

Inleiding

Machiel Keestra

‘Das Einfache ist erst jetzt,’ schrijft de filosoof Hegel. Daarmee verwijst hij naar de ervaring die iedereen wel heeft – zonder zich daarover nog te verbazen – dat wij begrippen hanteren of verschijnselen herkennen en doorzien die honderden jaren geleden nog leidden tot verbazing, bijgeloof, angst of verregaande speculatie. Inmiddels behoort allerhande kennis tot ons gemeengoed, waardoor wij als vanzelf begrippen en verschijnselen plaatsen in een kader dat ze verheldert of verklaart. De complexiteit van dit soort kaders valt ons niet meer op. De eenvoud van een bepaald begrip of verschijnsel geldt dan ook nú pas, nadat het complexe kader is ontwikkeld en gemeengoed is geworden.

De wordingsgeschiedenis van onze inzichten is echter vrijwel nooit eenvoudig, omdat de ontwikkeling van de menselijke beschaving en cultuur steeds gepaard gaat met onderling strijdige bewegingen. Of het nu gaat om politieke richtingen, religieuze inzichten, artistieke stromingen of bijvoorbeeld wetenschappelijke veronderstellingen: meestal zal na verloop van tijd een bepaalde opvatting de overhand nemen en proberen de andere opvattingen te ontcrachten dan wel te integreren. Zo domineert steeds een bepaald begrip, waarvan de ogenschijnlijke eenvoudigheid de voorafgaande strijd lijkt te verhullen, die dan ook snel wordt ver-

geten. Pas wanneer zo'n begrip geconfronteerd wordt met empirische gegevens die ermee in strijd zijn of wanneer bij nader inzien de opvatting leidt tot inconsistenties binnen een bepaald domein van kennis of op gespannen voet staat met opvattingen uit andere domeinen (bijvoorbeeld de godsdienst), zal de eenvoud moeten worden opgegeven. Dan ligt er natuurlijk niet onmiddellijk een nieuw begrip klaar dat het werk van de voorganger kan overnemen en bovendien ook nog de recent ontstane problemen op kan lossen. Wanneer na verloop van tijd wel een waardige opvolger richtinggevend is geworden, zullen de achterliggende problemen meestal weer vergeten worden en de eenvoud en elegantie van de opvolger geprezen worden. Pas wanneer er weer nieuwe moeilijkheden ontstaan, zullen soms de oude moeilijkheden opgerakeld worden, waarbij de oude begrippen soms ook hulp kunnen bieden.

Zo'n ontwikkelingsgeschiedenis kan men proberen te geven voor het begrip van wetenschap, als ook voor begrippen als materie, kracht, eigenschap, functie, enzovoort. Dan zal regelmatig blijken dat bijvoorbeeld ideeën uit de filosofie hebben bijgedragen aan het wetenschapsbegrip of dat theologische concepten de weg voor een modern krachtbegrip mede hebben vormgegeven.

1 Revoluties in de wetenschap: beweging

Ongeacht deze complexiteit van begripsontwikkelingen zullen de beschouwingen in dit boek vooral gericht zijn op ontwikkelingen binnen de natuurwetenschap. In dat verband wordt nog steeds veel gebruik gemaakt van de opvattingen van de wetenschapshistoricus Thomas Kuhn over wetenschappelijke revoluties. In zijn boek over *De structuur van wetenschappelijke revoluties* (1962) beschrijft hij hoe een dominante wetenschappelijke opvatting na verloop van tijd en na nieuw onderzoek steeds meer empirische verschijnselen niet meer kan verklaren. Binnen de gemeenschap van wetenschapsbeoefenaren zullen de meesten proberen om zo lang mogelijk vast te houden aan de dominante theorie, en met behulp van provisorische toevoegingen de lacunes op te vullen.

