

**Filosofie/Grondslagen van de Natuurkunde
(NS-257B)**

Prof. Dr. D.G.B.J. Dieks

Origineel typewerk: H. Pasveer - de Vries

Digitalisering: K. Schipper

Universiteit Utrecht - faculteit Natuur- en Sterrenkunde

Inhoud

1 Weten en zien in Oudheid en middeleeuwen	1
1.1 Het Griekse denken over de natuur.....	2
1.2 De begrijpelijkheid van verandering	4
1.3 Wetenschapsleer en wetenschap van Aristoteles	10
1.4 Betekenis en invloed van de Aristotelische natuurfilosofie . . .	16
1.5 De Thomistische wijsbegeerte	18
1.6 Het nominalistisch verzet; opkomst van het empirisme	19
2 Empirisme, rationalisme en methodologie van Renaissance tot de 19-de eeuw	23
2.1 Het Copernicaanse stelsel: waarheid of instrument?.....	24
2.2 Realisme en instrumentalisme	25
2.3 De Wetenschappelijke Revolutie: een nieuw empirisme	27
2.4 Wetenschap en wetenschapsleer van Newton	30
2.5 Hume's aanval op de waarheidspretenties van de empirische wetenschap.....	33
2.6 Kants poging de waarheidsaanspraken van de empirische wetenschap te redden	35
3 Waarneming en theorie in de moderne wetenschapsfilosofie	41
3.1 Machs wetenschapsleer	42
3.2 Machs analyse van de natuurkunde	45
3.3 Het logisch-empirisme	54
3.4 Het standaardbeeld van empirische theorieën	59
3.5 Groei van de natuurwetenschap volgens het logisch-empirisme	62
3.6 Het post-positivisme	63
3.6.1 Popper	64
3.6.2 Kuhn	68

3.6.3	Lakatos	73	
4	Realisme, instrumentalisme en quantummechanica		77
4.1	Het formalisme van de quantummechanica	77	
4.2	De interpretatie van het formalisme	80	
4.3	De onvolledigheidsinterpretatie	82	
4.4	Het realisme van de onvolledigheidsinterpretatie	85	
4.5	De quantummechanica als volledige theorie	86	
4.6	Bohrs Kopenhaagse interpretatie	88	
4.7	Quantumrealisme	91	
4.8	Literatuurverwijzingen bij hoofdstuk 4.....	94	

Hoofdstuk 1

Weten en zien in Oudheid en middeleeuwen

Wanneer we om ons heen kijken zien we stoelen, tafels, huizen, bomen, mensen. Moderne natuurkundige theorieën gaan over heel andere dingen: atomen, elementaire deeltjes, velden. Toch geldt de natuurkunde als de wetenschap bij uitstek die zich bezig houdt met de waarneembare werkelijkheid. Hoe is dat mogelijk? Een misschien voor de hand liggend antwoord is dat de natuurkunde zich richt op de *meest fundamentele* elementen van de waarneembare werkelijkheid; dat tafels en stoelen *opgebouwd* zijn uit moleculen, atomen en tenslotte elementaire deeltjes. Maar is het dan niet vreemd dat die fundamentele bouwstenen zelf zich aan de waarneming onttrekken? Waarom zouden we onwaarneembare grootheden fundamenteler achten dan dat wat ons direct in de waarneming gegeven is? Over wat kunnen we zekerder zijn dan het bestaan van direct observeerbare objecten? Wat voor zekerheid hebben we aan de andere kant dat die z.g. elementaire deeltjes werkelijk bestaan? Zelfs in de meest directe experimenten bij CERN zijn elementaire deeltjes nooit zelf gezien, maar alleen belletjes in een bellen vat of gezwarte plekken op een fotografische plaat. Zou het niet mogelijk zijn onze theorieën zo te herformuleren dat ze uitsluitend betrekking hebben op zulke grootheden, waar het uiteindelijk in de waarneming altijd om gaat?

Dat natuurkundige theorieën niet over het direct waarneembare gaan blijkt ook als we kijken naar de wetten die in theorieën voorkomen. Volgens Newtons gravitatie-theorie lopen de planeten in ellipsbanen om de Zon, als gecorrigeerd wordt voor hun onderlinge aantrekking. Maar nauwkeurige observatie van de feitelijke banen laat zien dat dit niet precies klopt; er zijn

altijd "fluctuaties", waardoor de baan afwijkt van een ellipsbaan. Ook het eenparig rechtlijnig bewegende deeltje uit de traagheidswet is nog nooit werkelijk waargenomen. Dit illustreert een algemeen punt. Vrijwel geen enkele theoretische regelmatigheid wordt precies zo in de natuur aangetroffen als door de theorie wordt voorspeld. Dit wordt niet als een probleem gezien, omdat men aanneemt dat er altijd verstoringen aanwezig zijn, die het beeld "vertroebelen". Het spreken over "storingen" zegt al dat datgene wat in de waarneming gegeven is gecorrigeerd moet worden. De vorm van de planetenbanen is "eigenlijk" een ellips. Het is nodig om te *abstraheren* van niet-relevante waarnemingsgegevens om dit te kunnen zien.

Door een paar van zulke voor de hand liggende, natuurlijk nog helemaal niet systematische, opmerkingen over de aard van natuurkundige kennis krijgen we te maken met typisch "filosofische" problemen. Sommige van deze problemen hebben een veel ruimere strekking dan naar voren komt in de natuurkundige context. We kunnen ons, naar aanleiding van de bovenstaande constatering dat natuurkundige theorieën niet direct over het waarneembare gaan, afvragen hoe men tot die theorieën gekomen is. Is het wel mogelijk tot abstracte theorieën te komen op grond van de waarneming alleen? Die vraag leidt tot één van de hoofdthema's uit de geschiedenis van de westerse filosofie. Is al onze kennis uit de waarneming afkomstig, of bestaan er wellicht nog andere kennisbronnen? Ook de vraag of niet-waarneembare objecten werkelijk bestaan is niet alleen voor de natuurkunde van belang.

In de volgende paragrafen zullen een aantal van zulke kwesties aan de orde komen in de gedaante waarin ze in de geschiedenis van de filosofie een rol hebben gespeeld. Hoewel er vrijwel altijd een verband bestaat met de fysica, heeft de historische discussie meestal een algemener karakter. Later zullen we ons bezighouden met het belang van deze oude debatten voor vragen over de status van de moderne natuurkunde. Thema van onze eerste kennismaking met de filosofische discussies is de vraag: in hoeverre is het menselijk *denken* in staat en gerechtigd het *zintuigelijk waargenomene* in twijfel te trekken of te corrigeren?

1.1 Het Griekse denken over de natuur

Traditioneel laat men de natuurwetenschap beginnen rond 600 v. Chr., bij de Ionische natuurfilosofen. Natuurlijk werden ook voor die tijd vragen over de natuur gesteld. Maar het karakteristieke (en vanuit modern gezichtspunt herkenbare) van de Ionische natuurfilosofie is dat daar getracht werd de

natuur op stelselmatige wijze te begrijpen vanuit krachten, processen, e.d., *in de natuur zelf*. Dit contrasteert met benaderingen van de natuur die de vorm hebben van mythen en sagen. In deze laatste is sprake van buiten de natuur staande krachten die, in analogie met de mens, worden geacht te handelen op grond van gevoelens en verlangens. In de Griekse mythologie zijn vele voorbeelden te vinden van zulke *antropomorfe* verklaringen voor gebeurtenissen in de natuur; bijvoorbeeld wanneer Zeus in woede de aarde doet schudden. Vergelijk daarmee de verklaring die Thales van Milete (± 600 v. Chr.) voor aardbevingen geeft. Volgens Thales drijft de Aarde als een schijf op water; golven in het water laten de grond op Aarde af en toe trillen. Vanzelfsprekend gaat het er niet om of de door Thales gegeven verklaring al dan niet een kern van waarheid bevat. Relevant is hier alleen dat het *type* verklaring dat door Thales naar voren wordt gebracht zich sterk onderscheidt van de oudere antropomorfe natuurverklaringen.

Twee punten karakteriseren de Ionische natuurfilosofie. In de eerste plaats worden, zoals zojuist opgemerkt, de oorzaken van verschijnselen in de natuur zelf gezocht. Maar ten tweede, niet minder belangrijk, er wordt geprobeerd op *systematische* wijze verklaringen te geven die door hun logica kunnen overtuigen. Dat wil zeggen dat men tracht een aantal algemene *principes* aan te geven die altijd in de natuur werkzaam zijn en op grond waarvan een grote verscheidenheid van verschijnselen *begrepen* kan worden. Het doel de natuur te begrijpen impliceert, althans voor de Griekse natuur-filosofen, dat het niet voldoende is verschijnselen nauwkeurig te observeren en te catalogiseren. Dan zouden ze zonder samenhang, onbegrepen, naast elkaar blijven staan. Het gaat erom de onderlinge verbanden te zien, en te zien *waarom* de dingen kunnen, en ook moeten, gebeuren zoals ze feitelijk gebeuren. Deze eis (de z.g. intelligibiliteitseis) staat op gespannen voet met een streven de natuurwetenschap alleen te baseren op waargenomen verschijnselen. De waarnemingen laten immers zelf alleen maar zien *dat* bepaalde dingen gebeuren, en niet *waarom* het juist zo en niet anders *moest* gebeuren. Blijkbaar kan daarom een adequate, intelligibele verklaring van de natuurverschijnselen niet gebaseerd zijn op waarnemingen alleen. De mens moet trachten tot achter de verschijnselen te zien. Door denken of intuïtie (we komen hier nog op terug) moet hij de niet-direct waarneembare verbanden en achtergronden van de natuurverschijnselen proberen te achterhalen, om zo de verschijnselen zelf begrijpelijk te maken.

Bij het gestalte geven aan de idee van een systematische natuurwetenschap ontwikkelden de Griekse denkers een heel instrumentarium van begrippen, zoals kwalitatief en kwantitatief, oorzaak, noodzakelijkheid, eigenschap,

individu, soort, hypothese, definitie, bewijs, deductie en inductie. Voor ons zijn dat soort begrippen nog steeds uiterst nuttig; het gebruik ervan is vanzelfsprekend geworden. Het zijn echter concepten waarover de mens niet automatisch beschikt. Ze zijn langzamerhand ontwikkeld in de context van de problemen die zich voordoen bij het begrijpelijk maken van de wereld.

Wat voor concrete uitwerking gaven de Ionische natuurfilosofen aan het programma dat de begrijpelijkheid van de natuurverschijnselen duidelijk gemaakt moest worden? Een belangrijk thema, dat we bij vrijwel alle denkers zien terugkeren, wordt gevormd door de gedachte dat de waarneembare verscheidenheid van gebeurtenissen en processen teruggebracht dient te worden tot een relatief klein aantal universele principes. Veelheid moet gereduceerd worden tot eenheid. Die eenheid is niet in de waarneming zelf gegeven. Het gaat om "achterliggende" principes, die we op de een of andere wijze moeten ontdekken. De waargenomen verschijnselen moeten begrepen kunnen worden op grond van die principes. Als veel verschillende waarnemingen gezien kunnen worden als allemaal verband houdende met dezelfde principes, zien we ook relaties tussen die waarnemingen. Dit is een belangrijk aspect van het "begrijpen" van de verschijnselen, dat we later nog vaak zullen zien terugkomen. In de oude natuurfilosofie is echter een ander aspect van de notie "begrijpen" belangrijker. Men eist namelijk dat de principes zelf, op basis waarvan we verklaringen geven, direct inzichtelijk en intelligibel, of zoals vaak gezegd wordt, "zelfevident" zijn. De gedachtegang is dat we pas echt van "verklaren" en "begrijpen" kunnen spreken als we ons kunnen baseren op uitgangspunten die zelf geen verdere verklaring behoeven, die zelf onmiddellijk voor het menselijke begrip duidelijk zijn. De geschiedenis van de traditionele natuurfilosofie is voor een groot gedeelte de geschiedenis van zulke zelfevidente basisprincipes of "eerste beginselen".

1.2 De begrijpelijkheid van verandering

Als een rode draad loopt door de geschiedenis van de Griekse wijsbegeerte het probleem veranderingen te begrijpen. Aan dit concrete voorbeeld kan veel van het bovenstaande worden geïllustreerd. Wat is het probleem? Waar we ook kijken, overal zien we processen van verandering in de natuur. We worden door de zintuiglijke waarneming geconfronteerd met *beweging*, dit is verandering van plaats, verandering van *hoedanigheid*, bijvoorbeeld wanneer een stuk ijzer bij het smeden roodgloeiend wordt, en ook veranderingen van *zelfstandigheid*, wanneer bijvoorbeeld een stuk hout opbrandt. In dit laatste

type van veranderingen is na het proces het aan verandering onderhevige object of individu zelf niet meer aanwezig. Hoewel de zintuigen ons dus de universaliteit van verandering in de verschijnselen tonen, stuit volgens de Grieken het *denken* op problemen wanneer het probeert verandering intelligibel te maken.

De kern van de moeilijkheden zit in het volgende. Beschouw een object op een gegeven moment. Het is vanzelfsprekend precies datgene wat het op dat moment is, en niets anders. Dat wil zeggen dat het nog niet is wat het door de verandering zou moeten worden. Maar iets wat (nog) niet is, d.w.z. op het beschouwde ogenblik niet bestaat, kan zich ook nog niet laten gelden, kan geen invloed uitoefenen, en kan dus ook niet de richting aangeven waarin het object zou moeten veranderen. Bij het nadenken over het veranderingsproces zien we ons dus geconfronteerd met de situatie dat iets is wat het is, en iets anders zou moeten worden dat nog in het geheel niet bestaat. Maar hoe kan iets worden tot iets anders dat nog niet in de een of andere vorm aanwezig is? We kunnen de vraag ook zo stellen: hoe zou een object moeten weten in welke andere toestand het moet overgaan als nog niets van die andere toestand aanwezig is?

Hoewel het probleem in deze formulering natuurlijk ver af staat van vraagstukken die in de moderne natuurkunde aan de orde zijn, is misschien toch wel duidelijk dat hier iets aangeroerd wordt dat ook aan de basis ligt van de hedendaagse fysische beschrijving van veranderingsprocessen. Beschouw bijvoorbeeld de beweging van een puntdeeltje in de klassieke mechanica. Op ieder tijdstip bevindt het deeltje zich op een plek, en niet op een andere. Wat onderscheidt het bewegende deeltje op dat ene ogenblik van een rustend deeltje met precies dezelfde positie? Wat kan bepalen waar het deeltje zich later zal bevinden? De moderne fysicus zal zeggen: de snelheid, of de impuls, van het bewegende deeltje. Maar wat kan snelheid van een deeltje op één moment betekenen; op dat ene moment komt het immers niet van zijn plaats, "het beweegt dan dus helemaal niet". De denkmoeilijkheden die hier naar voren komen moeten opgelost worden voordat de klassieke mechanica als een bevredigend denksysteem kan worden beschouwd. Het betreft één van de grondslagen van de klassieke fysica, die pas in relatief recente tijd een bevredigende behandeling heeft gekregen. We kunnen daaraan zien dat de Griekse preoccupatie met het probleem van de verandering niet zonder rechtvaardiging was.

