

## Niemand begrijpt de quantummechanica

### Maar iedereen kan die toepassen

**We moeten aanvaarden dat de fysische werkelijkheid is zoals zij is. Als we een logisch consistente theorie hebben die werkt, dan moeten we het daarmee doen, ook als zij bizarre trekken vertoont en strijdt met onze intuïtie.**

De quantumtheorie, ook wel quantummechanica genoemd, is een centraal onderdeel van de moderne natuurkunde. Samen met de relativiteitstheorie heeft zij gezorgd voor grote omwentelingen in ons wereldbeeld. In die zin is de rol van deze natuurkundige theorieën vergelijkbaar met die van Darwins evolutietheorie voor de biologie. Hun wiskundige structuur maakt echter dat ze voor buitenstaanders moeilijk te begrijpen zijn. Ook populariserende beschrijvingen, zonder het formele kader, maken het de lezer lang niet altijd gemakkelijker.

De basis voor de quantumtheorie werd gelegd in de eerste decennia van de twintigste eeuw, aanvankelijk vooral om de eigenschappen en de bouw van atomen te verklaren. Het gedrag van atomen bij niet te hoge energie wordt bepaald door hun buitenkant, die bestaat uit een wolk van elektronen. Deze wolk wordt vastgehouden door elektrische krachten rondom de atoomkern, waarin het overgrote deel van de massa van het atoom is geconcentreerd.

Eigenschappen van materialen worden bepaald door de elektronenstructuur van de atomen. Zo kunnen we antwoord geven op vragen als: Waarom is het gras groen? Waarom is de lucht blauw? Hoe komt het dat metalen geleidend zijn? Chemische reacties tussen atomen spelen zich geheel af als elektromagnetische wisselwerkingen tussen de elektronenwolken. De kernen van de atomen blijven daarbij onveranderd. De bouw van de atoomkern wordt bepaald door sterkere krachten, zodat een grotere energie nodig is om die open te breken. Maar ook voor de beschrijving van de kerndeeltjes (protonen, neutronen en hun onderliggende structuur) is de quantumtheorie noodzakelijk, zij het in een meer geavanceerde vorm.

'ALS WE EEN LOGISCH CONSISTENTE THEORIE HEBBEN DIE WERKT, DAN MOETEN WE HET DAARMEE DOEN, OOK ALS ZIJ BIZARRE TREKKEN VERTOONT EN STRIJDT MET ONZE INTUÏTIE.'

De quantumtheorie is de basistheorie geworden voor de eigenschappen en het gedrag van materie en straling op atomaire schaal. Haar geldigheid is op zeer uiteenlopende gebieden overtuigend aangetoond. Wel heeft de theorie een aantal vreemde trekken die hebben gezorgd voor ingrijpende veranderingen in het fysische wereldbeeld. Deze blijken ook tot de verbeelding van niet-fysici te spreken. Zo heeft iedereen wel gehoord van deeltjes die een golfkarakter vertonen, of waarvan de plaats en snelheid niet beide volledig bepaald zijn. Daaruit kunnen paradoxen worden geconstrueerd, die als tegenstrijdigheden kunnen worden gepresenteerd. En uitgaande van tegenstrijdige uitspraken kan alles bewezen worden.

De basis van de quantumtheorie blijkt echter minder gemakkelijk te begrijpen dan Darwins evolutietheorie. Een heldere uiteenzetting voor niet-fysici van de quantummechanica en haar gevolgen is dan ook nuttig. Hoewel daarvan vele voorbeelden zijn te vinden, vergen deze boeken vaak een behoorlijke inspanning van de niet-ingevoerde lezer. Bovendien bieden ze vaak meer dan de gemiddelde lezer misschien wil weten.