Toch is er meestal een aantal wetenschappers dat gelooft dat er echt een nieuwe theorie nodig is om de problemen het hoofd te bieden. In zo'n fase worden nieuwe verklaringsmodellen geformuleerd, waarmee men die fenomenen wel probeert te verklaren. Het oude en het nieuwe model verschillen op verregaande wijze, niet alleen in hun uitkomsten maar ook in hun vooronderstellingen en vereiste testprocedures. De 'incommensurabiliteit' van de modellen dwingt een wetenschappelijke gemeenschap ertoe om na verloop van tijd te kiezen voor het ene of het andere model. Vandaar dat Kuhn zo'n overgang een wetenschappelijke revolutie durft te noemen. Hij noemt dit soort bijzondere episodes de 'traditie-verpletterende complementen van de traditie-gebonden activiteiten van de normale wetenschap' (*Structuur*, [1962] Boom 1972, p. 23).

In deze beschrijving is het functioneren van een wetenschappelijke gemeenschap van wezenlijk belang. Zo'n gemeenschap wordt gekenmerkt door algemeen gerespecteerde normen, prestaties, experimentele procedures, probleemstellingen, instrumenten, tijdschriften, enzovoort. In zo'n gemeenschap heerst een bepaald 'paradigma': een geheel van overtuigingen en waarden dat het denken en doen van de gemeenschap bepaalt. Pas tegen zo'n veelomvattende achtergrond kunnen afwijkingen of inconsistenties opvallen en leiden tot verbetering of vernieuwing.

Dit beeld van de wetenschapsgeschiedenis wordt vaak scherp afgezet tegen de opvatting dat wetenschap op een gestage manier tot een groei van kennis leidt. Die laatste opvatting zou bovendien impliceren dat het niet nodig is om de geschiedenis van die kennisgroei te kennen. Dit soort opvattingen wordt vaak toegeschreven aan de wetenschapsfilosoof Popper, die veel heeft geschreven over de werkwijze van onderzoekers. Zijn ideeën over ontwikkeling en geschiedenis wijken misschien toch minder af van het boven beschrevene dan men zou verwachten:

Er is veel minder groei van kennis in de wetenschap dan dat er sprake is van revolutionaire verandering van wetenschappelijke theorieën. Dit is een merkwaardig en zeer interessant punt, omdat men op het eerste gezicht zou denken dat voor de ge-

14 *Doorbraken in de natuurkunde*

stage groei [accumulative growth] van kennis de traditie zeer belangrijk zou zijn en dat voor de revolutionaire manier van ontwikkeling de traditie minder belangrijk zou zijn. Maar het is precies omgekeerd. (*Conjectures and refutations*, Routledge 1969, p. 129)

Dat er in de geschiedenis van de natuurwetenschap dus waarachtige doorbraken hebben plaatsgevonden, lijkt niet erg omstrede. En hoezeer sommige wetenschapshistorici juist ook wijzen op continuïteit in de wetenschapsgeschiedenis, toch blijkt 'wetenschappelijke revolutie' nog steeds een nuttig begrip te zijn. Ook door de bovengenoemde auteurs wordt de zeventiende-eeuwse Wetenschappelijke Revolutie gebruikt als een belangrijk voorbeeld. Zoals het begrip al suggereert, gaat het hierbij niet zomaar om een wetenschappelijke doorbraak, maar veeleer om een zodanige verandering van het wereldbeeld dat na deze periode pas kan worden gesproken van wetenschap in de moderne zin van het woord.

Bij deze omwenteling speelde Galilei een hoofdrol. Hij heeft allerlei traditionele visies op de aard van de werkelijkheid omvergeworpen, zoals de tegenstellingen tussen zware en lichte voorwerpen, tussen natuurlijke en gedwongen beweging en tussen aardse en hemelse processen. Voor al deze vanouds onderscheiden domeinen postuleerde Galilei juist dat ze onderhevig waren aan dezelfde natuurwetmatigheden. Met zijn bewegingsleer heeft Galilei de meeste invloed uitgeoefend. Dat alle voorwerpen een zwaarte hebben en dat hun beweging niet te maken heeft met hun wezen, vormde al een nieuw gezichtspunt. Bovendien bleek hij met zijn valwet en traagheidswet verschillende aspecten van beweging en versnelling correct wiskundig te kunnen beschrijven.

Van Lunteren beschrijft echter duidelijk hoezeer Galilei zich toch niet volkomen bevrijd had van het traditionele wereldbeeld. Zo duurde het lang voordat hij Copernicus' visie op het zonnestelsel omarmde, omdat hij tot dan toe met de oude (ptolemaïsche) visie nog uit de voeten kon. Vanwege zijn werk aan de getijdenbeweging kwam hij er pas na enige tijd toe om Coperni-

cus' visie over te nemen – niet eens zozeer vanwege de astronomische strekking ervan. En hoewel Galilei meende dat de wiskunde de code was waarmee 'het boek van de natuur' ontcijferd kon worden, beschreef hij de wereld nog niet als een abstract geometrisch universum, zoals dat later in de natuurwetenschap zou gebeuren. Ook aan zijn zeer invloedrijke begrip van beweging kleefde toch nog een belangrijk traditioneel aspect, namelijk dat de kracht van de beweging in het bewegend object zelf huist.

2 Rivaliserende visies: licht

Als er één onderwerp is dat ons in staat stelt om te zien hoe twee rivaliserende theorieën hun eigen verdiensten en beperkingen hebben en hoezeer in de loop van de tijd dan weer de ene, dan weer de andere en vogue is, dan is het wel het licht. In dit geval blijkt bovendien ook de complexe relatie tussen wetenschappelijke beschrijvingen of verklaringen en de verschijnselen waarop die betrekking hebben. Immers, sommige lichtverschijnselen lijken om een andere beschrijving te vragen dan andere lichtverschijnselen. Deze situatie blijft ons begrip tarten, en nog steeds zoekt men een oplossing met meer eenvoud.

Onder invloed van onder andere de filosoof Descartes overheerste een tijd lang het mechanistische beeld van de werkelijkheid. In dat beeld bestond ook licht uit een beweging van deeltjes. Dijksterhuis beschrijft hoe Huygens voor de oplossing van een raadselachtige lichtbreking aan dit idee van deeltjesbewegingen niet genoeg had. Hij combineerde het dan ook met een beeld van de voortplanting van lichtgolven in een 'etherzee' (het veronderstelde medium waardoor lichtgolven reisden). Nieuw aan de zo door Huygens gecreëerde optica was uiteindelijk het feit dat wiskundig construeren en mechanistisch denken samen werden gebruikt. Deze samenvoeging van precieze beschrijving en verklaring in een theorie was destijds ongebruikelijk.

Toch werd Huygens' visie op het functioneren van de natuurwetenschap niet direct omhelsd. De invloedrijke Newton verschilde met Huygens niet alleen van inzicht over de aard van

het licht; Newton had ook moeite met Huygens' opvatting van de voorlopige waarde van een hypothese. Newton meende namelijk dat in de natuurwetenschap moest worden gezocht naar absoluut zekere kennis, terwijl een hypothese niet de pretentie heeft zulke kennis te zijn. Aan de andere kant had Newton er geen moeite mee om de wiskundig beschreven zwaartekracht onverklaard te laten, terwijl Huygens daarmee weer geen genoegen nam.

Onder meer vanwege de grote invloed van Newton werd Huygens' golftheorie van het licht lange tijd veronachtzaamd. Pas rond 1800 werd de golftheorie van het licht weer gebruikt om verschijnselen te verklaren die met de deeltjestheorie onverklaarbaar bleven, zoals de interferentie van lichtstralen.

3 Uiteenlopende invloeden: zwaartekracht

Hoewel Newton bekend is als misschien wel de invloedrijkste en belangrijkste natuurwetenschapper aller tijden (op de voet gevolgd door Einstein, die ook in zijn eentje een belangrijke wending in de natuurkunde inleidde), hield hij zich slechts in beperkte mate bezig met natuurwetenschap in de huidige betekenis van het woord. Zijn overige interesses hadden wel invloed op zijn natuurwetenschappelijke werk. De Pater formuleert het zelfs als volgt: 'Zonder alchemie en theologie geen gravitatie-theorie.' Ons mag dat verbazen, maar het wordt misschien begrijpelijker als we stilstaan bij de conceptuele moeilijkheid waar Newton mee worstelde.

Zwaartekracht werd door sommigen opgevat als een wezenlijke eigenschap van lichamen, maar voor Newton was de zwaartekracht een onmiddellijke kracht die tussen lichamen onderling optreedt. Hij bleek in staat om een wiskundige formule voor deze kracht op te stellen die ook bepaalde planeetbewegingen correct beschreef. Een mechanistische (deeltjes-)verklaring van de zwaartekracht kon Newton echter niet geven, en Descartes' beeld van een kosmos waarin een 'hemelmaterie' de oorzaak is van de krachten die lichamen op elkaar uitoefenen vond hij niet acceptabel. Het resultaat was dat hij in feite een *actio in distans* aan-

nam, een werking op afstand: van oudsher iets dat werd toegeschreven aan God. Dit leverde hem veel kritiek op. Inderdaad schrok Newton er niet voor terug om theologische noties te gebruiken. In zijn *Principia* noemt hij God zelfs uitdrukkelijk bij de onderwerpen voor de natuurkunde. Immers, middels de natuurkunde kunnen we ook de krachten waarmee God actief is in de natuur leren kennen. Naast de zwaartekracht onderzocht hij zo ook magnetisme, elektriciteit en warmte.

Newtons keuze om een kracht wiskundig te beschrijven zonder een (mechanistische) verklaring ervan te kunnen geven is in zekere zin maatgevend geweest voor veel latere natuurwetenschappers. Zijn *Principia* uit 1687 hebben dan ook niet alleen grote invloed uitgeoefend vanwege de zwaartekrachtstheorie of de gehele daarin geformuleerde mechanica. De manier van werken en denken die Newton in het boek beschrijft, heeft de moderne natuurwetenschap richting gegeven. Het gaat daarbij vooral om de voorgeschreven relatie tussen empirische waarnemingen en mathematische beschrijvingen.

Helaas heeft de grote invloed van Newton ook nadelige bijwerkingen gehad. Zo bleek zijn begrip van een rechtlijnige krachtsuitoefening belemmerend te werken op de ontwikkeling van het inzicht in elektromagnetische krachten: deze werken loodrecht op de volgens Newtons werk verwachte richting. Pas met de ontwikkeling van een veldbegrip konden sommige elektromagnetische effecten worden verklaard.

4 Eenheid van natuurkrachten: elektromagnetisme

Bij de ontwikkeling van de theorie die uiteindelijk elektrische en magnetische verschijnselen zou kunnen beschrijven waren eveneens niet uitsluitend natuurwetenschappelijke opvattingen van belang.

Over Faraday schrijft Snelders bijvoorbeeld hoe diens religieuze overtuiging invloed had op zijn werk als onderzoeker. Net zoals de bijbel zonder extra uitleg gelezen moest worden, zo heeft Faraday ook experimenten gedaan zonder dwingende theorieën

en voorspellingen vooraf. Wel is het zo dat zijn religieuze opvattingen over de eenheid van de natuur hem ertoe brachten te geloven dat alle natuurkrachten (elektriciteit, magnetisme, warmte, licht en gravitatie) ‘verschillende uitingen van één en dezelfde kracht’ zijn. Tot op de dag van vandaag bestaat er strijd over de mogelijkheid van zo’n eenheidstheorie, waarbij de zwaartekracht tot nu toe het struikelblok vormt.

Een volledige unificatie van de natuurkrachten ligt dus nog in de – onzekere – toekomst, maar Faraday heeft wel experimenteel aangetoond dat elektrische stroom kan ontstaan door toedoen van een magneet. Voor de verklaring van dit effect wilde hij geen beroep doen op een *actio in distans* (zoals Newton die voor de zwaartekracht veronderstelde), maar ontwikkelde hij een theorie met ruimtelijke, gebogen krachtlijnen. Hiermee kon hij een aantal elektromagnetische verschijnselen beter verklaren dan met een rechte lijnige afstandswerking.

Faradays experimentele instelling had – in combinatie met zijn wiskundige beperkingen – veel vruchten afgeworpen. Vervolgens was het aan Maxwell om de gevonden gegevens in een zo elegant mogelijke wiskundige vorm te gieten. Omdat elektromagnetische verschijnselen nog maar zo kort onderzocht werden, kon Maxwell nog geen beroep doen op bestaande wiskundig geformuleerde beschrijvingen ervan. Net als Faraday was Maxwell echter overtuigd van de eenheid van de natuur, zodat hij gebruik durfde te maken van modellen die waren ontleend aan een ander natuurfenomeen. Hij ontwikkelde een wiskundig model van stromende vloeistof. Deze analogie werkte Maxwell tot in detail uit, en het bleek dat hij met zijn veldtheorie inderdaad verschillende resultaten van Faradays experimenten kon verklaren.

Hoewel Maxwell onderstreepte dat het model niet volledig adequaat hoefde te zijn voor het elektromagnetisme, leverde de uitbreiding ervan zelfs een elektromagnetische theorie van het licht op – opnieuw een bevestiging van de veronderstelde eenheid van de natuur. Bij dit alles hielp de wiskundige vorm van de analogie met vloeistof juist om de overeenkomsten te ontdekken. Omdat die vorm abstract is en dus neutraal ten opzichte van de mogelijke toepassingsgebieden, kan men middels wiskundige be-

schrijvingen gemakkelijker overeenkomsten ontdekken tussen bijvoorbeeld waterstromen, elektriciteit en lichtverschijnselen.

5 Een onomkeerbaar proces: warmte

De eenheid van de natuur, waar veel natuurkundigen van uitgingen, heeft toch niet kunnen verhinderen dat zoiets alledaags als ‘warmte’ lang heeft moeten wachten op een bevredigende wetenschappelijke behandeling. Hoewel de mensen – zoals Uffink opmerkt – al vanaf de prehistorie afhankelijk zijn geweest van de beheersing van het vuur, is er pas in de negentiende eeuw een begin gemaakt met de huidige warmteleer.

Voordien werd er natuurlijk ook wel nagedacht over warmte en werden er proeven gedaan. Maar pas met de komst van de thermometer in de zeventiende eeuw was men niet meer aangewezen op zintuiglijke waarnemingen en konden er objectieve metingen en proeven met warmte worden gedaan. Het denken over warmte volgde echter nog lange tijd de traditionele paden, zoals we dat ook zagen in het geval van de zwaartekracht, van een bewegingsimpuls, van een lichtstraal en van de elektromagnetische kracht. In dit geval was het de vraag of warmte een wezenlijke eigenschap van een stof is, of een toestand die afhangt van externe invloeden, of dat warmte zelf een stof is die toegevoegd wordt aan een andere stof. Hoewel de laatste omschrijving, als warmtestof, ons het vreemdst voorkomt, werd juist deze tussen 1750 en 1850 door de meeste onderzoekers omhelsd. Dat is minder vreemd als men bedenkt dat licht toen ook nog werd gezien als een gewichtloze substantie.

Ook de grondlegger van wat later ‘thermodynamica’ genoemd werd, Carnot, veronderstelde dat warmte een eigen substantie vormde. Volgens die opvatting kon warmte dan ook niet worden gemaakt of verloren gaan – hoogstens kon ze worden verplaatst. Carnot toonde echter aan dat er volgens die opvatting een machine mogelijk zou moeten zijn die arbeid kan verrichten zonder warmte te verbruiken. Aangezien ook toen al de onmogelijkheid van een ‘perpetuum mobile’ (een machine die geen hulp-

bronnen verbruikt) geaccepteerd was, moest het begrip van warmte wel worden veranderd.

Het was Kelvin die vervolgens zocht naar een functie voor het maximaal haalbare rendement van een machine die warmte gebruikt om arbeid te verrichten. Dat hij daarvoor zijn opvattingen van warmte als onvernietigbare stof ingrijpend moest wijzigen, bleek pas in 1850. Toen betoogde Clausius dat bij een machine die warmte omzet in arbeid, ook altijd energie uit het systeem verloren gaat (bijvoorbeeld door wrijving) en dat dus de begin-toestand nooit meer bereikt kan worden zonder opnieuw warmte of energie toe te voegen. Het bijzondere van deze tweede hoofdwet van de thermodynamica is, dat er bij deze natuurwet geen omkeerbaarheid in de tijd geldt: de hoeveelheid entropie van het heelal zal steeds toenemen.

Hoewel Kelvin en Clausius allebei meenden dat atomen de bouwstenen van grotere objecten zijn, gebruikten ze deze hypothese niet in hun werk over warmte. De warmteleer van dat moment kon het nog stellen zonder gebruik te maken van een of ander atoommodel. Pas later zou Clausius de kinetische opvatting van warmte verdedigen: warmte hangt samen met de beweging van kleine deeltjes. Omdat de mechanica over bewegende deeltjes gaat, onderzochten Maxwell en Boltzmann daarna of de wetten van de thermodynamica dan ook af te leiden waren uit die van de mechanica. Een groot probleem bleek daarbij dat mechanische processen wel omkeerbaar zijn en thermodynamische juist niet – getuige de tweede hoofdwet van de thermodynamica. Dit probleem is nog steeds niet opgelost, ook niet met de kennis van de quantummechanica. Behalve op het niveau van de kleine deeltjes heeft de thermodynamica echter wel haar geldigheid behouden.

6 De natuurkundige wereld op zijn kop: relativiteit

In het begin van deze inleiding werd beschreven hoe wetenschappelijke vernieuwing kan plaatsvinden doordat een paar – soms kleine – onopgeloste problemen in een algemeen geaccepteerde theorie uiteindelijk blijken te vragen om een geheel andere theo-

rie. Belangrijk is in zo'n geval de inschatting door de wetenschappelijke gemeenschap van de relevantie van die problemen. Daarbij zal men afwegen of de ernst van de problemen opweegt tegen de radicaliteit van de nieuw voorgestelde theorie of hypothese.

Zoals Franssen beschrijft, leken de meeste natuurkundigen rond 1900 niet erg bezorgd over de stand van zaken in hun vak, hoewel er een aantal problemen waren rond de 'ether'. Toen vanaf 1820 de golftheorie van het licht aanvaard werd, moest men ook veronderstellen dat de lichtgolven zich voortplanten in een medium – en dat medium werd ether genoemd. Uit wat voor substantie die ether bestond, kon niemand zeggen, en hetzelfde gold voor de relatie tussen de ether en de lichtgolven en lichamen die door die ether heen snellen. In 1887 werd echter aangetoond dat er geen invloed meetbaar was van de ether op de voortplantingssnelheid van het licht, waardoor het bestaan ervan op losse schroeven kwam te staan.

Met zijn artikel over de relativiteitstheorie bracht Einstein in 1905 een ware wisseling van perspectief teweeg. Daarbij ging het om niets minder dan de ontkenning van de mogelijkheid van absolute rust of absolute beweging in fysische zin. De traditionele beschrijving van de natuur ging ervan uit dat de tijd overal hetzelfde is, zowel voor stilstaande als voor bewegende objecten. Elektrodynamische verschijnselen bleken echter niet ongevoelig te zijn voor beweging, zoals Maxwell had laten zien. Beweging zou in dat geval onder andere effect moeten hebben op de lichtsnelheid en dat vond Einstein niet goed aanvaardbaar. Hij veronderstelde juist dat de lichtsnelheid in alle gevallen hetzelfde blijft. En dat kan alleen zo zijn, zo bleek, als de tijd niet meer absoluut hetzelfde is voor alle waarnemers.

Een tiental jaren later wist Einstein zijn relativiteitstheorie zodanig uit te breiden dat ook de zwaartekracht er een plaats in kon krijgen. In de eerdere – speciale – relativiteitstheorie was dit nog niet mogelijk, onder meer omdat de zwaartekracht onmiddellijk werkt en dus de snelheid van het licht overtreft. In 1919 werd de theorie empirisch bevestigd, zodat verschillende klassieke natuurkundige theorieën met elkaar verenigbaar bleken te zijn.

7 Onzekerheid op kleine schaal: quantummechanica

Maar op het niveau van zeer kleine deeltjes voldeden de bestaande theorieën nog niet. Voordat de quantummechanica en een bijbehorend nieuw atoommodel ontwikkeld waren, kwam Einstein al met een hypothese waarin een quantum-aspect een belangrijke rol speelde. In zijn lichtquantumhypothese uit 1905 wordt licht beschreven als een stroom 'quanta', een soort pakketjes, met een bepaalde hoeveelheid energie. Die energie kan in specifieke experimentele situaties niet alle mogelijke waarden aannemen, maar alleen bepaalde discrete waarden. Dat ging in tegen de continuïteit waaraan men tot dan toe in de natuurkunde gewend was.

De quantummechanica kwam tot stand toen Bohr in 1913 een atoommodel postuleerde dat duidelijk maakte hoe een atoom stabiel kan blijven, ook al bestaat het uit een soort bewegend mini-planetensysteem. In Bohrs model kunnen de om de kern cirkelende elektronen niet alle mogelijke posities en snelheden aannemen, maar zijn die waarden ook 'gequantiseerd'. Met dit model bleek het mogelijk te zijn om ook de structuur en eigenschappen van elementen uit het zogenaamde Periodiek Systeem te verklaren. Zodoende kregen de natuurkunde, scheikunde en later ook de biologie met de quantummechanica een gemeenschappelijke theoretische basis.

Hoewel de theorie hierdoor zeer welkom was, had ze ook een aantal eigenschappen die haar omstrede maakten. Daar kwamen eind jaren twintig nog beschrijvingen bij die op gespannen voet bleken te staan met het vertrouwde denken over deeltjes en hun eigenschappen in de natuurkunde. Zo ontstonden twee versies van de nieuwe quantummechanica, die elk op een eigen manier positie en impuls van een elektron weergaven: in een matrix van verschillende waarden of met behulp van een golf functie. In beide gevallen is het niet meer mogelijk om een deeltje en zijn eigenschappen volledig te kennen en beschrijven, maar moet men genoegen nemen met waarschijnlijkheden.

Einstein vond deze manier van voorstellen van fysische toestanden onbevredigend en zelfs onaanvaardbaar. Bohr probeerde de situatie te interpreteren, onder andere door stil te staan bij

de grenzen van de taal waarmee wij nu eenmaal natuurverschijnselen beschrijven. Op het quantumniveau worden deze grenzen zichtbaar, onder meer doordat we altijd een beroep moeten doen op klassieke modellen voor de beschrijving van quantumverschijnselen.

Meer recent werd het atoommodel nog verder verfijnd met nog kleinere deeltjes en nieuwe onderling optredende krachten, waardoor het model nog complexer is geworden. Daarbij bleef echter de vereniging van de quantummechanica met de klassieke natuurkunde nog onhaalbaar.

8 Op naar de volgende doorbraak

Hoewel altijd pas achteraf te constateren valt of er een belangrijke doorbraak of omwenteling in de wetenschap heeft plaatsgevonden, bevindt volgens velen de natuurkunde zich momenteel in een overgangsfase. Volgens hen moet er vroeg of laat een andere theorie geformuleerd worden, die wel in staat is om alle bestaande natuurkrachten ineens te beschrijven, zodat er geen twee verschillende theorieën naast elkaar hoeven te bestaan voor het allerkleinste respectievelijk de rest van de natuur. Onderzoek naar de structuur van het atoom met botsingsexperimenten en naar de begin-toestand van de materie, door astronomen, wordt gecombineerd met steeds complexere wiskunde door honderden onderzoekers verspreid over de hele wereld. Of dit tot een doorbraak zal leiden is onzeker.

Zeker lijkt wel dat het resultaat aan de meeste mensen niet meer eenvoudig zal kunnen worden uitgelegd. Toch is het waarschijnlijk dat pakweg honderd jaar na zo'n doorbraak die GUT of GOT ('Grand unifying theory'; 'Grote overkoepelende theorie') door iedereen zal worden erkend en zelfs door leken kan worden begrepen.