Bij de bespreking van het probleem door verschillende Griekse denkers zijn gedachten en typen van benadering ontwikkeld die ook voor ons nog relevant zijn. De eerste Ionische natuurfilosofen veronderstelden dat er in ie-

der veranderingsproces iets is dat constant blijft. Datgene wat in de eindfase van het proces tegenwoordig is, moet in andere verschijningsvorm ook al in de beginfase aanwezig zijn. Aan het verlangen naar intelligibiliteit wordt op deze manier tegemoet gekomen, omdat verandering wordt opgevat als een verandering *aan* iets, dat zelf niet verandert. Zo zegt Thales van Milete dat alles uit water bestaat: alle stoffen zijn verschillende verschijningsvormen van de éne oerstof water (zoals ijs en damp dat vanuit modern gezichtspunt zijn). Misschien heeft Thales zich daarbij laten leiden door de observatie dat bij verbranding of rotting water vrijkomt; dat water zou dan ook van te voren al aanwezig moeten zijn. Anaximenes, ook uit Milete en iets jonger dan Thales, beweerde met gelijksoortige bedoelingen dat alles lucht is, meer of minder gecompriëerd.

Opgave. Spelen volgens jou soortgelijke overwegingen als welke naar voren komen in deze "behoudsgedachte" een rol in de moderne fysica? Wordt volgens jou het "intelligibiliteitsprobleem" opgelost door Thales of Anaximenes?

Een heel andere zienswijze werd voorgesteld door Heraclitus (± 480 v. Chr.). Volgens hem is er geen probleem met de verandering zodra we ons realiseren dat het *wezen van alles* verandering is. Met andere woorden, verandering is de "normale toestand", als het ware de "nulsituatie" vanwaar onze beschrijving van de wereld dient te vertrekken, en behoeft als zodanig zelf geen verklaring. Wat verklaard moet worden is eerder dat in de waarneming ook niet-veranderende structuren aanwezig lijken te zijn. Maar, zegt Heraclitus, als we *goed* waarnemen, blijkt al spoedig dat de onveranderlijkheid slechts *schijn* is. Een rivier lijkt steeds dezelfde te blijven, maar is *in werkelijkheid* steeds anders, door het voortdurend veranderende water. Ook bij Heraclitus vinden we dus de opvatting dat de ware werkelijkheid zich verbergt achter een door zintuigen voorgetoverde schijn. De zintuiglijke ervaring is slechts waardevol als zij verstandig wordt geïnterpreteerd. In een van Heraclitus overgeleverd fragment wordt gezegd: "ogen en oren zijn slechte getuigen voor de mensen, als zij geen ziel hebben welke de taal der zinnen verklaart". Beroemd is ook zijn gezegde "*παντα ρει*", d.w.z. alles stroomt, is aan verandering onderhevig. Als oerstof wijst Heraclitus het *vuur* aan. Het *wezen* van het vuur is immers de verandering - het blijft geen ogenblik aan zichzelf gelijk - terwijl de uiterlijke schijn die van een permanent aanwezige vlam is.

Opgave. Heraclitus' strategie is niet duidelijk om een problematische stand van zaken "begrijpelijk" te maken door hem tot de te verwachten, normale situatie te verheffen die geen verklaring vereist. Wat vind je van zo'n strategie? Ken je parallellen uit de geschiedenis van de moderne natuurkunde?

Een heel andere weg wordt ingeslagen door Parmenides (± 500 v. Chr.), vertegenwoordiger van de z.g. Eleatische school (zo genoemd naar de stad Elea, een Griekse kolonie in Zuid-Italië). Parmenides neemt de eerder genoemde moeilijkheden met het begrip "verandering" volkomen serieus. Hij meent dat bij goed doordenken van de problemen maar één conclusie mogelijk is: verandering kan niet werkelijk bestaan, is een illusie. De ware werkelijkheid is één en onveranderlijk. Dit betekent een radicaal afwijzen van wat de zintuiglijke ervaring ons leert en het leggen van het primaat bij het denken. Zoals Parmenides in een overgeleverd fragment zegt: "alleen datgene kan werkelijk bestaan, wat ook kan worden gedacht". In een *logische redenering* probeert Parmenides te *bewijzen* dat verandering *inconsistent*, in zichzelf strijdig, ondenkbaar en dus onbestaanbaar is. De redenering verloopt ongeveer als volgt. Uitgangspunt is de vaststelling dat alles wat "is" tezamen "het zijnde" vormt. Buiten dit zijnde is niets, er is dus ook niets dat het zijnde zou kunnen verdelen. Maar dit impliceert reeds dat het zijnde onverdeeld, en dus één, is. Verder is dit ene zijnde onveranderlijk. Want de enig mogelijke verandering zou die van niet-zijnde tot zijnde (of omgekeerd) moeten zijn. Maar het niet-zijnde bestaat niet (*is niet*), en kan dus geen deel uitmaken van zo'n proces. Het zuiver logische denken bewijst ons dus dat de zintuiglijk gegeven verandering slechts schijn is.

Parmenides' positie werd door zijn leerling Zeno verder verdedigd met behulp van een aantal spitsvondige redeneringen (bekend als de paradoxen van Zeno). We kunnen natuurlijk met onze ogen constateren dat een snelle loper in staat is een bepaalde afstand in beperkte tijd af te leggen. Het verstandelijk redeneren toont echter aan dat dit niet de werkelijkheid kan zijn: de rennende Achilles moet eerst de helft van het traject afleggen, dan de helft van de rest, enzovoort. Nooit komt er een eind aan de te volbrengen taken, na iedere is er weer een volgende. Achilles bereikt dus nooit de eindstreep. Het is zelfs sterker: hij kan nooit van zijn plaats komen. Want stel dat hij een afstand zou hebben afgelegd. Dan moet hij weer oneindig veel taken hebben volbracht, waaraan nooit een eind komt (de helft van de afstand lopen, de volgende helft, enz.). Achilles kan daarom nooit een afstand hebben afgelegd. Op dit thema zijn vele variaties mogelijk. De "paradox van de pijl" komt het dichtst bij de kern van de denkmoeilijkheden die we

eerder hebben beschreven. Op ieder ogenblik is een bewegende pijl slechts op één plek en valt daax samen met een identieke rustende pijl. Er is op dat moment dus geen verschil tussen een pijl in rust en een pijl in beweging. Maar dit geldt voor *ieder* moment. Met andere woorden, er is nooit verschil tussen rust en beweging. Interessant is tenslotte nog de z.g. paradox van de uitgebreidheid. De redenering gaat uit van het algemeen geaccepteerde idee dat een lijnstuk onbeperkt deelbaar is. De lijn is de verzameling van al zijn punten. Nu zijn er twee mogelijkheden. Of ieder punt heeft een eindige lengte, of ieder punt heeft lengte nul. In het eerste geval moet echter de totale lijn een oneindige lengte hebben, omdat zij is opgebouwd uit oneindig veel punten. In het tweede geval moet echter de lijn de lengte nul hebben, want hoe vaak we nul ook bij nul optellen, we krijgen nooit iets anders dan nul. Beide conclusies zijn natuurlijk onaanvaardbaar. Daarom moet de premisse van de redenering ongeldig zijn: een lijn is niet opdeelbaar in punten. We hebben hier dus weer een redenering die de bedrieglijkheid van de alledaagse ervaring demonstreert.

Opgave. Wat is er volgens jou, vanuit modern gezichtspunt gezien, mis in de paradoxen van Zeno? In de laatste paradox mag niet zondermeer geredeneerd worden dat "oneindig maal nul niet nul is" (waarom niet?).

De denkschema's die latere Griekse denkers hebben ontwikkeld zijn grotendeels bedoeld om de door Parmenides opgeworpen problemen op te lossen. Daarbij is een terugkerend motief dat er enige concessies aan de opvattingen van Heraclitus gedaan worden: *enkele* vormen van verandering worden als "natuurlijk", intelligibel, en geen verdere verklaring behoevend beschouwd. Op basis van die als uitgangspunten geaccepteerde principes probeert men dan alle verschijnselen te verklaren.

Een historisch belangrijk voorbeeld van zo'n denkschema is de atoomleer van Leucippus en Democritus (± 450 v. Chr.). Democritus ziet de fout van Parmenides' redenering hierin, dat Parmenides ongedifferentieerd over het "zijnde" spreekt. Het menselijk verstand heeft evenwel geen moeite, zo redeneert Democritus, *twee* soorten van "zijn" aan te nemen, namelijk "lege-ruimte-zijn" en "niet-lege-ruimte-zijn". Wat niet lege ruimte is, dus "vol" is, noemt hij een "atoom". Hij neemt aan dat dit ondeelbaar is (de grondgedachte van Parmenides). Hij neemt verder aan dat de atomen zich alleen van elkaar onderscheiden door gedaante en grootte; kwalitatief zijn ze volkomen gelijk. Tenslotte, en hier zien we een duidelijk voorbeeld van de al genoemde strategie bij het oplossen van begripmatige problemen, zegt Democritus dat

de *beweging* een *natuurlijke eigenschap* van de atomen is. Beweging door de ledige ruimte wordt door hem dus direct inzichtelijk en intelligibel geacht. Andere veranderingsprocessen, die niet zo uit zichzelf begrijpelijk zijn, kunnen nu begrepen worden als het resultaat van de beweging van de atomen. Alle verandering is volgens Democritus niets anders dan herschikking van atomen. In Democritus' stelsel gaan op die manier onveranderlijkheid (aantal, vorm en hoedanigheid van de atomen) en een minimum aan veranderlijkheid (verandering van plaats) samen om een bevredigende verklaring van alle verandering te geven.

In moderne natuurkundeleerboeken wordt de leer van Democritus wel eens afgeschilderd als directe voorloper van de moderne atoomtheorie. Geheel onterecht is dit niet, want in de 17^e en 18^e eeuw grepen vele auteurs terug op de klassieke atoomtheorieën. Maar we moeten ons wel goed realiseren dat de leer van Democritus ontworpen is in een geheel andere context dan die van moderne fysische en chemische vragen. Het ging Democritus in de eerste plaats om een oplossing van het *conceptuele* probleem van de verandering en pas in tweede instantie om de verklaring van empirische verschijnselen als verdamping en bevriezing. We hebben hier dus te maken met een voorbeeld van principes waarvan nauwelijks gezegd kan worden dat ze aan de waarneming ontleend zijn, maar die wel een belangrijke rol gespeeld hebben in de ontwikkeling van moderne fysische theorieën.

Plato (427-347 v. Chr.), één van de grootste en invloedrijkste filosofen uit de klassieke Oudheid, kon het *materialistische wereldbeeld* van Democritus niet accepteren. Hij probeert op een geheel andere wijze de tegenstelling tussen Parmenides en Heraclitus te overbruggen. Volgens Plato moeten we onderscheid maken tussen *twee* werelden: de onvergankelijke wereld van de *zuivere begrippen*, de *Ideeën* of *Vormen*, en de voor de zintuiglijke waarneming toegankelijke wereld, die bestaat uit onvolmaakte en verwarde materiële realiseringen van die begrippen. Mensen, dieren en planten worden geboren en sterven; ze veranderen voortdurend. Maar het Idee van een Mens of bijvoorbeeld een Paard blijft bestaan. Zo is er ook één ideale Dapperheid, terwijl op Aarde alleen meer of minder dappere mensen worden aangetroffen, nooit de volmaakte Dapperheid zelf. De voor de filosoof of wetenschapsman waardevolle kennis heeft nu juist betrekking op de onveranderlijke Ideeënwereld. Zintuiglijke waarneming kan hoogstens tot een verward beeld van die wereld leiden en zal zelfs in de meeste gevallen geheel op een dwaalspoor voeren. Bekend is in dit verband de parabel van de grot, waarin Plato ons vergelijkt met vastgeketende gevangenen die slechts door flikkerende kaarsen op een grillige rotswand geworpen schaduwen van de werkelijkheid kunnen zien.

Kennis van de Ideeën kan alleen verkregen worden door middel van de innerlijke aanschouwing, het geestesoog, dat de filosoof in jarenlange oefening moet ontwikkelen. Uitermate geschikt voor die oefening is de studie van de wiskunde. In wiskundige beschouwingen staat de geest immers vlak bij de ideale Vormen.

Weliswaar wordt een onvolmaakte, materiële, driehoek in het zand of in een tekening gebruikt om de gedachten op gang te helpen, maar de beschouwing gaat in werkelijkheid over de échte driehoek die ons nooit in de waarneming gegeven is. Plato meent dat de mens in staat is kennis over de Ideeën te verwerven doordat de menselijke ziel vóór de geboorte in de wereld der Ideeën verbleef. Alle kennis is slechts herinnering.

Plato's ideeën hebben uiteraard geen grote directe stimulans betekend voor de ontwikkeling van een experimentele natuurwetenschap. Maar zijn waardering voor de wiskunde, en de opvatting dat volmaakte wiskundige principes verborgen liggen achter de rommelige wereld van de waarneming, hebben wel degelijk een positieve rol gespeeld in de ontwikkeling van de natuurwetenschap, toen in de Renaissance de studie der Klassieken weer ter hand werd genomen. Ook hier zijn voorbeelden te vinden van niet-empirische, "filosofische", principes die bij het opstellen van natuurkundige theorieën een rol hebben, gespeeld.

1.3 Wetenschapsleer en wetenschap van Aristoteles

Aristoteles (384-322 v. Chr.; geboren in Stagira, daarom soms "de Stagiriet" genoemd) is de Griekse filosoof die waarschijnlijk de meeste invloed op latere denkers heeft gehad. Dit komt vooral door het omvattende karakter van zijn werk. Hij hield zich niet alleen bezig met de wetenschap van zijn tijd, maar ontwikkelde tevens een *wetenschapsleer* waarbinnen iedere, ook toekomstige, wetenschap zou moeten passen. Deze wetenschapsleer is veel systematischer en completer dan wat door de oudere natuurfilosofen naar voren was gebracht. Bovendien sluit de leer zeer goed aan op aan de dagelijkse ervaring ontleende intuïties. Het is dan ook geen wonder dat de opvattingen van Aristoteles, toen deze vanaf de 11^e eeuw weer in het Westen bekend werden, grote indruk maakten en tot basis werden van de christelijke wijsbegeerte.

Net zoals de eerder besproken filosofische denkbeelden, kan ook het stelsel van Aristoteles beschouwd worden als een poging de vraag te beantwoorden hoe verandering mogelijk is, d.w.z. hoe verandering *gedacht* kan worden.