Een nieuwe aanwinst op de markt is het boek *Quantum Leaps* van de Amerikaanse fysicus Jeremy Bernstein. In de jaren vijftig werkte Bernstein een periode aan het Institute of Advanced Studies in Princeton en vervolgens lange tijd als *staff writer* voor het tijdschrift *The New Yorker*. *Quantum Leaps* is een persoonlijk en anekdotisch relaas over ontmoetingen en ervaringen met beroemde personen uit vele culturen. De tekst is gelardeerd met verrassend leesbare en heldere uiteenzettingen over wat er nu zo vreemd is aan de quantummechanica. Opmerkelijk is voorts de terloopse manier waarop de lezer allerlei wederwaardigheden van beroemde spelers in het veld te weten komt.

Bernstein begint met uit te leggen dat de quantummechanica meetuitkomsten niet met zekerheid voorspelt, maar als een kansverdeling. Aanvankelijk discussieerden vakgenoten heftig over de juiste interpretatie van dit kansbegrip. Tussen de jaren veertig en zestig van de vorige eeuw meenden de meeste natuurkundigen dat die discussie met de beroemde briefwisseling tussen Niels Bohr en Albert Einstein definitief was beslecht, en wel in het voordeel van Bohr. Einstein meende dat het waarschijnlijkheidskarakter van de quantummechanica duidde op een onderliggende, meer fundamentele theorie. 'God dobbelt niet' ('*Jedenfalls bin ich überzeugt davon daß der Alte nicht würfelt*'), schreef hij al in 1926 aan Max Born.

Bohr daarentegen meende dat de quantummechanische onbepaaldheid fundamenteel was. In de inleiding van zijn boek beschrijft Bernstein hoe een jonge collega in 1957 op het instituut in Princeton een voordracht gaf over de interpretatie van de quantummechanica. Robert Oppenheimer, die tijdens de

Tweede Wereldoorlog leiding had gegeven aan het Manhattanproject voor de productie van de eerste atoombom, was directeur van het instituut. Nadat de spreker vijf zinnen had uitgesproken, onderbrak Oppenheimer hem met de opmerking dat Bohr het hele probleem al in de jaren dertig had behandeld en dat daar niets meer aan toe te voegen was. Daarmee was de bijeenkomst beëindigd. Maar al snel bleek de discussie over de interpretatie van de quantummechanica opnieuw tot leven te komen, wat inmiddels tot nieuwe inzichten en toepassingen heeft geleid.

‘ALS TWEE IDENTIEKE SYSTEMEN IN IDENTIEKE TOESTANDEN WORDEN GEBRACHT, WAARBIJ MET IDENTIEKE APPARATUUR EEN METING WORDT VERRICHT, KAN DAT TOT VERSCHILLENDE MEETUITKOMSTEN LEIDEN.’

De wetten van de natuurkunde voorafgaand aan de quantummechanica zijn deterministisch van aard: bij een gegeven begintoestand van een stelsel van wisselwerkende objecten ligt hun toekomstige gedrag vast. In de quantummechanica is die vastheid vervangen door een kansbegrip. Als twee identieke systemen in identieke toestanden worden gebracht, waarbij met identieke apparatuur een meting wordt verricht, kan dat tot verschillende meetuitkomsten leiden. Bij een meting verandert de toestand van het systeem, waarbij de kansverdeling over mogelijke uitkomsten overgaat in zekerheid.

Voor het verschil in meetuitkomst geeft de theorie geen oorzaak. Sommige grondleggers van de quantummechanica, zoals Erwin Schrödinger en Einstein, probeerden de verschillen toe te schrijven aan verborgen eigenschappen van het systeem, verborgen parameters die niet door de quantummechanica worden beschreven. Op de vraag naar de oorzaak van de verschillen in meetuitkomsten aan identieke systemen gaven zij het wijze antwoord: iets wat we niet kennen. Zij gingen er als vanzelfsprekend van uit dat het resultaat van een meting een eigenschap weergeeft die het systeem al vóór de meting had. Deze opvatting wordt aangeduid als realisme. Een onvermijdelijke consequentie van de realistische interpretatie is dat de quantummechanica onvolledig is. De verborgen parameters komen immers in de theorie niet voor.

Daartegenover stelden Bohr en Werner Heisenberg een visie die erop neerkwam dat op dezelfde vraag naar de oorzaak van de verschillen in meetuitkomsten het radicale antwoord luidde: niets. Dit antwoord is ingrijpender dan op het eerste gezicht lijkt. De consequentie is namelijk dat de verschillen in meetuitkomsten aan identieke systemen geen oorzaak hebben, en dat de uitkomst van een meting pas in de meting zelf ontstaat. Je kunt dan niet meer volhouden dat een meting een eigenschap laat zien die het systeem ook vóór de meting al had. Er waren immers vóór de meting geen verborgen verschillen tussen de twee identieke systemen.

Deze visie, die inmiddels de meest gebruikelijke is geworden, wordt, naar de plaats van het instituut van Bohr, ook wel aangeduid als de Kopenhagen-interpretatie, een naam die haar aanhangers liefst vermijden: zij zien dit eenvoudig als de enige juiste interpretatie. De kansverdeling voor meetuitkomsten is in deze visie niet gebaseerd op onzekerheid of op een gebrek aan kennis. De kansen weerspiegelen een fundamentele onbepaaldheid, alsof het systeem zelf ook niet weet in welke toestand het verkeert. Er is alleen maar de kansverdeling, zoals de uitkomsten van een paardenrace zonder paarden, of een casino zonder roulette.

Nog vreemder is de consequentie voor een systeem dat bestaat uit twee delen die zich ver van elkaar bevinden. Samen met Boris Podolsky en Nathan Rosen liet Einstein in 1935 in een beroemd artikel zien dat er quantumtoestanden (*verstrengelde toestanden*) bestaan van twee subsystemen, zodanig dat een van de deelsystemen in verschillende, niet-compatibele toestanden terecht kan komen, afhankelijk van het soort meting dat aan het andere subsysteem wordt verricht. En dat terwijl het eerste deelsysteem geen enkel contact met het meetapparaat heeft gehad. Omdat de systemen ver uit elkaar kunnen liggen, is het volgens Einstein onmogelijk dat de meting iets verandert aan dat eerste deelsysteem. Hier gebruikt hij een lokaliteitsargument. In Einsteins realistische visie houdt dit in dat de verschillende toestanden van het andere deelsysteem er ook vóór de meting al moeten zijn geweest, terwijl de quantummechanica die niet beschrijft. De logische conclusie is dan dat de quantummechanica onvolledig is.

‘UIT EINSTEINS REALISTISCHE INTERPRETATIE VOLGT DE CONCLUSIE DAT DE QUANTUMMECHANICA ONVOLLEDIG IS.’

Een ander gevolg van het waarschijnlijkheidskarakter van de quantummechanica is dat deeltjes golfverschijnselen vertonen. Een steen die in het water valt, veroorzaakt een cirkelvormige golf, die zich naar buiten toe voortplant. Elk punt van het wateroppervlak golft ruwweg met dezelfde uitslag. Het golfverschijnsel dat optreedt als verschillende golven over elkaar heen lopen, heet interferentie. Daarbij ontstaan punten waar de golven elkaar versterken en waar ze elkaar juist uitdoven. Als we licht laten vallen door twee spleten in een scherm ziet een camera achter het scherm lijnen waar het licht viermaal zo helder is als bij een enkele spleet, met daartussenin lijnen waar het donker blijft.

Dit experiment werd voor het eerst uitgevoerd door de Brit Thomas Young, aan het begin van de negentiende eeuw. Daarmee werd de vraag naar de aard van licht ondubbelzinnig beantwoord: licht is een golfverschijnsel en bestaat niet, zoals Newton meende, uit een stroom van deeltjes. Inmiddels is deze conclusie echter te simpel gebleken. Het blijkt dat ook elektronen (en andere deeltjes) hetzelfde

interferentieverschijnsel kunnen vertonen, terwijl elektronen een evident deeltjeskarakter hebben: ze zijn ondeelbaar en vertonen zich gelokaliseerd, op één plaats tegelijk.

Als één elektron door het scherm met de twee spleten wordt gestuurd, ontstaat een enkel zwart puntje op een gevoelige plaat achter het scherm. Als vervolgens, één voor één, een groot aantal elektronen door de spleten wordt gestuurd, combineren de zwarte punten van alle elektronen zich uiteindelijk samen tot het lijnenpatroon. Dit patroon treedt alleen op als beide spleten open zijn. Maar hoe kan een elektron dat door een spleet gaat, weten of de andere spleet open is of niet? Moeten we dan zeggen dat een enkel elektron door beide spleten loopt? Dat is niet voor te stellen voor een gelokaliseerd deeltje. Het blijkt ook niet het geval te zijn. Als we een methode vinden om waar te nemen door welke spleet het elektron passeert, vertoont het zich steeds ofwel bij de ene, ofwel bij de andere spleet. Bovendien blijkt er dan geen interferentie op te treden. Als we het experiment uitvoeren eerst met alleen de ene spleet open, dan met alleen de andere open, is er geen interferentiepatroon maar zien we alleen twee overlappende zwarte plekken, elk afkomstig van één van beide spleten. Ook dan blijkt het interferentiepatroon verdwenen.

Er is dus alleen interferentie als voor elk elektron zowel de weg door de ene als de weg door de andere spleet openstaat, en als niet wordt gemeten welke weg het elektron kiest. Er is interferentie tussen de beide mogelijke wegen die het elektron had kunnen kiezen, terwijl bij waarneming blijkt dat elk elektron slechts één van de mogelijkheden kiest. Als het experiment wordt gedaan met beide spleten open, is er geen antwoord op de vraag door welke spleet een elektron is gegaan. Zelfs de uitspraak dat het ofwel door de ene, ofwel door de andere spleet is gegaan, is onhoudbaar. Hoe het elektron zich gedraagt, als een golf met interferentie of als een lokaliseerbaar deeltje, hangt af van het gekozen experiment. De meting, de waarneming, krijgt een centrale rol in de theorie. De vraag wat er gebeurt als er geen waarneming wordt gedaan, wordt dan zinloos.

‘CONSEQUENTIE VAN DE KOPENHAGEN-INTERPRETATIE IS DAT DE VERSCHILLEN IN MEETUITKOMSTEN AAN IDENTIEKE SYSTEMEN GEEN OORZAAK HEBBEN.’

Het is karakteristiek voor de quantummechanica dat er geen antwoord mogelijk is op voor de hand liggende vragen zolang er geen experiment wordt uitgevoerd om het antwoord door waarneming te bepalen. Wat niet wordt waargenomen, blijft wezenlijk onbepaald. De klassieke voorstelling dat een fysisch systeem objectieve eigenschappen heeft die door waarneming worden bepaald, is onhoudbaar. De eigenschappen van het systeem ontstaan pas in en door de waarneming.

Een alternatief voor de Kopenhagen-interpretatie van de golf-deeltjedualiteit in de quantummechanica werd in 1952 uitgewerkt door de Amerikaanse natuurkundige David Bohm. Zijn beeld is volledig deterministisch, in termen van klassieke paden van deeltjes. De paden worden gestuurd door een golf. De onvermijdelijke prijs die hiervoor betaald wordt, is verlies van lokaliteit: de golf die het pad van een deeltje stuurt, wordt op zijn beurt bepaald door de plaatsen waar elk ander deeltje zich op datzelfde moment bevindt. Het is een ingewikkelde manier om de resultaten van de quantummechanica te reproduceren met een geheel andere interpretatie. In toepassingen van de quantummechanica in de gewone natuurkunde heeft Bohms beschrijving vrijwel geen ingang gevonden.

Bernstein meldt dat Bohm promoveerde bij Oppenheimer. Voor de oorlog was Bohm betrokken geraakt bij een jongerenorganisatie met communistische sympathieën, wat hem gedurende de McCarthy-hysterie kwam te staan op een verhoor door het *House Un-American Activities Committee*, en tot zijn ontslag in Princeton. Bohm week uit naar Brazilië, na een suggestie van Oppenheimer, die vergelijkbare ervaringen had gehad maar niettemin zelf in de Verenigde Staten was gebleven. Na enige tijd nam het Amerikaanse consulaat in Brazilië Bohms paspoort in, met de mededeling dat hij het alleen in de Verenigde Staten kon terugvragen. Bohm verkoos toen de Braziliaanse nationaliteit; pas dertig jaar later herkreeg hij het Amerikaanse burgerschap. Hij was inmiddels wereldberoemd.

‘ER IS ALLEEN MAAR DE KANSVERDELING, ZOALS DE UITKOMSTEN VAN EEN PAARDENRACE ZONDER PAARDEN, OF EEN CASINO ZONDER ROULETTE.’

Het standpunt van Oppenheimer over de afgesloten quantumdiscussie is onjuist gebleken. De mogelijkheid van nieuwe experimenten met enkele atomen en moleculen heeft de discussie nieuw leven ingeblazen. In Bernsteins visie is dit vooral te danken aan de Ierse fysicus John Bell. Deze wilde nagaan of de voorspellingen van de quantummechanica in termen van kansen gereproduceerd kunnen worden met realistische verborgen variabelen en met alleen lokale wisselwerkingen. Bell toonde ondubbelzinnig aan dat er simpele quantumsystemen zijn die in eenvoudige toestanden kunnen worden geprepareerd, zodanig dat de quantummechanica correlaties voorspelt die in strijd zijn met de gecombineerde aanname van realisme en lokaliteit. Daarmee werd de schending van deze gecombineerde aanname kwantitatief gemaakt en toegankelijk voor experimenten.

Inmiddels is bij herhaling gebleken dat ook in deze bijzondere situaties de quantummechanica inderdaad geldt. Daarmee is de mogelijkheid vervallen om, zoals Einstein wilde, vast te houden aan zowel lokaliteit als realisme. Wie wil vasthouden aan het realisme, dus aan de opvatting dat in een meting een al tevoren bestaande eigenschap van het systeem wordt bepaald, moet aanvaarden dat een meting op één plaats onmiddellijke gevolgen kan hebben op willekeurige grote afstand. Maar juist dat is in strijd met de

relativiteitstheorie, en daarmee zeker voor Einstein onverteerbaar.

Het opmerkelijke is dat bij dit alles de juistheid van de quantummechanica niet in het geding is. Er bestaat geen verschil van mening over de vraag hoe de theorie moet worden gehanteerd om verschijnselen te beschrijven en de uitkomst van experimenten te voorspellen, zij het met een statistisch karakter. In die zin heeft de quantummechanica geen interpretatie nodig. Het is alleen steeds duidelijker geworden dat het om een vreemde theorie gaat, die voor de hand liggende vragen oproept waarop geen antwoord bestaat en met resultaten die tegen onze intuïtie ingaan. Vragen over de betekenis van meetuitkomsten en over het achterliggende mechanisme dat die uitkomsten veroorzaakt, worden nog steeds verschillend beantwoord.

Bernstein vertelt dat Bell zijn werk aan verborgen variabelen verrichtte tijdens een *sabbatical* in Stanford, aangezien dit onderwerp niet paste binnen zijn vaste betrekking bij de European Organization for Nuclear Research (CERN) in Genève. Het zou voor de hand hebben gelegen dit werk te publiceren in een vooraanstaand Amerikaans tijdschrift, zoals de *Physical Review*. Maar dat vroeg betaling door auteurs, waarmee Bell zijn gastheren van Stanford niet wilde belasten. Daarom koos hij voor het juist opgerichte tijdschrift *Physics*, waar auteurs voor hun bijdrage betaald werden. Het artikel verscheen in 1965 in het eerste nummer. Al gauw daarna ging het tijdschrift failliet. Het artikel zou pas vijf jaar later opgemerkt worden. Volgens de nu gangbare kwaliteitscriteria van wetenschappelijk werk (citatie-index, impactfactor van het tijdschrift) zou dit artikel dus extreem laag scoren. Uiteindelijk werd het een van de meest geciteerde en meest herdrukte artikelen, verschenen in een van de minst toegankelijke tijdschriften. Op het moment dat Bell in oktober 1990 overleed, stond hij genomineerd voor de Nobelprijs voor natuurkunde.

‘WAT NIET WORDT WAARGENOMEN, BLIJFT WEZENLIJK ONBEPAALD.’

Andere figuren over wie we interessante en verrassende persoonlijke details te weten komen, zijn de Belgische fysicus Léon Rosenfeld, de Nederlandse Einstein-biograaf Abraham Pais en de natuurkundige en filosoof Carl Friedrich von Weizsäcker (broer van de Bondsprezident). Ook ter sprake komt literair werk waarin de quantumtheorie een rol speelt, van schrijvers als Rebecca Goldstein en Michel Houellebecq. Interessant en niet algemeen bekend is wat Bernstein vertelt over zijn ervaringen met leerboeken over de quantummechanica van auteurs uit de Sovjet-Unie. Daarin werden technische verhandelingen soms afgewisseld met paragrafen die een relatie legden met het dialectisch materialisme. De positie die Sovjetfysici innamen bij hun interpretatie van de quantummechanica bleek een kwestie van leven of dood te kunnen worden. De Kopenhagen-interpretatie kon opgevat worden als een schoolvoorbeeld van veilige dialectiek, maar een verzwakking van de objectiviteit van de waarneming kon ook weer als riskant idealistisch worden gezien.

Voor wie het realisme van Einstein, Schrödinger en Bohm niet wil opgeven, is de quantummechanica een niet-lokale theorie: de delen van een systeem zijn niet los van elkaar te zien, ongeacht hun afstand. Dat suggereert een holistisch beeld van de wereld: een dankbaar aangrijpingspunt voor wie zich laat inspireren door oosterse filosofie. Deze gedachte werd al in de jaren zeventig verspreid door suggestieve bestsellers van schrijvers als Fritjof Capra en Gary Zukav. Ook Bell werd benaderd door aanhangers van oosterse mystiek. Een aardig voorval waarover Bernstein vertelt, is een conferentie in 1979 te Zwitserland, belegd door Maharishi Mahesh Yogi, als fysicus opgeleid in Allahabad, India, en later leraar in transcendent meditatie. Daarbij past geen bescheidenheid. De conferentie vond plaats in een *Center of World Government*. Een van de sprekers was een fysicus, tegelijk medewerker van het bijbehorende ministerie van Gezondheid en Onsterfelijkheid. Bell was een van de genodigden. Het werd hem al te dol toen de genoemde fysicus een analogie zag tussen supergeleiding en de toestand die mensen door meditatie bereiken.

Aanzienlijk positiever is Bell over zijn ontmoetingen met de Dalai Lama, die zich werkelijk inspande om zich de grondideeën van de quantumtheorie eigen te maken, zonder die ondergeschikt te maken aan hogere doelen. De Dalai Lama had bij een bezoek aan CERN in 1979 besloten om de quantumtheorie te bestuderen, waarbij hij Bohm en Von Weizsäcker als tutoren vroeg. In 2005 publiceerde de Dalai Lama een boekje over de relatie tussen natuurwetenschap en spiritualiteit, waarin hij benadrukte dat de wetenschap zich niet ondergeschikt moet maken aan religies, zoals het boeddhisme, zolang het gaat om feitelijkheden. Andere spirituele stromingen zijn minder terughoudend. Op een website over sjamanisme wordt onder verwijzing naar de Bohr-Einsteindiscussie en naar het theorema van Bell geconcludeerd dat het sjamanisme nu een duidelijke basis heeft in de moderne natuurkunde. Immers: *Shamans can effect change in local reality through spirit helpers working at the quantum level*.

Voor wie zonder grote inspanning wil begrijpen wat er vreemd is aan de quantummechanica is *Quantum Leaps* zeer aan te bevelen. Bernstein schrijft trefzeker en vermijdt elke vorm van oeverloosheid. Maar ook voor fysici is het boek de moeite waard. Terloops krijgt de lezer verrassende inzichten in de belevissen van en de relaties tussen bekende fysici en andere beroemdheden, die niet gemakkelijk in de biografische literatuur te vinden zullen zijn. Daarmee geeft *Quantum Leaps* een goede fundering van Feynmans uitspraak waarmee dit artikel begon.