij kunnen hem nauwelijks geloven.

Wij zitten allemaal achter in een grot, vastgeketend door onze onwetendheid, onze vooroordelen, en onze zwakke zintuigen tonen ons schaduwen. Als we proberen verder te kijken, raken we vaak in verwarring: we zijn er niet aan gewend. Maar we proberen het. Dat is wetenschap. Het wetenschappelijk denken onderzoekt de wereld en overdenkt haar opnieuw, ze verschaft ons steeds betere beelden van de wereld en leert ons om er op doeltreffender wijze over na te denken. De wetenschap is een voortdurende exploratie van vormen van denken. Haar kracht is haar visionaire vermogen om vooropgezette ideeën omver te werpen, om nieuwe gebieden van de werkelijkheid te ontsluiten

en om nieuwe en effectievere beelden van de wereld te construeren. Dit avontuur steunt op het geheel van reeds verzamelde kennis, maar in de kern behelst het verandering. Verder kijken. De wereld is grenzeloos en fonkelt in alle kleuren van de regenboog. We willen haar gaan zien. We worden ondergedompeld in haar mysterie en in haar schoonheid en achter de heuvel liggen nog ononderzochte gebieden. De onzekerheid waarin we leven, de onbestendigheid die boven de afgrond zweeft van onze immense onwetendheid, maakt het leven niet zinloos, maar juist zeer waardevol.

Ik heb dit boek geschreven om te vertellen wat voor mij het wonderbaarlijke is van dit avontuur. Terwijl ik het schreef had ik een lezer in gedachten die niets weet van natuurkunde, maar die nieuwsgierig is en wil weten wat we tegenwoordig wel, en wat we nog niet begrijpen van het weefsel dat de wereld vorm geeft, en in welke richting we zoeken; en om te proberen de adembenemende schoonheid over te brengen van het panorama van de werkelijkheid dat we vanuit dit perspectief kunnen zien.

Ik heb het ook geschreven met in gedachten mijn collega's, over de hele wereld verspreide reisgenoten, en de jonge mensen die een vurige hartstocht voor de wetenschap bezitten en die zich op dit pad willen begeven. Ik heb geprobeerd het algemene panorama van de structuur van de fysische wereld te schetsen, gezien in het licht van zowel de relativiteitstheorie als de quantumtheorie, zoals ik denk dat het in elkaar kan zitten. Het is niet alleen een populairwetenschappelijk boek; het is ook een boek waarin ik probeer een samenhangende visie uiteen te zetten over een onderzoeksgebied waarin je het risico loopt dat de abstractheid van het technisch taalgebruik het zicht op het geheel bemoeilijkt. De wetenschap bestaat uit experimenten, hypothesen, vergelijkingen, berekeningen en lange discussies, maar dit zijn alleen maar gereedschappen, zoals instrumenten dat voor musici zijn. Wat uiteindelijk telt is de muziek, en wat in de wetenschap telt is het begrip van de wereld dat de wetenschap kan bieden. Om de betekenis te begrijpen van de ontdekking dat de aarde om de zon draait is het niet nodig om de gecompliceerde

berekeningen van Copernicus te doorgronden; om het belang te begrijpen van de ontdekking dat alle levende wezens van onze planeet dezelfde voorouders hebben is het niet nodig de complexe argumentaties in Darwins boek te volgen. De wetenschap is het interpreteren van de wereld vanuit een steeds breder perspectief.

In dit boek geef ik de huidige stand weer van het onderzoek naar dit nieuwe wereldbeeld, zoals ik het nu zie, door te proberen de essentiële punten en de logische verbanden te belichten. Zoals je het zou vertellen aan een bevriende collega met wie je op een lange zomeravond een strandwandeling maakt en die zou vragen: 'Hoe denk jij nou dat de dingen werkelijk in elkaar zitten?'





Amsterdam  
University  
Press