Plato had feitelijk gekozen voor de zienswijze van Parmenides: de wereld waar het om gaat, waarover wij kennis moeten proberen te verwerven, is onveranderlijk. Weliswaar is de zintuiglijk waarneembare wereld ook reëel, maar door haar verwarde, rommelige karakter is zij voor de filosoof niet interessant. Aristoteles wijst deze splitsing van de realiteit in twee werelden af. Hij verwerpt het standpunt van zijn leermeester Plato dat er onveranderlijke Vormen bestaan onafhankelijk van de "gewone", stoffelijke wereld. Er is maar één wereld, de wereld van de zintuiglijke waarneming. En volgens Aristoteles is er ook maar één manier om tot kennis over die wereld te komen, namelijk de waarneming. Kennis is geen herinnering; wijsheid is ons niet aangeboren, we moeten uit de waarneming leren. Algemene begrippen moeten door abstractie uit de waarneming van afzonderlijke gevallen gevormd worden. Als begrippen, los van de concrete gevallen, bestaan ze slechts als ideeën in de menselijke geest en niet als Ideeën in een eigen Wereld. Ze bestaan wel onafhankelijk van de mens doordat ze aanwezig zijn in ieder concreet geval. Zo is het begrip, de vorm, Eik aanwezig - als een soort bouwplan - in iedere afzonderlijke eik. Maar *zonder* deze voor de zintuigen toegankelijke objecten (hier: eiken), is er geen Vorm.

Aristoteles, zoals de denkers voor hem, maakt een scherp onderscheid tussen *kennis* en *mening*. In de filosofie (wetenschap) gaat het om *kennis*, die van alleen maar "mening" verschilt doordat zij *aantoonbaar juist* is. Met andere woorden, kennis moet *bewijsbaar* zijn. We komen hier op een punt dat relevant is ook voor moderne opvattingen over wetenschap. Hoe stelt Aristoteles zich een bewijs van juistheid voor? De juistheid van een uitspraak is volgens Aristoteles aangetoond als de uitspraak in kwestie door *logische redenering* kan worden afgeleid uit andere uitspraken, waarvan de juistheid al vaststaat. We zien hier het al genoemde stelselmatige karakter van Aristoteles' wetenschapsleer. Wetenschappelijke uitspraken staan niet los van elkaar, maar maken deel uit van een groot geheel waarin ze samenhangen via lijnen van redenering.

De leer van het zuivere redeneren, de *logica*, is een kernstuk van Aristoteles' filosofie. Deze Aristotelische logica bevat een opsomming van de geldige redeneerschema's, de z.g. *sylogismen* (of "sluitredes"). Een voorbeeld van zo'n syllogisme is de volgende redenering:

Alle mensen zijn sterfelijk
Socrates is een mens
 Socrates is sterfelijk

Het voorbeeld is een concretisering van een algemeen redeneerschema:

Alle M zijn P

SisM

SisP

Het is essentieel dat de geldigheid van dit redeneerschema niet afhangt van de betekenis van S, M en P, en ook niet van het al dan niet waar zijn van de premissen of de conclusie. Zo is de volgende redenering ook geldig:

Alle eenhoorns zijn gestorven

Napoleon is een eenhoorn

Napoleon is gestorven

Het logisch redeneren is dus niet inhoudelijk van aard, maar steunt geheel op de *vorm* van de redeneerschema's. De geldigheid van bovenvermeld redeneerschema volgt uit de betekenis van de termen "alle", "zijn", "is", en heeft niets te maken met de inhoud van S, M en P. Heel algemeen kan gezegd worden dat logische conclusies alleen maar expliciet maken wat al in de premissen, op grond van hun vorm, was vervat. De conclusie voegt niets inhoudelijks toe aan de premissen.

Als het logisch redeneren niets inhoudelijks toevoegt kan de juistheid van een wetenschappelijk bewijs alleen maar afhangen van de waarheid van de premissen. Maar hoe weten we de waarheid daarvan? Er lijkt maar één antwoord mogelijk te zijn: via een bewijs. Maar nu komen we terecht in een oneindige regressie: ieder wetenschappelijk bewijs vooronderstelt weer de waarheid van nieuwe premissen, er komt nooit een eind aan het bewijzen. Aristoteles vermijdt het voorkomen van deze regressie door te postuleren dat er bepaalde eerste principes, of axioma's, zijn waarvan de waarheid direct, d.w.z. zonder bewijs, inzichtelijk is. De menselijke *intuïtie* is in staat de waarheid van de axioma's onmiddellijk te zien; ze zijn zelfevident.

De Aristotelische opvatting over hoe de natuurwetenschap bedreven dient te worden is daarom in grote lijnen ais volgt. Het begin van alle kennis over de natuur is de waarneming. Door verschillende waarnemingen te doen, en verschillen en overeenkomsten aan de afzonderlijke concrete gevallen op te merken, kunnen we door abstractie tot algemene principes komen (dit heet *inductie*). De menselijke geest is nu in staat van sommige van die principes onmiddellijk te zeggen: dit is waar. De zo geselecteerde axioma's dienen vervolgens als uitgangspunt bij de systematische opbouw van de wetenschap. De structuur die uiteindelijk tot stand komt is die van een *axiomatisch-deductief systeem*: de axioma's vormen de basis waaruit alle andere juiste uitspraken door middel van logische redenering kunnen worden afgeleid. *Verklaren* van

een natuurverschijnsel is afleiden van de corresponderende beschrijving uit de geaccepteerde axioma's. Omdat de axioma's voor zichzelf spreken voert een verklaring ook altijd tot volkomen *begrip* van een verschijnsel.

De Aristotelische wetenschapsopvatting is in eerste instantie *empiristisch*: de wetenschap gaat over de waarneembare natuur (de *empirie*) en alle kennisverwerving gaat uit van de waarneming. Maar er zit tevens een *rationalistisch* element in: de menselijke rede (*ratio*) wordt in staat geacht van sommige uitspraken direct de waarheid in te zien. Zijn de juiste uitgangspunten eenmaal ontdekt, dan is geen verandering meer te verwachten; de waarheid is immers altijd hetzelfde. Echte wetenschappelijke kennis is dus altijd definitief.

De spanning tussen empirisme en rationalisme (de opvatting dat de ratio iets funderends bijdraagt aan de menselijke kennis) is een principiële thema in de geschiedenis van de westerse wijsbegeerte in het algemeen en in de wijsbegeerte van de natuurwetenschappen in het bijzonder.

Met welke concrete principes werkte nu de Aristotelische natuurwetenschap? Om het begrippenkader waarmee Aristoteles werkt duidelijk te maken moeten de hoofdproblemen van de Griekse filosofie over de natuur in de herinnering teruggeroepen worden: hoe is verandering mogelijk, hoe kan veelheid bestaan, en hoe ligt de verhouding tussen de zintuiglijk waarneembare werkelijkheid en de ideale Vormen (bijvoorbeeld de relatie tussen de ideale Driehoek van de meetkunde en de werkelijk getekende driehoek). De empiristische inslag van Aristoteles' wetenschapsopvatting maakt het onmogelijk dat hij Parmenides volgt in diens ontkenning van verandering en veelheid. Aristoteles heeft dus de taak begrippen te ontwikkelen die enerzijds voor de rede inzichtelijk zijn en waarmee anderzijds de zintuiglijk waarneembare verandering en diversiteit kunnen worden begrepen. Evenals dat bij de Atomisten het geval was, ziet Aristoteles de fout van Parmenides erin dat die een te simplistisch zijnsbegrip hanteert (in de formulering "alles wat is vormt tezamen het zijnde"). De Atomisten hadden het Zijn van Parmenides vervangen door twee zijnswijzen: lege-ruimte-zijn en atoom-zijn. Aristoteles onderneemt een verdergaande diversificatie. Hij maakt onderscheid tussen:

- actueel zijn
- potentieel zijn

en verder tussen:

- zelfstandig (essentieel) zijn

- bijkomstig (accidenteel) zijn.

Het eerste onderscheid is bedoeld om de verandering begrijpelijk te maken. Een ding is wat het is en is niet wat het nog zou moeten worden, was het oude dilemma. Aristoteles geeft het antwoord dat een ding *zowel* kan zijn wat het is *als* wat het moet worden, maar op twee verschillende manieren. Wat het op dit moment reeds is behoort tot het *actueel* zijn. Maar wat nog komen moet kan nu reeds *in potentie* aanwezig zijn. Zo is een eikeitje actueel als eikeitje aanwezig, maar de eik, die er eventueel uit kan groeien, zit er ook in, in potentiële zijnsvorm. We moeten hier natuurlijk niet denken aan een miniatuur-eik in de eikel, maar aan de "informatie" die richting geeft aan het groeiproces.

Het tweede onderscheid dient om begrippen te leveren met behulp waarvan we eenheid en veelheid consistent kunnen behandelen. Het idee is dat alle objecten, individuen, van een bepaalde soort iets gemeen hebben, één grondvorm of essentie, die bepaalt dat ze tot dezelfde soort behoren. Anderzijds zullen de verschillende exemplaren van zo'n soort altijd punten van verschil vertonen. Bij dat laatste gaat het echter om *bijkomstige* (accidenteel) eigenschappen, die niet relevant zijn voor de indeling in soorten. Zo zijn geen twee mensen hetzelfde, ondanks dat ze allen mens zijn. Alle mensen zijn gelijk wat betreft hun essentiële eigenschappen - in deze zin is er maar één Mens. Maar er zijn allerlei eigenschappen als huidskleur, lengte, schoenmaat, die niet relevant zijn voor het menszijn zelf; elk van deze eigenschappen kan veranderen terwijl het individu in kwestie toch een mens blijft. Daarom zijn zulke eigenschappen accidenteel.

Veranderingen kunnen we nu onderscheiden in veranderingen van accidentele eigenschappen en z.g. substantiële veranderingen. Bij de eerste soort veranderen alleen de bijkomstige eigenschappen, maar blijft de essentie van de drager van deze eigenschappen ongewijzigd (zoals wanneer de neus van een mens begint te groeien, terwijl de drager toch mens blijft). Bij substantiële veranderingen gaat echter de eigen aard van het object of individu verloren en ontstaat er een nieuwe stof (substantie). Volgens Aristoteles kunnen dit soort processen alleen begrepen worden als wordt aangenomen dat er toch iets is dat bij de verandering hetzelfde blijft, dat behouden blijft; ontstaan uit het niets en verdwijnen in het niets zijn ondenkbaar (vergelijk Thales' water en Anaximenes' lucht). Aristoteles neemt daarom aan dat alle substanties één gemeenschappelijk beginsel hebben, de z.g. *oerstof* of *materia prima*. De uitwerking van dit idee leidt tot de beroemde *stof-vormleer* (hylemorfisme) van Aristoteles. Volgens deze leer zijn aan iedere substan-

tie *twee* aspecten te onderscheiden, namelijk enerzijds de "materia prima" en anderzijds de "zijnsvorm" of "forma substantialis". Dit moet niet zo opgevat worden dat oerstof en zijnsvorm ook los van elkaar zouden kunnen bestaan. De oerstof is zelf totaal ongedifferentieerd en kan alleen voorkomen wanneer zij nader bepaald wordt door een zijnsvorm (bijvoorbeeld die van water, goud, etc). Men zou dus kunnen zeggen dat de materia prima *zuiver potentieel-zijn* is. In alle actueel voorkomende substanties is dit potentieel zijnde geactualiseerd door een forma substantialis. De oerstof is het gemeenschappelijke in alle substanties; als er niet zo iets gemeenschappelijks was zou de mogelijkheid van overgangen van de ene substantie naar de andere volgens Aristoteles niet kunnen worden begrepen. Hoe en of zo'n overgang nu feitelijk tot stand komt, of dit snel dan wel langzaam gebeurt, e.d., wordt bepaald door de relaties tussen de verschillende zijnsvormen.

Het bovenstaande betreft de algemene conceptuele hulpmiddelen die Aristoteles nodig acht om tot een verklarende wetenschap van de natuur te kunnen komen. Daarnaast stelt hij specifieke principes voor om bepaalde klassen van natuurverschijnselen te verklaren. Voor de verklaring van beweging (mechanica) postuleert Aristoteles o.a. de volgende uitgangspunten.

1. We moeten onderscheiden tussen *natuurlijke* en *gedwongen* bewegingen; zware lichamen bewegen zich *van nature* naar beneden (d.i. het middelpunt van het Heelal, tevens middelpunt der Aarde), lichte objecten naar boven; andere bewegingen worden alleen onder dwang uit gevoerd.
2. Gedwongen beweging wordt verklaard door de aanwezigheid van een bewegende kracht, die met het bewogen object verbonden is (actio in distans is ondenkbaar). Als de kracht ophoudt te werken, keert het object tot zijn natuurlijke gedrag terug. Het effect van een kracht is omgekeerd evenredig met de weerstand die het object bij zijn beweging door een medium moet overwinnen.

Opgaven.

1. Analyseer Aristoteles' overwegingen die hem voerden tot de introductie van een "materia prima". Is volgens jou verandering ook denkbaar zonder zo'n behouden oerstof?
2. Probeer Zeno's paradox van de pijl te ontzenuwen met behulp van de door Aristoteles ingevoerde begrippen.

3. Aristoteles is in staat te *bewijzen* dat een vacuüm niet mogelijk is; dit bewijs is gebaseerd op het tweede bovengenoemde mechanische principe. Kun je dat bewijs reproduceren?

1.4 Betekenis en invloed van de Aristotelische natuurfilosofie

Hoewel natuurlijk lang niet alle aspecten van de Aristotelische natuurfilosofie in de voorgaande korte samenvatting aan de orde zijn geweest, zullen een aantal karakteristieke kenmerken toch duidelijk geworden zijn. De Aristotelische natuurwetenschap is *systematisch*. Wetenschappelijke uitspraken onderscheiden zich van louter meningen doordat ze hetzij *bewijsbaar* zijn, volgens strenge bewijsregels, hetzij direct inzichtelijk voor de menselijke rede. In dit laatste geval gaat het echter niet om aangeboren kennis. Alle algemene principes moeten worden afgeleid uit de ervaring. Pas wanneer kandidaten voor de axioma's op deze manier door inductie gevonden zijn, komt de rede in het spel om de juiste uit te kiezen. De Aristotelische wetenschap stelt zich ten doel *verklaringen* te geven, en tot *begrip* te leiden, door alle verschijnselen terug te voeren op basisprincipes, axioma's die voor het verstand onmiddellijk acceptabel en vanzelfsprekend zijn.

De begrippen die Aristoteles nodig acht, als instrumentarium, om dit doel te bereiken zijn uiterst algemeen en plooibaar; bovendien sluiten ze goed aan bij de alledaagse intuïtie. Oerstof en zijnsvorm, potentie en act, accidentele en essentiële eigenschappen zijn concepten waarvan niet snel zal blijken dat ze ergens niet toepasbaar zijn. Dit hangt ermee samen dat het *kwalitatieve* begrippen zijn. Ze zijn bedoeld om een conceptueel kader te scheppen waarbinnen verandering, veelheid, etc, *begrijpelijk* en *denkbaar* worden, en niet om een aansluiting bij kwantitatieve metingen te vinden. Dit is een kenmerk van de Aristotelische (en meer in het algemeen de Klassieke) natuurwetenschap. De wetenschap dient ter bevrediging van het begrip; het is de bedoeling tot "het wezen" van de natuurprocessen door te dringen. Het ligt voor de Klassieke denkers totaal niet voor de hand om dit in verband te brengen met precieze, kwantitatieve, voorspellingen of gericht experimenteren. Wanneer sprake is van "waarnemingen" moet dan ook altijd gedacht worden aan het oplettend gadeslaan van de natuur zoals die zich in het dagelijks leven aan ons manifesteert.

Een onmiddellijke consequentie van het laatste is dat de Aristotelische natuurwetenschap weliswaar op de empirie steunt, maar dat dit de empi-

rie is van wat wij tegenwoordig de voorwetenschappelijke ervaring zouden noemen. Dit is natuurlijk niet anders dan te verwachten voor een natuurwetenschap in zijn aanvangsstadia. Binnen de Aristotelische wetenschapsleer zit er echter het gevaar in dat aan de dagelijkse praktijk ontleende intuïties verabsoluteerd worden tot voor ééns en altijd geldige waarheden. Het rationalistische element in de Aristotelische leer heeft immers de functie absoluut ware basisprincipes te herkennen.

De Aristotelische opvattingen verwierven, vooral door hun systematische en algemene karakter, brede aanhang. Door de vestiging van het Romeinse Rijk vonden ze vooral in het oostelijk Middellandse-Zeegebied ruime verbreiding (Alexandrië). In het Westen was de wijsgerige belangstelling meer ethisch dan natuurfilosofisch gericht, vooral na de opkomst van het christendom. Voorzover de Kerkvaders trachtten een systematische christelijke filosofie uit te werken, stond die dichter bij de Platoonse traditie dan bij de Aristotelische. Dit ligt voor de hand, want de Platoonse visie leent zich makkelijk voor een religieuze interpretatie. Zo kunnen de Ideeën opgevat worden als Ideeën van God. Het door Plato aanbevolen "schouwen met het geestesoog" kan worden vervangen door de verlichting (illuminatie) die de mens door goddelijke inspiratie ten deel kan vallen. Vooral de Kerkvader Augustinus (354-430) heeft op deze wijze een neo-Platoonse christelijke filosofie ontwikkeld, die grote invloed heeft gehad. De eeuwen van verval na de neergang van het Westromeinse Rijk zorgden echter voor achteruitgang op wetenschappelijk en filosofisch terrein. Het contact met de originele Klassieke geschriften ging voor een groot deel verloren; de kennis van het Grieks werd zeldzaam in het Westen. Van de werken van Aristoteles bleef slechts een klein deel bekend, waaruit niet afgeleid kon worden hoe veelomvattend en streng zijn totale stelsel was. Hieraan kwam een eind toen de westelijke wereld via contact met de Arabieren (in Spanje en Zuid-Italië) vanaf de 11^e eeuw weer kennis kreeg van de Aristotelische wijsbegeerte (en de commentaren die daarop in de Arabische wereld waren gegeven). Deze hernieuwde kennismaking maakte grote indruk. Weliswaar waren er in het begin hindernissen te overwinnen van de kant van de kerkelijke autoriteiten -de Platoonse filosofie was immers met het christendom geassocieerd geraakt - maar in de 13^e eeuw wisten de "leermeesters van de Kerk" Albertus Magnus (gest. 1280) en vooral Thomas van Aquino (1227-1274) ervoor te zorgen dat een christelijk-Aristotelische filosofie de belangrijkste richting werd in de middeleeuwse christelijke wijsbegeerte (de z.g. scholastiek). Bij dit laatste moet bedacht worden dat in de middeleeuwen vrijwel geen sprake kon zijn van een zelfstandige wetenschap of wijsbegeerte; alles stond in directe relatie

tot de theologie.

Opgave. Denk na over de vraag of de natuurwetenschap als eerste taak heeft *begrip* te verschaffen. Wat betekent het volgens jou om iets te "begrijpen"; wat voor eisen zou je zelf willen stellen aan een bevredigende "verklaring"?

1.5 De Thomistische wijsbegeerte

Het door Thomas van Aquino ontwikkelde stelsel is enerzijds gebaseerd op de Aristotelische wijsbegeerte, zoals die door Arabische auteurs overgeleverd was, en anderzijds op in het christendom algemeen geaccepteerde inzichten. Het gaat om een zelfstandige Aristoteles-interpretatie; het overgeleverde wordt niet geheel kritiekloos overgenomen. Later is dit z.g. Thomisme tot officiële filosofie van de Rooms-katholieke kerk verheven (eind 19^e eeuw). In de Thomistische wijsbegeerte wordt aan de natuurfilosofie weer een volwaardige plaats toegekend. Fundamenteel is daarbij voor Thomas de gedachte dat de Openbaring en de Kerkelijke leer nooit met de empirische studie van de natuur in conflict kunnen komen; er is immers slechts één Waarheid, die God ons langs verschillende wegen laat benaderen. Uitspraken die in de natuurwetenschap kunnen worden bewezen zullen daarom nooit strijdig zijn met wat in de Bijbel te lezen is. Hoogstens kan een *schijnbare* tegenspraak ontstaan, die dan berust op een verkeerde interpretatie onzerzijds.

In de bijbel komen enkele passages voor die uitspraken over de aard van de fysische werkelijkheid lijken te impliceren - later zullen deze een rol gaan spelen in de strijd om het Copernicaanse wereldbeeld. Omdat het Aristotelische wereldbeeld direct aansluit bij de dagelijkse ervaring, hetgeen ook van het bijbelse wereldbeeld kan worden gezegd, zijn er niet zulke grote problemen in het geven van een Aristotelische interpretatie aan die passages, die overigens geen samenhangend geheel vormen. Desalniettemin is de totale Aristotelische kosmologie zeker niet zonder meer in de bijbel terug te vinden. Een duidelijke tegenspraak is zelfs aan te wijzen tussen enerzijds het christelijke scheppingsidee en anderzijds Aristoteles' stelling dat de wereld eeuwigdurend is. Thomas van Aquino volgde Aristoteles niet op dit punt, omdat hij vond dat Aristoteles geen werkelijk bewijs van de stelling geleverd had (een voorbeeld van de kritische verwerking van de Aristotelische ideeën).

De Aristotelische natuurfilosofie zelf heeft een empiristische inslag. In de Middeleeuwen raakt dit aspect enigszins op de achtergrond. Men meent algemeen dat de Klassieke denkers de waarheid al ontdekt hadden en dat

het er nu in de eerste plaats om gaat deze wetenschap te reconstrueren uit de nieuw beschikbaar gekomen bronnen. Het empirisch aspect wordt zo als het ware verlegd naar het opsporen en onderzoeken van nieuwe teksten; het waarnemen van de natuur zelf is, zo denkt men, grotendeels al door Aristoteles en zijn commentatoren gedaan - wie zou hen kunnen verbeteren? Het blijft echter ook in de Thomistische wijsbegeerte zo dat de natuurfilosofie *bewijsbaar* ware uitspraken over de natuur oplevert, die in laatste instantie op door de waarneming geïnspireerde axioma's berusten.

1.6 Het nominalistisch verzet; opkomst van het empirisme

Hoewel de confrontatie tussen de Aristotelische kenleer en christelijke opvattingen vanaf het begin niet geheel wrijvingsloos verliep - daarvoor waren er toch te veel verschilpunten - ontstond pas aan het eind van de 13^e eeuw en in de 14^e eeuw een sterke tegenbeweging, die een heel andere kijk op de menselijke kennis propageerde dan het Thomisme. Kenmerkend voor het Thomisme is het samengaan van wetenschap en theologie; wat de natuurwetenschap kan bewijzen moet ook vanuit het standpunt van de theologie waar zijn. Door veel theologen werd dit als een onaanvaardbare beperking van Gods almacht gevoeld.

Stel dat bewezen kan worden dat een vacuüm niet mogelijk is; blijkbaar volgt daaruit dat God geen volledige vrijheid bezat bij de schepping van de wereld. Volgens de bedoelde theologen is het een onduidelijke pretentie aan de mens vermogens van inzicht en redenering toe te dichten die het mogelijk zouden maken restricties op Gods vrijheid af te leiden. Gods almacht is onbeperkt; informatie over het wezen van de natuur kan slechts via Goddelijke inspiratie verkregen worden. Dit betekent dat de Aristotelische bewijzen, die er toe moesten dienen slechts één stand van zaken als fysisch mogelijk af te schilderen, fundamenteel incorrect moeten zijn. Dit leidt dan vervolgens weer tot een analyse van wat de op waarneming berustende natuurkennis wél vermag en wat de status ervan is.

Eén van de belangrijkste vertegenwoordigers van de niet-Aristotelische zienswijze is Willem van Ockham (± 1280 - ± 1349). Volgens hem is God te beschouwen als volkomen vrij handelend, met onbeperkte vermogens. Dat wil o.a. zeggen dat God in staat is alle waarneembare verschijnselen hetzelfde te laten, terwijl Hij daar heel andere fundamentele processen aan ten grondslag legt. God is zo bijvoorbeeld in staat bij dezelfde verschijnselen mét en

zónder een stof-vorm schema te werken. Eveneens is het hem mogelijk dingen uit het niets te scheppen en in het niets te laten verdwijnen; kortom, om alle Aristotelische denkprincipes te schenden. Hieruit volgt dat waarneming van de verschijnselen ons nooit verder kan leiden dan de verschijnselen zelf. Het wezen, en de oorzaken, van de verschijnselen zijn niet door observatie af te leiden. Dit leidt tot een *radicaal empirisme*. De natuurwetenschap dient slechts het al dan niet tezamen voorkomen van waarneembare grootheden te registreren, en heeft niet als taak begrip te verschaffen, of tot het wezen der dingen door te dringen.

Interessant is Ockhams analyse van *causale relaties*, d.w.z. relaties van *oorzaak* en *gevolg*. Het enige dat wij *waarnemen* is dat telkens als gebeurtenis A zich voordoet, ook gebeurtenis B zich voltrekt. Een eventueel aanwezig noodzakelijk verband tussen A en B, het door A produceren van B, zien we niet zelf. Stel dat we waarnemen dat telkens als een stuk papier in de haard wordt gestoken, het vlam vat. We zien *niet* dat het vuur in de haard het vlamvatten *veroorzaakt*, het zou best zo kunnen zijn dat God steeds helemaal onafhankelijk van het haardvuur het papier in brand liet vliegen. Daaruit volgt dat de natuurwetenschap, die zich op waarnemingen baseert, zich alleen met causale relaties in de vorm van *correlaties tussen waarneembare grootheden* kan bezig houden. Een eventueel aanwezig innerlijk noodzakelijk verband tussen oorzaak en gevolg is voor de natuurwetenschap niet toegankelijk.

Beroemd geworden is het methodologisch principe dat bekend staat als "Ockhams scheermes" (Ockham's razor). Dit principe zegt dat de natuurwetenschap in de theoretische behandeling van de verschijnselen zo zuinig mogelijk te werk moet gaan; er mogen geen grootheden ingevoerd worden die ook gemist hadden kunnen worden. Latere schrijvers hebben dit principe vaak verdedigd met een beroep op de essentiële eenvoud van de natuur. Dat is echter niet in overeenstemming met Ockhams radicaal empiristische standpunt. We kunnen immers op grond van de waarneming helemaal niet weten of de wereld essentieel simpel of gecompliceerd is. God kan best aan de oppervlakte eenvoudige verschijnselen te weeg brengen via zeer gecompliceerde onderliggende mechanismen. We krijgen hier te maken met een onderscheid tussen *ontologie* (leer die erover gaat hoe de wereld werkelijk in elkaar zit) en *methodologie*. Ockhams scheermes heeft geen ontologische pretenties - de natuurwetenschap heeft zich zelfs helemaal niet met ontologie bezig te houden. Het gaat er alleen maar om zo efficiënt mogelijk de verschijnselen met elkaar in verband te brengen, en daarvoor is "het scheermes" een onmisbaar *methodologisch* principe. We zien hier dat methodologische regels niet altijd

met het zoeken van fundamentele waarheid te maken hoeven te hebben. In een radicaal empiristische positie a la Ockham is de wetenschap niet uit op het vinden van "waarheid"; de methodologische regels hebben daarom een pragmatische strekking.

Ockham is een representant van het *nominalisme*. Deze stroming ontleent zijn naam aan de oplossing die voorgesteld wordt voor het z.g. universalien-probleem. Het gaat in dit probleem om de status van onze algemene begrippen (universalien), waaronder vele afzonderlijke individuen kunnen vallen (Paard, Hond, Mens, etc). Plato meende dat deze begrippen een zelfstandig bestaan leiden in een eigen Ideeënrijk. Aristoteles meende dat ze corresponderen met een levensvorm, een bouwplan, dat in ieder van de afzonderlijke individuen die onder het begrip vallen aanwezig is. De nominalisten nemen een radicaal verschillend standpunt in. Zij menen dat het onmogelijk is iets te weten te komen over essentiële kenmerken van de natuur; die pretentie moeten wij daarom ook niet hebben. De algemene begrippen die wij hanteren zijn niets anders dan *namen* (*nomina*, vandaar nominalisten) die wij geven aan individuen die in een aantal opzichten op elkaar lijken. Het bruikbaar zijn van zo'n naam hoeft echter helemaal niet te betekenen dat er een gemeenschappelijke zijnsvorm (essentie) is in de dingen die erdoor worden aangeduid.

Hoofdstuk 2

Empirisme, rationalisme en methodologie van Renaissance tot de 19-de eeuw

In de 15^e eeuw komt steeds sterker het verlangen naar voren direct kennis te maken met de werken van de Klassieke schrijvers, buiten de Arabische commentaren en de toevoegingen van de scholastiek om. Voor de ontwikkeling van de natuurwetenschappen was deze Renaissance (d.w.z. hergeboorte, namelijk van de Klassieke cultuur) met zijn sterke gerichtheid op de Antieke geschriften, maar nu in gezuiverde vorm, geen directe stimulans. Wel waren er op indirecte wijze positieve invloeden. Algemeen brak als gevolg van de confrontatie met de verscheidenheid aan klassieke opvattingen het besef door dat de scholastieke schema's slechts *voorbeelden* van mogelijke zienswijzen waren. Dit leidde tot een verminderd autoriteitsgeloof. Verder had de hernieuwde kennismaking met Plato, en het beschikbaar komen van de werken van Archimedes, tot gevolg dat de aandacht en waardering voor de wiskunde toenamen. Dit speelde een grote rol bij de vernieuwingen in de natuurwetenschappen die vooral in de 16^e en 17^e eeuw plaatsvonden (de 17^e eeuw wordt wel de eeuw van de Wetenschappelijke Revolutie genoemd).

2.1 Het Copernicaanse stelsel: waarheid of instrument?

Copernicus (1473-1543) brak met het in de middeleeuwen in de christelijke filosofie geïncorporeerde Aristotelische-Ptolemaeïsche stelsel dat de Aarde in het centrum van het heelal plaatst. In de Klassieke literatuur zijn hiervoor precedentes aan te treffen, waar Copernicus ook naar verwijst. Copernicus werkt het idee echter technisch uit en ontwerpt zo een systeem dat net zo goed als het Ptolemaeïsche de waargenomen posities van Zon en planeten aan de hemel recht kan doen. Dat wil zeggen: de reeds waargenomen posities, en hun onderlinge relaties, passen in het stelsel en bovendien zijn precieze voorspellingen van toekomstige posities mogelijk (die overeenkomen met de Ptolemaeïsche voorspellingen). Copernicus meent nu dat de harmonie, de mathematische elegantie, en de passende centrale plaats van de Zon in zijn stelsel sterke aanwijzingen, ja zelfs bewijzen, zijn dat het stelsel de *waarheid* representeert. Het Copernicaanse stelsel geeft dus in deze opvatting weer hoe de kosmos *werkelijk* in elkaar zit; de Aarde *beweegt echt*, etc. Hiermee ontstaat dan de moeilijkheid dat de Bijbel op een aantal plaatsen iets anders lijkt te leren. Zo staat in het Oude Testament een passage waarin Josua, om de dag te verlengen en zo een veldslag tot een beter eind te kunnen brengen, uitroept: "Zon, sta stil!". En de Zon stond stil, als gevolg van Goddelijke tussenkomst. Copernicus en zijn aanhangers reageren hierop door te stellen dat de Bijbel geen natuurkundeboek is, maar ten doel heeft duidelijk te maken hoe de mens op de juiste wijze leven moet. In taalgebruik, en in de beelden die worden gebruikt, past de Bijbel zich aan aan wat de toehoorders vertrouwd is, om op die manier zo efficiënt mogelijk de religieuze boodschap te kunnen overbrengen. Dat betekent dat als de fysica op grond van observatie en redenering in staat is uitspraken te *bewijzen* die in strijd zijn met formuleringen in de Bijbel, de interpretatie van zulke Bijbelse passages (die dan blijkbaar niet letterlijk mogen worden genomen) moet worden aangepast.

Copernicus' hoofdwerk, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, verscheen postuum in 1543. De Duitse theoloog Osiander verzorgde de laatste fases van de uitgave. Omdat hij problemen voorzag bij het bekend worden van Copernicus' opvattingen, schreef hij een voorwoord voor het werk, dat er anoniem aan werd toegevoegd. In dit voorwoord verklaart Osiander dat er geen reden is om ongerust te zijn; het nieuwe stelsel trekt via de Openbaring tot ons gekomen kennis over de wereld niet in twijfel. Het is immers slechts

de taak van de astronoom stelsels te ontwikkelen waarbinnen de waarnemingen met hun onderlinge relaties passen en waarmee voorspellingen kunnen worden gedaan. Dit is precies wat Copernicus heeft gedaan. De astronoom, zegt Osiander, baseert zich in zijn werk op waarnemingen. Daaruit volgt al dat hij nooit tot het wezen van de natuur en de ware oorzaken van de verschijnselen kan doordringen. Er zijn immers altijd meer stelsels die *dezelfde* verschijnselen kunnen behandelen. Omdat de astronoom geïnteresseerd is in een zo efficiënt mogelijke ordening van de verschijnselen, zal hij geneigd zijn te kiezen voor het eenvoudigste stelsel. Maar dit is een zuiver methodologische beslissing, die niets met de waarheid van het gekozen systeem te maken heeft. De waarheid omtrent de wereld kan nooit uit waarnemingen worden afgeleid, maar kan slechts door Goddelijke openbaring tot ons komen. Het Copernicaanse stelsel is een waardevolle toevoeging aan het astronomische instrumentarium - het doet goede diensten bij het samenstellen van tabellen van maanstanden, e.d. - maar zegt niets over de vraag of de Aarde al dan niet werkelijk beweegt.

Opgave. Probeer je een oordeel te vormen over de merites van de standpunten van Copernicus en Osiander. Wie van beiden staat het dichtst bij het radicaal empirisme (vergelijk het nominalisme uit hoofdstuk I)?

2.2 Realisme en instrumentalisme

In de strijd om de betekenis van het Copernicaanse stelsel komt een algemeen wetenschapsfilosofisch probleem naar voren, dat ook al schuil ging achter veel van wat in hoofdstuk I werd besproken. De kwestie is of een natuurwetenschappelijke theorie een beschrijving geeft van de werkelijkheid, ook voor zover die niet direct waargenomen wordt, of dat de theorie slechts een instrument is dat gebruikt wordt voor het doen van voorspellingen. In het eerste geval heeft het zin de vraag te stellen of de theorie "waar" is, d.w.z. een getrouwe beschrijving geeft van hoe de natuur werkelijk is. In het tweede geval heeft die vraag geen zin. Een instrument is niet "waar" of "onwaar", maar slechts meer of minder bruikbaar, handig of efficiënt. Als men meent dat theorieën inderdaad al dan niet ware beschrijvingen leveren, hanteert men een *realistische* interpretatie van theorieën. Beschouwt men een theorie alleen als instrument, dan stelt men zich op het standpunt van het *instrumentalisme*.

In het voorbeeld van het Copernicaanse stelsel gaat het erom dat de

waarnemingen slechts betrekking hebben op de *relatieve* posities en bewegingen van planeten en Zon. Een *absolute* beweging van Aarde of Zon wordt niet zelf waargenomen. De Copernicaanse en Ptolemaeïsche stelsels doen over die absolute beweging echter wel uitspraken, althans als de stelsels realistisch worden geïnterpreteerd. Omdat die uitspraken conflicteren, kan hoogstens één van de stelsels waar zijn. De strijd van het Copernicaanse tegen het Ptolemaeïsche stelsel is dus zinvol tegen de achtergrond van een realistische wetenschapsopvatting. Gezien vanuit een instrumentalistisch perspectief wordt hier in het geheel geen zinvol debat gevoerd. *Beide* stelsels zijn afdoende als het gaat om de voorspellingen van de posities aan de hemel; hoogstens kan, afhankelijk van het toepassingsgebied, om *practische redenen* het ene systeem boven het andere verkozen worden. Waarheid is dert echter niet in het geding.

We zullen zien dat het conflict tussen realisme en instrumentalisme in de verdere geschiedenis van de natuurwetenschap telkens weer zijn kop opsteekt. Een daarbij steeds terugkerend probleem voor het realisme is dat er altijd meer theorieën te bedenken zijn bij dezelfde waarnemingsgegevens. Boven zagen we een voorbeeld in de stelsels van Copernicus en Ptolemaeus; er zijn echter nog andere stelsels die hetzelfde presteren, bijvoorbeeld de door Tycho Brahe (1564-1601) voorgestelde tussenvorm. Het is niet moeilijk in te zien dat er op analoge manier zelfs oneindig veel van zulke "observatio-neel equivalente" systemen kunnen worden gevonden. Als dat het geval is, kunnen de waarnemingen blijkbaar de klasse van mogelijke theorieën slechts relatief weinig inperken. Hoe kunnen we dan, als toch slechts hoogstens één theorie de ware is (de realistische visie), ooit uitvinden welke dat is? Blijkbaar schieten de naakte waarnemingen tekort om zo'n beslissing te forceren. Er moeten kennelijk andersoortige principes in het spel komen. Inderdaad zien we dat Copernicus, en na hem ook Kepler (1571-1630), redeneert op grond van overwegingen van schoonheid, eenvoud, elegantie e.d. De vraag is dan natuurlijk wat de status is van zulke overwegingen. Volgens radicaal empiristen en instrumentalisten zijn ze van zuiver methodologische aard, en is het een misvatting te menen dat ze ons op weg kunnen helpen naar de waarheid. De realisten zijn genoodzaakt om hun toevlucht te nemen tot een niet geheel empiristische kenleer, als ze bewijskracht willen toekennen aan principes als eenvoud en schoonheid die het verstand als redelijk voorkomen. Er kan dan ook worden geconstateerd dat veel realisten, ook als ze bereid zijn een grote rol toe te kennen aan waarneming en experiment, een kenleer hanteren die Aristotelische trekjes vertoont.

Daarbij kan nog worden opgemerkt dat bij bestudering van de geschie-

denis van de natuurkunde blijkt dat veel fysici in de praktijk een realistisch standpunt innemen. In de discussies over de geldigheid van het Copernicaanse stelsel blijkt dat ook. Geen van de onderzoekers die aan deze discussies deelnemen meent dat het een zaak van lood om oud ijzer is en dat de twee stelsels eigenlijk equivalent zijn. Integendeel, er wordt met grote hartstocht gestreden teneinde een beslissing te weeg te brengen. De instrumentalistische visie wordt in dit historisch geval vooral naar voren gebracht door theologen, die zelf niet actief aan het onderzoek deelnemen. Deze laat-sten beperken hun instrumentalistische visie trouwens tot wetenschappelijke kennis. Als het gaat om kennis in het algemeen, menen ook zij dat er slechts één waarheid is, die volgens hen in de bijbel wordt geopenbaard. Zij ontkennen dus uitsluitend dat het *typisch wetenschappelijke redeneren*, gebaseerd op waarneming en rede, tot waarheid kan leiden; de zinvolheid van het begrip "waarheid" op zich, of de kenbaarheid van de waarheid, is ook bij hen niet in het geding.

2.3 De Wetenschappelijke Revolutie: een nieuw empirisme

In de 17^e eeuw worden de uitgangspunten geformuleerd van wat wij nu de "klassieke fysica" noemen. Het gaat daarbij allereerst om de beginselen van de klassieke mechanica. Belangrijke bijdragen werden hieraan geleverd door o.a. Galilei (1564-1642), Descartes (1596-1650) en Huygens (1629-1695). De ontwikkeling culmineerde in Isaac Newtons (1642-1727) beroemde *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*, dat in 1687 verscheen. Hierin vinden we de mechanische hoofdwetten die ook nu nog het vak "klassieke mechanica" bepalen. Behalve deze zuiver inhoudelijke ontwikkeling laat de 17^e eeuw ook grote activiteit zien op het terrein van de filosofische en methodologische beschouwingen over de natuurwetenschappen. Er komt een nieuw empirisme op, min of meer parallel aan de ontdekking van nieuwe natuurkundige theorieën. Een bekend propagandist voor dit empirisme is Francis Bacon (1561-1626).

Karakteristiek voor het filosofisch klimaat waarin de moderne natuurkunde ontstaat is het afwijzen van de Aristotelische gedachte dat door het opgeven van een "vorm" of "essentie" tot het wezen der dingen kan worden doorgedrongen. Deze gedachte was al aan te treffen bij de middeleeuwse nominalisten, maar blijktbaar is in de 16^e en 17^e eeuw de tijd pas echt rijp voor het uitwerken ervan. Steeds algemener wordt nu als een bezwaar tegen

de Aristotelische wetenschapsleer gevoeld dat vaak volstaan wordt met het geven van een *naam* aan een veronderstelde essentie, zonder dat feitelijk iets aan onze kennis wordt toegevoegd. Zo werd in de scholastische natuurwetenschap ter verklaring van het gedrag van magneten aangevoerd dat het tot de essentie van een magneet behoorde dat hij een zekere "sympathie" bezat voor bijvoorbeeld ijzervijlsel. De behoefte aan een verklaring voor het empirische feit dat een magneet ijzervijlsel aantrekt werd hier blijkbaar door bevredigd. In de 17^e eeuw zijn zulke verklaringen langzamerhand tot een mikpunt van spot geworden. Molière voert in zijn stuk "De ingebeelde zieke" (1673) een arts ten tonele, als personificatie van aanmatiging en schijngeleerdheid, die op de vraag hoe het komt dat opium slaapverwekkend is, antwoordt dat dit een gevolg is van de "virtus dormitiva" van het opium (d.i. Latijn voor "slaapverwekkend vermogen"). Kennelijk kon veilig aangenomen worden dat dit op de lachspieren van de toeschouwers zou werken.

Bij de grondleggers van de klassieke natuurkunde is een veranderde houding ten aanzien van de Aristotelische Vormenleer duidelijk constateerbaar. Zo zegt Galileï dat het weliswaar niet uitgesloten is dat de mens ooit zal doordringen tot het diepste wezen van de verschijnselen van val en worp, en hun ware oorzaken, maar dat de natuurkundige in ieder geval nog niet toe is aan de bestudering van dat soort vragen. Er dient eerst pragmatisch vastgesteld te worden *hoe* objecten vallen, bijvoorbeeld hoe hun snelheid als functie van de afgelegde weg is te schrijven, voordat de diepere *waarom*-vragen aan de orde kunnen komen. Er komt hier een zienswijze naar voren die we bij veel 17^e-eeuwse natuuronderzoekers aantreffen: de vraag naar Aristotelische essenties wordt niet principieel verworpen, maar men stelt zich op het standpunt dat een veel grotere empirische kennis dan feitelijk voorhanden nodig is om met succes een Aristotelische "inductie" te kunnen volvoeren. De Antieke en middeleeuwse natuurwetenschap zijn veel te snel geweest met het trekken van hun conclusies.

Op een klein aantal al goed bekende terreinen van eenvoudige verschijnselen is het volgens sommige 17^e-eeuwse fysici en filosofen, die zich afzetten tegen de "occulte" (d.w.z. niet met duidelijke, waarneembare zaken corresponderende) verklaringen van de scholastiek, echter al wél mogelijk tot essentieel inzicht en op basis daarvan tot volkomen begrip van de verschijnselen te komen. Het gaat dan in het bijzonder om de essentiële kenmerken van de materie, zoals die zich tonen in eenvoudige mechanische processen (denk aan het botsen van twee biljartballen). Descartes meent te kunnen beredeneren dat de essentie van de materie gelegen is in zijn *extensie* (de afmeting, in meetkundige zin) en zijn *ondoordringbaarheid*. Het op elkaar

stoten en kaatsen van ondoordringbare deeltjes is in deze visie hét voorbeeld van een verschijnsel dat voor de menselijke rede inzichtelijk is en geen verdere verklaring vereist. Een scholastische verklaring voor de werking van een magneet, zoals boven vermeld, die gebruikt maakt van "occulte kwaliteiten" als sympathie van de magneet voor het ijzer, moet daarom vervangen worden door een verklaring in termen van botsende deeltjes in het medium tussen magneet en ijzer. Alleen zó kan de "aantrekking" echt begrepen worden. Descartes heeft gedetailleerde modellen ontworpen om de magnetische, en ook de gravitationele, verschijnselen te verklaren door middel van stromen en wervels van zeer fijne, zelf niet waarneembare deeltjes.

In dit programma wordt Descartes gevolgd door onze landgenoot Huygens. Huygens wijst in het bijzonder het idee van een "actio in distans" (werking op afstand) af; zo'n werking op afstand gebruiken als verklarend principe zou een terugval betekenen in de praktijken van de scholastiek, waarin op ieder verschijnsel een welluidend etiketje geplakt werd. Het typerende verschil tussen de middeleeuwse en de moderne natuurkunde is nu juist, zegt Huygens, dat zulke nietszeggende "diepere kwaliteiten", "essenties", etc, verworpen worden. Alleen datgene wat écht duidelijk is kan behouden blijven. Dit laatste moét ook behouden blijven, want het blijft zo dat de natuurkunde uit is op het geven van *verklaringen* voor de verschijnselen en het verschaffen van *begrip*. Het geven van functionele afhankelijkheden tussen waarneembare grootheden kan daarom nooit een einddoel zijn van de fysica. Zo'n functionele afhankelijkheid levert alleen een beschrijving op van het *hoe* van een verschijnsel en zegt niet *waarom* het verschijnsel zich zo en niet anders afspeelt. Ook bij Huygens zien we dus impliciet een beroep op zelfevidente eerste beginselen, al geeft hij, net als Galileï, zeer veel aandacht aan een nauwkeurige empirische studie en een exacte wiskundige beschrijving van de verschijnselen; op deze laatste terreinen heeft hij zelf grote bijdragen geleverd.

Een soortgelijk afwijzen van het begrip "actio in distans", en ook van het begrip "absolute, ledige ruimte" (d.w.z. ruimte die niet geïnterpreteerd kan worden in termen van posities en bewegingen van materiële lichamen ten opzichte van elkaar) is aan te treffen bij Leibniz (1646-1716), een universeel geleerde die belangrijke bijdragen leverde aan wiskunde, logica, natuurkunde en filosofie.

2.4 Wetenschap en wetenschapsleer van Newton

Newton formuleert in zijn "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" (wiskundige beginselen van de natuurfilosofie) de drie bewegingswetten -de traagheidswet, de krachtwet en het principe "actie = - reactie" - en de universele gravitatiewet; hij brengt daarmee de voorgaande ontwikkeling tot een hoogtepunt en fundeert de klassieke mechanica. Belangrijk hier is vooral de positie die Newton inneemt met betrekking tot de vraag wat het doel is van de natuurkunde (moet de natuurkunde *verklaren!*) en hoe dit doel kan worden bereikt.

Newton laat zich in de "Principia" expliciet uit over de in de natuurkunde te volgen methode; in opeenvolgende drukken van het werk past hij deze passages zelfs steeds aan, waaruit blijkt dat dit onderwerp hem ter harte ging. Newton spreekt over de natuurkunde als "experimentele filosofie". Ongeveer zoals Bacon, die stelde dat natuurwetten direct uit lange lijsten van waarnemingsgegevens volgen als gelet wordt op verschillen en overeenkomsten, meent ook hij dat "fysische proposities worden afgeleid uit de verschijnselen en door inductie worden generaliseerd. Zo zijn de ondoordringbaarheid, de beweegbaarheid en de impetus der lichamen, de bewegingswetten en de gravitatiewet bekend geworden." Het is de taak van de natuurkunde zich ook te *beperken* tot dat wat uit de verschijnselen afleidbaar is. De natuurkundige moet geen "hypothesen" verzinnen ter verklaring van wat hij waarneemt, tenzij natuurlijk die hypothesen slaan op iets dat zelf waarneembaar is (maar dan is er geen sprake van het "verzinnen" van hypothesen). Hiermee keert Newton zich tegen Huygens, Leibniz en Descartes, die allen op de proppen kwamen met "verzonnen" beelden ter verklaring van de waargenomen zwaartekrachtsverschijnselen. Zolang het *mechanisme* van de zwaartekracht niet zelf door waarnemingen toegankelijk is gemaakt, dient de natuurkundige zich te bepalen tot een nauwkeurige, zo mogelijk mathematische, behandeling van die verschijnselen *zelf*. Deze positie staat dicht bij de eerder door Galileï ingenomene. Newton kenschetst hem kort in de beroemd geworden spreuk: "hypotheses non fingo" (hypothesen verzijn ik niet). Toch meent ook hij dat de gravitatiewet die door hem geformuleerd wordt (de $1/r^2$ -wet) vanwege zijn "actio-in-distans" karakter geen bevredigende *verklaring* kan leveren van de verschijnselen. Zo'n verklaring zou het *mechanisme* van de krachtoverbrenging zichtbaar moeten maken. Hier is ook bij Newton afiniteit tot het Aristotelische verklaringsidee te bespeuren (zoals trouwens

ook op andere plekken, bijvoorbeeld in de formulering van de traagheidswet, de invloed van het Aristotelische denken duidelijk zichtbaar is). Newton zegt echter nadrukkelijk dat de beschrijving van zo'n mechanisme pas in de natuurkunde mag worden toegelaten als zij uit waarnemingen kan worden afgeleid.

Belangrijk is het antwoord dat Newton geeft op het verwijt van Huygens en anderen dat zijn zwaartekrachtswerking-op-afstand een terugval betekent in de scholastische verklaringen met occulte kwaliteiten. Dit verwijt zou alleen terecht zijn, zegt Newton, als hij zich zou beperken tot uitspraken als "zware lichamen vallen door de zwaartekracht". In werkelijkheid doet hij echter veel verdergaande uitspraken: hij kan precies voorspellen *hoe* een lichaam valt. De $1/r^2$ -wet is een *kwantitatieve wet* die een precieze mathematische beschrijving van de beweging mogelijk maakt. De naam "zwaartekracht" zelf heeft *geen* verklarende kracht, in tegenstelling tot de Aristotelische "vormen". De kwantitatieve wet is waar het om draait, ongeacht welke naam we eraan geven.

In de tweede editie van de "Principia" verschijnen voor het eerst twee "Regulae philosophandi" (regels voor het filosoferen = de te volgen methode in de natuurkunde; in de 1^e editie waren ze al als "hypothese" aanwezig). In de 3^e en 4^e editie voegde Newton telkens nog een regel toe. Enigszins vrij vertaald luiden deze regels als volgt.

1. We behoren niet meer oorzaken van natuurverschijnselen toe te laten dan welke waar zijn en voldoende om de waarnemingen te verklaren. Want de natuur is eenvoudig en gaat zich niet te buiten aan overbodige oorzaken.
2. Daarom zijn de oorzaken van gelijksoortige effecten hetzelfde.
3. Die hoedanigheden van lichamen die in dezelfde mate toekomen aan alle lichamen waaraan wij waarnemingen kunnen doen, moeten be schouwd worden als hoedanigheden van alle lichamen in het algemeen.
4. In de experimentele filosofie moeten we uitspraken die door inductie uit de verschijnselen zijn afgeleid beschouwen als precies of in zeer goede benadering waar, ondanks het eventuele bestaan van mogelijke andere hypothesen. Dit geldt totdat zich nieuwe verschijnselen voordoen, die óf een nauwkeuriger formulering mogelijk maken, óf uitzonderingsge vallen aan het licht brengen. Deze regel moeten we volgen, opdat het redeneren via inductie niet wordt teniet gedaan door hypothesen.

In Newtons regels komt duidelijk het empiristisch karakter van de door hem voorgestane natuurkunde naar voren. Theoretische kennis wordt door inductie uit de *waarnemingen* gewonnen: wanneer een verschijnsel zich een aantal malen in dezelfde omstandigheden heeft voorgedaan, zijn we gerechtigd ervan uit te gaan dat het zich *altijd* in die omstandigheden zal voordoen. Inductie maakt het dus mogelijk algemene, universele uitspraken af te leiden op basis van een eindig aantal gevallen. Uit de gegeven regels blijkt verder dat we de eenvoudigste, meest economische universele uitspraak moeten kiezen die verenigbaar is met de waargenomen individuele gevallen. Dit doet sterk denken aan de methodologische voorschriften die door Willem van Ock-ham gegeven werden. Er is echter dit verschil: Ockham meent niet dat zijn "scheermes" tot de waarheid zal leiden; het is slechts een methodologische regel. Newton meent daarentegen zijn inductievoorschriften te kunnen funderen in de eenvoud van de natuur (regel 1). De meest eenvoudige uitspraak heeft volgens hem ook de grootste kans om waar te zijn: eenvoud is een kenmerk van het ware. Ook uit regel 4 leren we dat door inductie gevonden eenvoudige uitspraken voor waar gehouden moeten worden. Er wordt alleen het voorbehoud gemaakt dat eventueel kan blijken dat de formulering gepreciseerd kan worden, of dat er bijzondere gevallen zijn waarin de gevonden wetmatigheid niet opgaat. Dit komt erop neer dat eenmaal gevonden wetten en theorieën in hoofdlijnen altijd ongewijzigd zullen blijven; bij voortgezet empirisch onderzoek zullen alleen *aanvullingen* hier en daar wellicht nodig blijken.

Newtons wetenschapsleer is dus empiristisch: bron van alle kennis is de waarneming. Maar Newton gaat niet zo ver als de radicaal empiristische nominalisten, die meenden dat waarheid een onbereikbaar doel is in een empirische wetenschap. Hij meent dat waarheid *wel* haalbaar is, via inductie, en baseert zich daarbij op de overtuiging dat de natuur simpel is - een opvatting die weer een Aristotelisch tintje heeft, hoewel Newton niet expliciet een beroep doet op het kennisfunderend vermogen van de menselijke intuïtie. Tenslotte heeft voor Newton natuurwetenschappelijke kennis een *cumulatief* karakter: door voortgezet onderzoek vermeerderd kennis zich continu, zonder dat al aanwezige kennis in zijn structuur wordt aangetast. Het is bijvoorbeeld niet te verwachten dat de $1/r^2$ -wet waar die nu toepasbaar is gebleken ooit door een andere wet zal worden vervangen; het is hoogstens mogelijk dat gevonden zal worden dat bijzondere situaties bestaan waarin de wet niet geldt. Ook zou eventueel door zeer nauwkeurige nieuwe meettechnieken kunnen blijken dat de exponent niet 2 is maar 1,999. Bij gebruik van de oude technieken blijft dan echter de oude wet geldig. Een zeer be-

langrijk aspect van Newtons natuurkunde, dat niet duidelijk uit zijn "regels" naar voren komt, is tenslotte het mathematische en kwantitatieve karakter ervan. Dit mathematische karakter maakt het mogelijk het ideaal van een axiomatisch-deductieve structuur te verwerkelijken op bijna dezelfde wijze als in de Euclidische meetkunde.

Opgave. Newton rechtvaardigt de toepasbaarheid van inductie met een beroep op de eenvoud van de natuur. Zou die eenvoud van de natuur *zelf* langs wetenschappelijke weg kunnen worden aangetoond?

2.5 Hume's aanval op de waarheidspretenties van de empirische wetenschap

De Newtoniaanse natuurkunde gaat uit van waarnemingen. Anders dan in de Klassieke Oudheid betekent dat nu ook dat een gericht experimenteren tot het standaardinstrumentarium van het onderzoek behoort. Hoewel in de methodologische proclamaties uit de 17^e eeuw deze empiristische kant zeer sterk wordt benadrukt, zien we toch in de praktijk, en ook in de door Newton opgestelde regels, niet zuiver empiristische aspecten opduiken. In het bijzonder gaat men er algemeen van uit dat nauwkeurige waarneming en experimenteren ons tot altijd geldige waarheden zullen leiden. Dit optimisme met betrekking tot de mogelijkheden van een empirische wetenschap komt echter al spoedig aan zware kritiek bloot te staan van de kant van radicaal empiristen. Beroemd is vooral de kritiek geworden die uitgeoefend werd door de Schotse filosoof David Hume (1711-1776). Hume's scepsis met betrekking tot de reikwijdte van de experimentele methode komt vooral voort uit twijfel over de geldigheid van inductie.

Hume ontkent niet dat we bij herhaaldelijk constateren van een zeker verschijnsel geneigd zijn te gaan verwachten dat dat verschijnsel zich in soortgelijke omstandigheden weer zal gaan voordoen. Maar dat betekent helemaal niet dat de natuur zich ook aan zo'n verwachting zou moeten houden; de natuur is in principe vrij bij de eerstvolgende gelegenheid een tot nu toe geconstateerde regelmatigheid te doorbreken. Dat dit zo is blijkt uit het simpele feit dat er geen *logische* tegenspraak bestaat tussen het n keer voorkomen van een gebeurtenis en het niet-voorkomen daarvan bij de $(n + 1)$ -de gelegenheid, ook niet bij de grote waarden van n . Al is de Zon nog zo vaak opgegaan, er volgt geen tegenspraak uit de veronderstelling dat de Zon morgen niet zal opkomen. We moeten daarom, zegt Hume, een scherp

onderscheid maten tussen de *psychologische zekerheid* die we langzamerhand verkrijgen bij herhaling van een verschijnsel en wat we *objectief zeker* kunnen zeggen omtrent de toekomst. Al onze waarnemingskennis heeft betrekking op het verleden en heeft geen logische relatie met de toekomst. Daaruit volgt dat uit onze empirische kennis *niets over de toekomst is af te leiden*. Het enige dat we bezitten zijn subjectieve verwachtingen, maar die zijn uit wetenschappelijk oogpunt niet interessant. Met andere woorden: *inductie is geen objectief geldig redeneerschema*.

Een iets verdere uitwerking van dit idee vinden we in Hume's analyse van de *causaliteit*. De natuurwetenschap probeert, zo zegt Hume, altijd *oorzaken* van verschijnselen aan te wijzen. Als de oorzaak A van verschijnsel B aangegeven is, dan begrijpen we het voorkomen van B, want B *moest* wel optreden, gegeven A; dat is althans de bedoeling van het opsporen van oorzaken. Maar het is duidelijk dat het op deze wijze beschouwen van oorzaken de geldigheid van inductie impliceert. Als oorzaken inderdaad hun effect te weeg *moeten* brengen, dan is kennis van een oorzaak nu voldoende om het *latere* effect te kunnen voorspellen. Uit zijn eerdere conclusie dat waarnemingen onvoldoende basis bieden voor zulke voorspellingen, kan Hume dan ook afleiden dat waarnemingen het niet mogelijk maken oorzaken in bovenbedoelde zin te identificeren. Het enige dat wij feitelijk kunnen waarnemen is dat tot nu toe A en B *gecorrleerd* zijn geweest; iedere keer dat A voorkwam volgde ook B. Een "noodzakelijk verband" tussen A en B is iets dat wij nooit waarnemen. Voorzover wij onze kennis objectief op de waarneming baseren is er geen reden om aan te nemen dat in de toekomst B weer op A zal volgen.

Hume verbindt zijn analyses met de overtuiging dat al onze kennis uit de waarneming afkomstig is. Er is geen aangeboren kennis, of een Aristotelische intuïtie, die ons iets zou kunnen leren buiten de waarneming om. Dit leidt tot een sceptische houding ten opzichte van alle kennis. Alles wat wij menen te *weten* is bij nadere beschouwing gebouwd op drijfzand, het is slechts ongefundeerde *subjectieve overtuiging*. Hume beveelt aan in het dagelijkse leven niets van dit inzicht te laten blijken, maar op de "normale" manier te handelen, alsof het *wel* duidelijk is wat de gevolgen daarvan zullen zijn. Dit echter alleen om mogelijke spanningen in de omgang met medemensen te vermijden. De filosoof ziet in dat hij eigenlijk niets weet.

Opgaven.

1. Vergelijk Hume's positie met die van de middeleeuwse nominalisten.

2. Hume's kritiek op de inductie steunt op het ontbreken van een *logisch* verband tussen verleden en toekomst. Zou het niet mogelijk zijn te redeneren dat zo'n logisch verband weliswaar ontbreekt, maar dat er wel een verband is dat gegeven wordt door natuurwetten - zodat het *toch* mogelijk is op grond van het verleden iets over de toekomst te zeggen?

2.6 Kants poging de waarheidsaanspraken van de empirische wetenschap te redden

Hume's stelling dat er van bijvoorbeeld de mechanica van Newton geen enkele gefundeerde waarheidspretentie kan uitgaan, dat morgen materiële objecten best eens volgens andere wetten zouden kunnen gaan bewegen dan vandaag, of misschien een totaal wetteloos gedrag zouden kunnen gaan vertonen, heeft een merkwaardige status. Tegen Hume's argumentatie, dat geen logische gevolgtrekkingen uit het verleden voor de toekomst mogelijk zijn, is weinig in te brengen. Aan de andere kant is vrijwel niemand bereid serieus te accepteren dat een willekeurige voorspelling omtrent de toekomstige posities van een aantal hemellichamen, bijvoorbeeld gedaan met behulp van een roulettewiel, even ernstig genomen moet worden als een voorspelling op grond van de mechanische wetten en de huidige posities van die hemellichamen. Hume zou natuurlijk zeggen dat onze houding wat dit laatste betreft te begrijpen is als een psychologische reactie, die niets zegt over de objectieve betekenis van de wetten uit de klassieke mechanica. Veel filosofen hebben hier echter geen genoegen mee genomen en hebben op de een of andere wijze geprobeerd toch een objectieve fundering te geven aan de fysische wetten, ook voorzover die op de toekomst betrekking hebben. De door de Duitse filosoof Immanuel Kant (1724-1804) hiertoe ondernomen poging is zowel historisch belangrijk als inhoudelijk interessant.

Volgens Kant moeten we een scherp onderscheid maken tussen de wereld zoals die in zichzelf is (de "Dinge an sich") en de wereld zoals wij die waarnemen (de "Dinge für uns"). De wereld die wij waarnemen, d.w.z. de wereld waarvan wij ons in de zintuiglijke ervaring bewust worden, is namelijk een wereld opgebouwd uit elementen die door ons "kenvermogen" zijn bewerkt. Wij kunnen ons niet bewust worden van een realiteit die dit kenvermogen niet is gepasseerd. We mogen wel aannemen dat er zo'n realiteit op zichzelf is, maar in de zintuiglijke waarneming worden we geconfronteerd met

iets anders, namelijk een door ons zelf "gefilterde" werkelijkheid. Ons kenvermogen is namelijk niet te beschouwen als iets passiefs, dat alleen maar doorgeeft wat van buitenaf binnenkomt. De "ruwe gegevens", afkomstig van de "Dinge an sich", worden *bewerkt* door ons kenvermogen. Dit heeft tot gevolg dat de informatie waarvan wij ons tenslotte bewust worden altijd een bepaalde *vorm* heeft: alle waarnemingskennis is *geordend* met betrekking tot *ruimte* en *tijd*, en bovendien heeft onze ervaringskennis altijd de gedaante van een *oordeel*, waarin iets gezegd wordt over iets anders. Er zijn een aantal, door de structuur van het menselijk verstand vastgelegde, *categorieën* waarin mogelijke oordelen een plaats moeten vinden. Zo zijn er kwantitatieve en kwalitatieve oordelen, die iets kwantitatiefs of kwalitatiefs over een object uitspreken. Ook zijn er, en dit is belangrijk voor Hume's inductieprobleem, oordelen waarin een uitspraak gedaan wordt over het *oorzakelijk verband* tussen verschijnselen.

Het is niet zo dat de ordening in ruimte en tijd, of het geven van causale oordelen, iets is wat wij bewust aan de waarneming *toevoegen*. Volgens Kant worden wij ons *direct* bewust van z.g. "ervaringsoordelen", waarin de activiteit van ons kenvermogen al verdisconteerd is. Als voorbeeld geeft Kant het verwarmen van een steen door de Zon. Het is niet zo dat we een steen zien warm worden en tegelijk ook de Zon zien schijnen, en dan vervolgens op grond van allerlei overwegingen een verband tussen deze twee verschijnselen aannemen. Het verband is ons direct gegeven in het ervaringsoordeel dat de Zon de steen verwarmt.

Een belangrijk punt in Kants zogeheten "Kritische Filosofie" (we zullen zo dadelijk de motivering voor deze benaming nog zien) is de gedachte dat het menselijk kenvermogen onveranderlijk is. De door dat kenvermogen in de empirische ervaring gelegde structuren veranderen daarom ook niet; wat voor het verleden gold, moet evenzeer voor de toekomst gelden. Dat betekent onder meer dat wanneer in het verleden een noodzakelijk verband zichtbaar was tussen twee soorten van verschijnselen (als in het geval van de steen die aan zonnestraling wordt blootgesteld), er ook in de toekomst zo'n noodzakelijk verband tussen dezelfde soort verschijnselen zal zijn. Zonnestraling zal dus altijd stenen opwarmen. Het is duidelijk dat langs deze weg een oplossing voor het inductieprobleem valt te bereiken.

Algemener geldt dat de onveranderlijkheid van het menselijk kenvermogen tot permanente karakteristieken van de menselijke kennis leidt. Zo meent Kant dat de ordening in ruimte en tijd altijd zó verloopt, dat de waarnemingsgegevens aan de Euclidische meetkunde gehoorzamen en dat de absolute ruimte en tijd van Newton de arena zijn voor de bewegingsverschijnselen.

De Euclidische meetkunde heeft dus een *a-priori*-karakter; dat aan de Euclidische relaties voldaan zal zijn is al zeker vóór elk empirisch onderzoek. Volgens het Kantiaanse systeem liggen dus bepaalde karaktertrekken van wat we door zintuiglijke waarneming zullen vinden al vast voordat we die waarnemingen feitelijk doen. Maar die karaktertrekken komen alleen naar voren in de waarneming.

Dit is door Kant uitgewerkt in de beroemde leer van het "synthetisch a priori". Oordelen vallen uiteen in twee klassen: de *synthetische* en de *analytische* oordelen. In een analytisch oordeel wordt bij het toekennen van een predicaat aan een subject ("predicaat": datgene wat gezegd wordt over het onderwerp of "subject") niets toegevoegd aan wat op grond van de *betekenis* van het subject al duidelijk kon zijn. Bijvoorbeeld: "alle vrijgezellen zijn ongetrouwd". Dat vrijgezellen ongetrouwd zijn is al waar op basis van de betekenis van het woord "vrijgezel"; er wordt door het predicaat "ongetrouwd" niets toegevoegd aan wat al in het subject vervat was. Er wordt alleen één element uit de betekenisinhoud losgemaakt en naar voren gehaald ("geanalyseerd"); vandaar de benaming "analytisch oordeel". Een synthetisch oordeel voegt daarentegen wél iets toe aan de betekenisinhoud van het subject. "De bal is rood" is een synthetische uitspraak, want het behoort niet tot de betekenisinhoud van het begrip "bal" om rood te zijn. Uit het bovenstaande volgt dat analytische uitspraken "a priori" zijn, d.w.z. dat het niet nodig is empirisch onderzoek te doen om hun waarheid vast te stellen. Het al dan niet waar zijn van een analytische uitspraak kan beslist worden *voorafgaand* aan ieder empirisch onderzoek. Evenzo is het duidelijk dat synthetische uitspraken i.h.a. een *a-posteriori*-karakter zullen hebben. Om te beslissen of "de bal is rood" al dan niet waar is moet empirisch onderzoek worden gedaan; allereerst moeten we weten om welke bal het nu precies gaat en vervolgens moeten we de kleur van die bal vaststellen. Pas na zo'n onderzoek is het mogelijk een besluit te nemen; het gaat om een "*a-posteriori*-uitspraak". "Synthetische uitspraken a posteriori" zijn blijkbaar ook niets bijzonders. Het bijzondere, en typisch Kantiaanse, komt naar voren in een derde categorie van uitspraken, de "synthetische *a-priori*-uitspraken". Dit zijn uitspraken waarin echt iets nieuws gezegd wordt over het subject (ze zijn niet analytisch), maar waarvan de waarheid (of onwaarheid) toch voorafgaand aan empirisch onderzoek bepaald kan worden. Zulke uitspraken bestaan volgens Kant; in de natuurwetenschap hebben we er volgens hem zelfs dikwijls mee te maken. We zagen boven al enkele voorbeelden: dat de ruimte een Euclidische geometrie bezit, is ook zo'n synthetische uitspraak a priori. Er is geen *logische* noodzaak voor de ruimte om Euclidisch te zijn,

de uitspraak is dus niet analytisch. Toch is zij a priori waar. Zoals we al gezien hebben is dit mogelijk omdat zij een onveranderlijke eigenschap van ons eigen ordenend vermogen weergeeft. Ook de "causaliteitswet", die zegt dat bij ieder verschijnsel een oorzaak bestaat, is zo'n a priori juist principe. Dit komt weer doordat wij zelf alle verschijnselen ordenen in paren van oorzaak en gevolg.

De meest algemene fundamentele principes van de natuurwetenschap liggen op deze wijze voor altijd vast. Kant noemt dit a-priori-gedeelte van de natuurwetenschap de "zuivere natuurwetenschap", die louter door reflectie op het menselijk kenvermogen uitgewerkt kan worden. Het empirisch onderzoek heeft de taak de ontbrekende details in dit conceptuele raamwerk aan te vullen. Zo gelooft Kant ook dat de fundamentele wetten uit de mechanica van Newton a priori zijn; deze wetten zijn dus zeker ook in de toekomst waar. Maar om de wetten toe te passen is empirisch werk nodig, bijvoorbeeld om de massa's en posities van werkelijk voorkomende objecten te bepalen.

De a-priori-principes van de menselijke kennis kunnen volgens Kant gevonden worden door een procedure die hij de "*transcendentale deductie*" noemt. Het idee achter deze deductie is dat de a-priori-principes de voorwaarden vormen waaraan voldaan moet zijn wil empirische wetenschap überhaupt mogelijk zijn. Zo moet aan de causaliteitswet voldaan zijn om een zinvolle wetenschap die ook voor de toekomst geldt mogelijk te maken (vergelijk Hume). Andersom kan uit het feitelijk bestaan van empirische kennis (bijvoorbeeld in de vorm van de mechanica van Newton, of de wetten van de meetkunde) gededuceerd worden dat aan zekere a-priori-principes voldaan is. Dit zijn dan de principes die door het menselijk kenvermogen ingebracht worden in de zintuiglijke wereld, als een soort skelet waarvoor de waarneming het weefsel levert.

In de opvatting van Kant is de natuurwetenschap *ervaringswetenschap*; er worden alleen uitspraken in gedaan die betrekking hebben op de zintuiglijk waarneembare wereld. Maar in deze ervaringskennis zitten bepaalde algemene structurele kenmerken die door onszelf aangebracht zijn, en die als het ware het weefgetouw vormen waarin al onze waarnemingen opgespannen worden. Het is nu vooral de taak van de filosoof, zegt Kant, te waken tegen de menselijke neiging abstracte concepten te verabsoluteren en ook buiten de waarneming toepasbaar te verklaren. De door ons kenvermogen ingebrachte begrippen hebben alleen geldigheid *binnen* het gebied van het waarneembare; proberen we ze ook buiten dat gebied te gebruiken raken we verstrikt in tegenspraken, zogeheten antinomieën. Zo zijn kwantitatieve concepten toepasbaar op datgene wat wij waarnemen. Maar proberen we bijvoorbeeld

de vraag te beantwoorden of het heelal *als geheel* eindig of oneindig is, gaan we ons boekje te buiten. Het heelal als geheel is immers niet iets wat in de waarneming kenbaar is, en daarom zijn begrippen als eindig of oneindig er helemaal niet op van toepassing. Dit blijkt eruit, beweert Kant, dat er zowel een bewijs te geven is voor de stelling "het heelal is eindig" als voor de stelling "het heelal is oneindig". In Kants "Kritische Filosofie" worden daarom paal en perk gesteld aan ons redeneren. Het "zuivere verstand" moet niet de pretentie hebben iets te kunnen zeggen over de "Dinge an sich"; het kan alleen de begrippen verschaffen waarmee de feitelijke zintuiglijke waarneming geordend wordt en moet niet buiten het waarneembare om redeneren. Deze functie van de filosofie komt tot uiting in de titel van Kants hoofdwerk "Die Kritik der reinen Vernunft" (1781).

De natuurkunde in de visie van Kant is een empirische wetenschap. Empirie is bij Kant altijd *gestructureerde* empirie; de waarnemer krijgt de ervaringsgegevens aangereikt in de vorm van *oordelen* en dit is ook de enige vorm waarin hij iets zinvol met de ervaring kan aanvangen. Kant ging zeer ver in het veronderstellen van een a-priori-karakter bij allerlei kenmerken van de natuurkunde waarmee hij vertrouwd was. Dat bleek gevaarlijk; de geschiedenis heeft laten zien dat hij het op heel veel punten niet bij het rechte eind had. Niet lang na zijn dood werden niet-Euclidische meetkenden ontwikkeld, waardoor al twijfel opkwam over het Euclidische karakter van de waarneembare wereld. De wetten van Newton werden door relativiteitstheorie en quantummechanica terzijde geschoven, terwijl een hoofddoel van Kants systeem juist geweest was de absolute geldigheid van die wetten te waarborgen. De algemene relativiteitstheorie toonde definitief de zinvolheid van niet-Euclidische meetkenden voor de beschrijving van de waarneembare werkelijkheid aan, terwijl de quantummechanica vraagtekens zette bij de causaliteitswet. Op al deze punten (en nog vele andere) bleek het onjuist te zijn om onveranderlijke vóóronderstellingen aan te nemen. Iets anders is het echter of er toch niet iets zit in het idee dat de natuurwetenschap altijd werkt met gestructureerde waarnemingsgegevens, met een conceptueel raamwerk waar de "naakte" ervaringsgegevens ingepast worden. In de volgende hoofdstukken, waarin de 19^e- en 20^e-eeuwse fysica en de wetenschapsfilosofische beschouwingen daarover centraal staan, zullen we zien dat het mogelijk is dat idee tegenover een radicaal empirisme te verdedigen. Het moet dan echter wel van Kantiaanse franje worden ontdaan.

Opgaven.

1. Volgens Kant is een natuurwetenschap zonder "causaliteitswet" ondenkbaar. In zo'n "wetenschap" zou immers steeds iets anders op een gegeven situatie kunnen volgen; maar natuurwetenschap gaat nu juist over wetten, regelmatigigheden in de waarnemingen. De causaliteitswet is dus een voorwaarde waaraan voldaan moet zijn opdat natuurwetenschap überhaupt mogelijk is. Wat vind je van deze "transcendentale deductie"?
2. De ordeningen in ruimte en tijd hebben bij Kant een speciale status, omdat ze afhangen van de "zuivere aanschouwing". We kunnen deze aanschouwing tot op zekere hoogte los van de empirische waarneming bestuderen, door ons (bijvoorbeeld met gesloten ogen) meetkundige eigenschappen *voor te stellen*. Neem bijvoorbeeld een rechte lijn in gedachten, en een punt daarbuiten. De zuivere aanschouwing leert dat er precies één lijn door het punt gaat die de oorspronkelijke lijn niet snijdt. Met andere woorden: niet-Euclidische meetkenden zijn niet *voorstelbaar*. A fortiori zijn ze daarom ook niet te gebruiken voor een representatie van de waarneembare werkelijkheid. Probeer deze argumentatie te analyseren en eventuele zwaktes ervan aan te geven.

Hoofdstuk 3

Waarneming en theorie in de moderne wetenschapsfilosofie

De geschiedenis van de filosofie laat een voortdurende spanning zien tussen rationalistisch getinte standpunten en empiristische visies. Na perioden waarin het rationalisme overheerste komen we steeds weer empiristische reacties tegen. Dit zien we ook in de tweede helft van de 19^e eeuw en in de 20^e eeuw gebeuren: het Kantiaanse systeem komt aan empiristische kritiek bloot te staan. Gedeeltelijk betekent dit dat argumenten die we al bij de 14^e-eeuwse nominalisten of bij de 18^e- eeuwse empiristen als Hume kunnen aantreffen weer van stal worden gehaald. Maar de nieuwe discussie is niet helemaal een herhaling van wat al eerder was vertoond. Met de grote veranderingen in de natuurkunde in de 19^e en 20^e eeuw wordt meer dan vroeger duidelijk dat het gevaarlijk is te geloven dat de menselijke Rede in staat is voor altijd geldige principes a priori vast te stellen. Ontwikkelingen in de natuurkunde zélf geven de 20^e- eeuwse filosofische discussies een andere wending dan de eerder gevoerde rationalisme-empirisme debatten. In het 19^e-eeuwse empirisme, vooral vertegenwoordigd door Ernst Mach, zien we overwegend nog ondertussen vertrouwde argumenten. Maar Machs empiristische kritiek richt zich voor een belangrijk deel op de interpretatie van de klassieke fysica, wat hem voor ons interessant maakt.

3.1 Machs wetenschapsleer

Ernst Mach (1838-1916) was fysicus en wetenschapsfilosoof; hij deed ook werk op het terrein van de zintuigfysiologie. Zelf zag hij zich uitsluitend als wetenschapsman, in de eerste plaats natuurkundige. Hij was wars van de benaming "filosoof", omdat hij in geen geval geassocieerd wilde worden met de filosofische systeembouwers. Deze laatsten pretendeerden immers doorgaans dat ze via een of andere "filosofische methode" tot de aard van de werkelijkheid konden doordringen. Mach stelt hier tegenover dat er slechts één manier is om kennis over de werkelijkheid te verkrijgen, namelijk de empirische methode. Maar dit is, zegt Mach, geen "filosofische" methode; het is de methode van de natuurwetenschappen. De wijsbegeerte heeft volgens Mach helemaal geen taak als het gaat om het onderzoeken van de natuur. De natuurwetenschap is autonoom en kan zijn eigen boontjes wel doppen. Natuurlijk kan het voorkomen dat ook in natuurwetenschappelijke kring vragen opkomen over de ware aard van de natuurwetenschap en over de erin te volgen methode. Maar het is dan de taak van de wetenschapsmensen zelf, althans diegenen onder hen met voldoende kritisch vermogen, om op zulke vragen antwoord te geven. Een van buiten komende filosofische inbreng is niet nodig. Mach beschouwt zich als natuurkundige die niet alleen onderzoek van de natuur verricht, maar ook reflecteert over de in dat onderzoek gehanteerde methoden en over de status van de resulterende kennis. Het is niet zijn bedoeling een wijsgerig stelsel voor te stellen.

Om de aard van natuurwetenschappelijke kennis goed te kunnen beoordelen, zegt Mach, moeten we ons terdege realiseren wat het betekent dat alle kennis uit de waarneming afkomstig is. In de eerste plaats wil dat zeggen dat we niet over aangeboren, a priori geldige ideeën beschikken. Alle begrippen waarmee we werken, tafel, stoel, object in het algemeen, zijn door ons naar aanleiding van wat we waarnemen geconstrueerd. Wat we waarnemen is in eerste instantie niets anders dan bepaalde hoedanigheden verbonden met locaties in ons gezichtsveld (als we ons even beperken tot de visuele waarneming). Sommige plekken zijn rood, andere blauw; er zijn verschillen in helderheid, contrast, e.d. Deze verzameling van primaire waarnemingsgegevens (van de vorm: "deze plek in mijn gezichtsveld heeft die hoedanigheid") verandert in de tijd. Nu blijkt het zo te zijn dat er *relatief permanente complexen* van zulke primaire waarnemingsgegevens aan te wijzen zijn. Bepaalde groepen van die gegevens bewegen wel als geheel, maar behouden daarbij min of meer hun onderlinge relaties. Voor de beschrijving van zulke relatief stabiele complexen voeren wij nu begrippen in als stoel en tafel. Dit

doen wij omdat het buitengewoon handig is: we hoeven dan niet steeds een opsomming te geven van alle afzonderlijke zintuiglijke indrukken, maar kunnen volstaan met het noemen van één naam. Maar een object verkrijgt, door het feit dat er een begrip mee wordt verbonden, geen "realiteit" boven datgene waar we van uit gingen, namelijk de primaire zintuiglijke indrukken. Het begrip is louter en alleen een economisch hulpmiddel bij het werken met die indrukken. Het is een typisch "filosofische" fout om meer achter zo'n begrip te zoeken, om er een zelfstandigheid aan te verlenen.

Deze analyse van het objectbegrip illustreert de door Mach gehanteerde kritische methode. De enige basis van kennis over de natuur is de waarneming en het gaat er nu om op kritische wijze de consequenties hiervan expliciet te maken. De traditionele filosofische stelsels kenden alle aan algemene begrippen één of andere vorm van realiteit toe (zoals bij Plato, Aristoteles). Dit heeft echter, betoogt Mach, geen basis in de waarneming. In strikte zin bestaan er zelfs helemaal geen permanente objecten; altijd verandert er wel *iets* in het complex van sensaties dat samen het object vormt. Er is ook helemaal geen garantie dat een "object" dat we vandaag waarnemen morgen niet in het niets is opgegaan. Onze algemene begrippen zijn uitsluitend economische hulpmiddelen voor het ordenen van de zintuiglijke indrukken die wij tot op heden hebben gehad. In goede wetenschappelijke begrippen zit daarom ook niets wat niet tot primaire zintuiglijke indrukken reduceerbaar is. Het is de functie van een kritische reflectie op de wetenschap om te waken tegen de introductie van "metafysische", d.w.z. niet tot directe waarneming reduceerbare, elementen. Neem bijvoorbeeld de "materia prima" van Aristoteles. Welke waarnemingsgegevens bepalen deze oerstof? Het wordt snel duidelijk dat de Aristotelische stof-vormleer niet aan Machs eisen voldoet en daarom als metafysisch moet worden afgewezen.

Mach ziet het proces van menselijke kennisverwerving in het perspectief van Darwins evolutietheorie. Er spelen twee "adaptatiemechanismen" een rol:

1. aanpassing van ideeën aan de waarneming;
2. aanpassing van ideeën aan elkaar.

Van het eerste hebben we al voorbeelden gezien. We proberen begrippen en theorieën te vormen die op zo zuinig mogelijke manier de waarneming ordenen. Het kan nu voorkomen dat verschillende op deze wijze gevonden theorieën niet met elkaar in overeenstemming zijn. Dan moeten we ze onderling aan elkaar aanpassen; het gehele bouwwerk moet consistent zijn.

Wetenschappelijke theorieën, met de daarin voorkomen begrippen, moeten gezien worden als werktuigen waarmee de mens zijn kans op overleven vergroot, doordat hij economisch met waarnemingen omgaat en zo makkelijk tot voorspellingen en verwachtingen kan komen. Natuurwetenschappelijke theorievorming is daarom op een heel directe manier een onderdeel van het evolutionaire aanpassingsproces.

Al onze begrippen zijn te beschouwen als een soort afkortingen voor (bij benadering) stabiele complexen van primaire sensaties. Deze gedachte leidt Mach tot een zienswijze op de samenhang van de wetenschappen en de aard der werkelijkheid die "neutraal monisme" wordt genoemd. De aanduiding "monisme" hierin slaat erop dat *alle* begrippen *hetzelfde* karakter hebben; het is niet nodig onderscheid te maken tussen verschillende wetenschapsgebieden. In het bijzonder is het overbodig een verschil aan te brengen tussen begrippen die betrekking hebben op het "materiële" en het "geestelijke". Ook als we het hebben over ons eigen innerlijk, ons "ego", spreken we volgens Mach namelijk feitelijk over relatief stabiele complexen van sensaties (o.a. de sensaties die tezamen ons bewustzijn vormen). De begrippen van alle wetenschappen zijn dus "uit hetzelfde materiaal" geconstrueerd. In alle wetenschappelijke theorievorming gaat het om het opsporen van *relaties tussen sensaties*. Zulke relaties zijn noch "geestelijk", noch "materieel"; ze zijn "neutraal". Vandaar de term "neutraal monisme". Het enige verschil tussen de verschillende wetenschapsgebieden is gelegen in de eigenschappen van de bestudeerde relaties. Het is namelijk mogelijk onderscheid te maken tussen complexen van sensaties die op bepaalde stelselmatige wijze veranderen bij onze lichaamsbewegingen, zoals wanneer we een object onder verschillende hoeken zien, en sensaties die daarbij constant blijven. Zo kunnen we differentiëren tussen "interne" en "externe" objecten. We bedrijven *na-tuurkunde* wanneer we ons bezig houden met de relaties tussen sensaties die we als "extern" kunnen kenschetsen en bijvoorbeeld *psychologie* in het geval van relaties tussen "interne" sensaties of verbanden tussen "interne" en "externe" sensaties. Deze indeling moet echter, zoals al benadrukt, niet geïnterpreteerd worden als corresponderend met een fundamenteel verschil in het wezen van de verschijnselen waar de onderscheiden disciplines zich op richten. Een zelfde element kan, afhankelijk van de relaties waarin het bestudeerd wordt, de ene keer als fysisch en een andere keer als psychologisch naar voren komen.

3.2 Machs analyse van de natuurkunde

Uit Machs visie op de aard en de taak van de natuurwetenschap zijn eisen af te leiden waaraan goede theorieën dienen te voldoen. In de eerste plaats moeten wetten en theorieën ervaringsfeiten weergeven; zij dienen immers tot niets anders dan het ordenen van de ervaring. Verder moet deze ordening zo efficiënt en zuinig mogelijk gebeuren. Daarom moeten ook geen overbodige grootheden ingevoerd worden; i.h.b. geen grootheden die naar niet-waarneembare entiteiten verwijzen. In zijn beroemde boek "Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt" (1883) gaat Mach na in hoeverre de klassieke mechanica aan zulke eisen voldoet. Daartoe betoogt hij allereerst dat de mechanische principes inderdaad uit niets anders voortkomen dan de ervaring. Zou namelijk bij onderzoek van de mechanica blijken dat er een mechanische wet is die a priori - onafhankelijk van de ervaring - gevonden is, zou dat natuurlijk de doodsteek betekenen voor Machs empirisme.

Nu zijn er wel enkele mechanische principes waarvan onderzoekers zelf gedacht hebben dat ze onafhankelijk van de ervaring duidelijk zijn. Zo leidt Archimedes de wetten van de hefboom af uit het principe dat een balans met gelijke armen, en met gelijke gewichten aan die armen, in evenwicht is. Dit uitgangsprincipe wordt zo duidelijk geacht dat het geen rechtvaardiging behoeft. Mach laat echter zien dat bij onze beoordeling van het gedrag van zo'n symmetrische balans allerlei ervaringsfeiten op de achtergrond meespelen. Het zijn feiten die ons zo vertrouwd zijn dat we ze vanzelfsprekend zijn gaan vinden; dat maakt ze echter niet minder tot ervaringsfeiten. Achtergrond van het schijnbaar evidente karakter van het evenwicht van de balans is de gedachte dat er totale symmetrie is; hoe zou de balans een voorkeur kunnen hebben om naar links of rechts door te slaan? Door de situatie als symmetrisch af te schilderen wordt echter al voorondersteld dat de lengte van de arm en de grootte van de gewichten de enige relevante factoren zijn voor het gedrag van de balans. Dat andere factoren, bijvoorbeeld de geur of de kleur van de armen, geen rol spelen kan echter alleen begrepen worden als *ervaringsfeit*. Ook is het een empirisch feit dat de omgeving doorgaans homogeen genoeg is om het mogelijk te maken bepalende factoren uitsluitend in de balans zelf te zoeken. Hoe zeer dit een empirische vooronderstelling is blijkt wanneer we ons de balans opgesteld denken in een sterk inhomogeen zwaartekrachtsveld.

Aan de hand van dit soort gevallen probeert Mach aan te tonen dat inderdaad alle mechanische (en meer in het algemeen: natuurkundige) wetten

uit de ervaring stammen. Dit is in overeenstemming met zijn empirisme, volgens hetwelk alle werkelijke kennis uit de ervaring stammen *moet*, en het kwalificeert de natuurkunde tegelijkertijd als een echte wetenschap (tegenover een pseudo-wetenschap). Maar deze vaststelling houdt niet in dat nu ook verder alles in orde is binnen de fysica zoals die feitelijk is geformuleerd. Mach heeft fundamentele kritiek op de natuurkunde van zijn tijd, omdat die zijns inziens door ongelukkige formuleringen soms de suggestie wekt dat bepaalde grootheden een betekenis hebben die uitgaat boven wat in de ervaring gegeven is, en soms ook overbodige grootheden gebruikt die geen basis hebben in de ervaring. In het laatste geval is niet voldaan aan het criterium dat de waarneming zo zuinig mogelijk geordend moet worden.

Machs wil met zijn kritiek een *zuivering* van de natuurkunde bewerkstelligen, waarbij alle verkeerde associaties en overbodige elementen worden verwijderd. Wat betreft verkeerde associaties en ongelukkige formuleringen richt zijn kritiek zich vooral op het *krachtbegrip* uit de mechanica van Newton. Het begrip "kracht" roept namelijk associaties op met menselijke inspanningen en de bijbehorende verlangens en bedoelingen waarvan die inspanningen een uitvloeisel zijn. Dit wordt versterkt doordat Newton in zijn eerste wet krachten duidelijk als oorzaken van een versnelling beschouwt ("een lichaam volhardt in een toestand van rust of uniforme beweging, tenzij een *kracht* werkzaam is"). Vanzelf gaat men zo denken aan krachten als zelfstandige entiteiten, met een soort "eigen wil", die niet zelf waarneembaar zijn maar het waarneembare gedrag van materiële lichamen bepalen. