

Helgoland

Carlo Rovelli

# Helgoland

Het verhaal van de kwantumfysica,  
de ingrijpendste wetenschappelijke revolutie  
aller tijden

Vertaald door  
Hans van den Berg

2021 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, Postbus 1662, 1000 BR Amsterdam.

Oorspronkelijke titel *Helgoland*

© 2020 Carlo Rovelli

© 2021 Nederlandse vertaling Uitgeverij Prometheus en Hans van den Berg.

Vertaald met medewerking van Welmoet Hillen en Brigitte Linskens.

Omslagontwerp Tessa van der Waals

Foto omslag plainpicture/Water Rights/Jeff Hornbaker

Foto auteur Basso Cannarsa

Zetwerk en opmaak Willem Morelis

[www.uitgeverijprometheus.nl](http://www.uitgeverijprometheus.nl)

ISBN 978 90 446 4504 0

*Voor Ted Newman, die mij deed inzien  
dat ik de kwantummechanica niet begreep*

## Een blik in de afgrond

Čáslav en ik zaten op het strand, vlak bij de zee. Daar spraken we urenlang met elkaar. Op de vrije middag van de conferentie waren we naar het eiland Lamma gegaan, voor de kust van Hongkong. Čáslav is een van de beroemdste experts op het gebied van de kwantummechanica. Op de conferentie gaf hij een analyse van een ingewikkeld gedachte-experiment. Dat bespraken we steeds opnieuw terwijl we het pad langs de jungle naar het strand afliepen, en daarna hier aan zee. We worden het praktisch eens. Dan valt er op het strand een lange stilte tussen ons. We kijken naar de zee. Het is echt ongelooflijk, fluistert Čáslav, hoe kun je dat geloven? Het is alsof de werkelijkheid... niet zou bestaan.

Zo staat het er nu voor wat de kwanta betreft. Na een eeuw van spectaculaire resultaten, nadat ze ons de hedendaagse technologie heeft verschaft en aan de basis ligt van de hele twintigste-eeuwse fysica, vervult de meest succesvolle theorie van de wetenschap ons nog steeds met verbazing en geeft ze aanleiding tot verwarring en ongelooft.

Er is een moment geweest waarop de grammatica van de wereld helder leek: het leek alsof het fundament van alle verschillende vormen van de werkelijkheid bestond uit materiële deeltjes, die door slechts enkele krachten werden beheerst. De mensheid kon denken dat ze de sluier van Maya had opgetild – dat ze tot op de bodem van de werkelijkheid had gekeken

## HELGOLAND

Maar dat duurde niet lang, want er waren veel feiten die niet klopten.

Totdat in de zomer van 1925 een drieëntwintigjarige Duitse student naar het winderige Noordzee-eiland Helgoland (het Heilige Land) trok, om daar enkele weken in gespannen eenzaamheid door te brengen. Daar, op dat eiland, vond hij een idee dat hem in staat stelde alle weerbarstige feiten te verklaren en de wiskundige structuur te construeren van de kwantummechanica, de 'kwantumtheorie': misschien wel de grootste wetenschappelijke revolutie aller tijden. De naam van die student was Werner Heisenberg. Het verhaal van dit boek begint bij hem.

De kwantumtheorie heeft de basis gelegd voor de chemie, heeft verklaringen opgeleverd voor het functioneren van atomen, vaste stoffen, plasma's, de kleur van de hemel, de neuronen van onze hersenen, van de dynamica van sterren, van het ontstaan van sterrenstelsels... van duizend en een aspecten van de wereld. Ze ligt ten grondslag aan de recentste technologieën: van computers tot kerncentrales. Ingenieurs, astrofysici, kosmologen, chemici en biologen gebruiken haar dagelijks. Op de middelbare scholen worden sommige basisbegrippen ervan onderwezen. Ze heeft nog nooit gefaald. Ze is het kloppende hart van de hedendaagse wetenschap. En toch blijft ze voor ons een groot mysterie, op een subtiele manier verontrustend.

Ze heeft het beeld van de werkelijkheid als bestaande uit deeltjes die langs welbepaalde banen bewegen vernietigd, zonder uit te leggen hoe we de wereld dan wél moeten zien. Haar wiskunde beschrijft de werkelijkheid niet, ze vertelt ons niet 'wat er is'. Ver van elkaar verwijderde objecten lijken op magische wijze met elkaar te zijn verbonden. Materie is vervangen door spookachtige kansgolven.

Iedereen die zich buigt over de vraag wat de kwantumtheorie ons vertelt over de werkelijke wereld wordt heel onzeker. Einstein, die daarover al eerder ideeën naar voren had gebracht die Heisenberg op weg hielpen, heeft haar nooit geaccepteerd. Richard Feynman, de grote theoretisch fysicus van de tweede helft van de twintigste eeuw, schreef dat niemand de kwanta begrijpt.

Maar dat is wetenschap: ze exploreert nieuwe manieren om de wereld te begrijpen. Het is ons vermogen onze grondbegrippen voortdurend ter discussie te stellen. Het is de visionaire kracht van een rebels en kritisch denken dat in staat is zijn eigen basisbegrippen te wijzigen en de wereld weer op te bouwen vanaf nul.

De vreemdheid van de theorie brengt ons in verwarring, maar opent ook nieuwe perspectieven voor ons begrip van de werkelijkheid. Een werkelijkheid die subtieler is dan het simplistische materialisme van deeltjes in de ruimte. Een werkelijkheid die meer uit relaties dan uit objecten bestaat.

De theorie opent nieuwe wegen voor het doordenken van de grote vragen, van de structuur van de werkelijkheid tot de aard van de ervaring, van de metafysica tot misschien zelfs de aard van het bewustzijn. Dat alles is tegenwoordig onderwerp van een zeer levendig debat tussen wetenschappers en filosofen, en al die dingen zullen op de komende pagina's aan de orde komen.

Op het kale, ongenaakbare, door de noordenwind gezeselde Helgoland lichtte Werner Heisenberg een tipje van de sluier op die tussen ons en de waarheid hangt. Later bleek die sluier een afgrond. Het verhaal van dit boek begint op dat eiland waar Heisenberg de kiem legde voor zijn idee, en geleidelijk verbreedt het zich tot de steeds grotere vragen die door de ont-

## HELGOLAND

dekking van de kwantumstructuur van de werkelijkheid aan de orde zijn gekomen.

*ħħ*

Ik heb deze pagina's in de eerste plaats geschreven voor wie de kwantumfysica niet kent en graag, voor zover mogelijk, wil begrijpen wat die theorie inhoudt en wat haar implicaties zijn. Ik heb geprobeerd zo beknopt mogelijk te zijn en elk detail achterwege te laten dat niet essentieel is om de kern van de zaak te kunnen vatten. Ik heb geprobeerd zo duidelijk mogelijk te zijn over een theorie die een duistere kern vormt binnen de wetenschap. In plaats van uit te leggen hóe je de kwantummechanica kunt begrijpen, hoef ik misschien alleen maar uit te leggen waarom het zo móeilijk is haar te begrijpen.

Maar het boek is ook bedoeld voor mijn collega's, wetenschappers en filosofen die, naarmate ze dieper in de theorie doordringen, steeds meer gaan twijfelen; om de lopende discussie over de betekenis van deze verbazingwekkende fysica voort te zetten en een algemeen perspectief te schetsen. Het boek is voorzien van talrijke eindnoten die zijn bedoeld voor wie de kwantummechanica al goed kent. Ze vertellen nauwkeuriger wat ik in de tekst op een leesbaarder manier probeer te zeggen.

Het hoofddoel van mijn onderzoek in de theoretische fysica was het doorgronden van het kwantumkarakter van ruimte en tijd. Om de kwantumtheorie op coherente wijze te kunnen verenigen met Einsteins ontdekkingen over ruimte en tijd. Ik was altijd aan het nadenken over de kwanta. Deze tekst vertelt op welk punt ik nu ben gekomen. Andere meningen worden niet genegeerd, maar de tekst is zeker partijdig: hij concentreert zich op de 'relationele interpretatie' van de theorie, een



zienswijze die ik als effectief beschouw en die volgens mij de interessantste nieuwe wegen ontsluit.

Een waarschuwing vooraf. De afgrond van hetgeen we niet weten oefent altijd een magnetische, ja duizelingwekkende aantrekkingskracht uit. De kwantummechanica serieus nemen en nadenken over haar implicaties is een bijna psychedelische ervaring: het vraagt van ons dat we, hoe dan ook, afzien van hetgeen ons solide en onaanvechtbaar leek wat betreft ons begrip van de wereld. Het vraagt van ons om te accepteren dat de werkelijkheid heel anders is dan we dachten. Om onze blik in die afgrond te werpen, zonder bang te zijn in die peilloze diepte te vallen.

Lissabon, Marseille, Verona, Londen, Ontario

2019-2020

# EERSTE DEEL

# I

*‘Kijkend naar een fundament van een vreemde interne  
schoonheid’*

Hoe het kwam dat een Duitse natuurkundestudent een  
heel vreemd idee bedacht, dat echter een heel goede  
beschrijving van de wereld opleverde,  
en de grote verwarring die daarop volgde

## 1 Het absurde idee van de jonge Werner Heisenberg: observabelen

Om ongeveer drie uur 's nachts lag het eindresultaat van mijn berekeningen voor me. Ik voelde me diep geschokt. Ik was zo opgewonden dat er aan slapen niet te denken viel. Ik ging naar buiten en begon in de naderende ochtendschemering langzaam te lopen. Ik klom naar een boven de zee uitstekende rots, op de punt van het eiland, en wachtte daar op de zonsopgang...<sup>1</sup>

Ik heb me vaak afgevraagd wat de jonge Heisenberg dacht en voelde toen hij op die boven de zee uitstekende rots was geklommen op dat kale en winderige Noordzee-eiland Helgoland, terwijl overal vóór hem de golven zich uitstrekten, nadat hij als eerste een blik had geworpen op een van de duizelingwekkendste geheimen van de natuur die de mensheid ooit heeft aanschouwd. Hij was toen drieëntwintig jaar.

Hij was daar om verlichting te zoeken voor zijn hooikoorts. Op Helgoland – de naam betekent ‘heilig land’ – staan bijna geen bomen en er is heel weinig stuifmeel. ‘Helgoland, met zijn eenzame boom’ noemt Joyce het in zijn *Ulysses*. Hij was daar vooral om zich helemaal onder te dompelen in het probleem dat hem obsedeerde: de hete aardappel die Niels Bohr hem in handen had gespeeld. Hij sliep heel weinig en bracht zijn tijd in eenzaamheid door, terwijl hij iets probeerde uit te rekenen

## EERSTE DEEL I

wat de onbegrijpelijke regels van Bohr zou verklaren. Zo nu en dan onderbrak hij zijn berekeningen om de rotsen van het eiland te gaan beklimmen. Tijdens korte rustmomenten leerde hij gedichten uit de *West-oostelijke divan* uit zijn hoofd, de dichtbundel waarin de grote Duitse dichter Goethe zijn liefde voor de islam bezingt.

Niels Bohr was toen al een beroemd wetenschapper. Hij had eenvoudige maar vreemde formules bedacht die de eigenschappen van chemische elementen voorspelden, nog voordat ze werden gemeten. Ze voorspelden bijvoorbeeld de frequentie van het licht dat elementen uitzenden als ze worden verhit, dat wil zeggen de kleur van dat uitgezonden licht. Die formules waren echter onvolledig: de intensiteit van dat licht kon je er niet uit afleiden.

Maar bovenal was er iets absurds aan deze formules: er werd zonder reden aangenomen dat de elektronen in de atomen rond de kern draaiden in *exact bepaalde* banen, op *exact bepaalde* afstanden van de kern, met *exact bepaalde* energieën. En dan 'sprongen' ze ook nog eens op magische wijze van de ene baan naar de andere. Dat waren de eerste 'kwantumsprongen'. Waarom alleen *díe* banen? Wat zijn dat dan voor ongerijmde 'sprongen' van de ene baan naar de andere? Welke onbekende kracht kan een elektron zo aansturen dat het zulk bizar gedrag vertoont?

Atomen zijn de elementaire bouwstenen van alles. Hoe functioneren ze? Hoe bewegen de elektronen in het inwendige ervan? Bohr en zijn collega's draaiden al meer dan tien jaar om de hete brij van deze vragen heen. Tevergeefs.

Als een renaissanceschilder in zijn atelier had Bohr in Kopenhagen de briljantste jonge fysici om zich heen verzameld die hij kon vinden, om met hen de mysteries van het atoom te onderzoeken. Onder hen bevond zich ook de voortreffelijke

Wolfgang Pauli, zeer intelligent, arrogant, aanmatigend, vriend en studiegenoot van Heisenberg. Ondanks zijn arrogantie had Pauli zijn vriend Heisenberg bij Bohr aanbevolen, door hem te zeggen dat hij, als hij verder wilde komen, Heisenberg erbij moest halen. Bohr had daarmee ingestemd en in de herfst van 1924 had hij ook Heisenberg, assistent van de fysicus Max Born in Göttingen, uitgenodigd om naar Kopenhagen te komen. Heisenberg had daar enkele maanden doorgebracht en had met Bohr staan discussiëren voor schoolborden vol formules. De student en de meester hadden samen lange bergwandelingen gemaakt. Daarbij hadden ze gesproken over de mysteries van het atoom, over fysica en filosofie.<sup>2</sup>

Heisenberg had zich volledig op het probleem gestort. Het was voor hem een obsessie geworden. Net als de anderen had hij al van alles geprobeerd, maar niets werkte. Geen enkele redelijke kracht leek de elektronen langs Bohrs vreemde banen te leiden en tot zijn vreemde sprongen aan te zetten. En toch leidden die banen en sprongen tot goede voorspellingen van de atomaire verschijnselen. Verwarring alom.

Moedeloosheid zet aan tot het zoeken naar extreme oplossingen. In de eenzaamheid van dat Noordzee-eiland had Heisenberg besloten om radicale ideeën uit te proberen.

In wezen waren dat de radicale ideeën waarmee Einstein twintig jaar eerder de wereld versteld had doen staan. Het radicalisme van Einstein was effectief gebleken. Pauli en Heisenberg waren verliefd geraakt op zijn theorieën. Einstein was hun idool. Misschien, zo vroegen ze zich af, was het moment daar om een even radicale stap te wagen en daarmee uit de impasse te raken van de elektronen in de atomen? Als zij er nu eens in zouden slagen om zo'n stap te zetten? Als je twintig bent zijn je dromen onbegrensd.

## EERSTE DEEL I

Einstein had aangetoond dat de diepst gewortelde overtuigingen verkeerd kunnen zijn; dat wat vanzelfsprekend lijkt, onjuist kan zijn. Vanzelfsprekend lijkende aannames opgeven kan leiden tot een beter begrip. Hij had erop gewezen dat we ons alleen moeten baseren op wat we zien, niet op wat we denken dat móet bestaan.

Pauli had deze ideeën vaak tegenover Heisenberg herhaald. Beiden hadden ze zich gelaafd aan deze giftige honing. Ze hadden de discussies gevolgd die in het begin van de eeuw in de Oostenrijkse en Duitse filosofie werden gevoerd over de relatie tussen werkelijkheid en ervaring. Ernst Mach, die een beslissende invloed op Einstein had uitgeoefend, predikte de noodzaak om kennis alleen te baseren op waarnemingen en ontdeed zich van elke impliciete aanname van ‘metafysische’ aard. Dat zijn de verschillende ingrediënten in het denken van de jonge Heisenberg, om zo te zeggen de chemische componenten van een explosief mengsel, wanneer hij zich in de zomer van 1925 terugtrekt op het eiland Helgoland.

En daar kreeg hij een idee. Het soort idee dat alleen kan ontspruiten in het brein van een grenzeloos radicale twintiger. Een idee dat ertoe was voorbestemd om de hele fysica overhoop te halen, de hele wetenschap, ons hele denken over de wereld. Een idee dat de mensheid volgens mij nog steeds niet goed heeft verwerkt.

*ħħ*

De gedachtesprong van Heisenberg is even eenvoudig als gedurfd. Slaagde niemand erin om de kracht te vinden die het bizarre gedrag van de elektronen stuurde? Goed, laten we dan afzien van een nieuwe kracht. Laten we liever de kracht gebruiken die we al kennen: de elektrische kracht die het elektron naar de

kern trekt. Kunnen we geen nieuwe bewegingswetten vinden die de Bohrse banen en sprongen verklaren? Goed, laten we de bewegingswetten die we al kennen dan behouden en deze niet veranderen.

Laten we in plaats daarvan anders over het elektron nadenken. Laten we afzien van het idee dat een elektron een object is dat langs een baan beweegt. Laten we afzien van de beschrijving van de beweging van het elektron. Laten we alleen beschrijven wat we *van buitenaf observeren*: de intensiteit en frequentie van het door het elektron uitgezonden licht. Laten we alles alleen baseren op grootheden die *waarneembaar* zijn, de *observabelen*. Dat is het idee.

Heisenberg probeert het gedrag van het elektron opnieuw te berekenen door uitsluitend gebruik te maken van grootheden die we waarnemen: de frequentie en de sterkte van het uitgezonden licht. Daarvan uitgaande wil hij de energie van het elektron opnieuw berekenen.

Wij nemen de effecten waar van de elektronensprong van de ene Bohrse baan naar de andere. Heisenberg vervangt de fysische variabelen door *tabellen*, oftewel *getallenmatrices*, waarin de rijen de baan van vertrek weergeven en de kolommen de baan van aankomst. Elk hokje in de matrix, dat op een bepaalde rij en een bepaalde kolom ligt, beschrijft de sprong van een bepaalde baan naar een bepaalde andere baan. Hij brengt zijn tijd op het eiland door met pogingen om die matrices te gebruiken voor berekeningen die de regels van Bohr verklaren. Hij slaapt heel weinig. Het lukt hem niet om de berekeningen voor een elektron in een atoom kloppend te krijgen, ze zijn te ingewikkeld. Dan probeert hij het voor een eenvoudiger systeem: een slinger. Hij probeert de regels van Bohr voor dit vereenvoudigde geval door te rekenen.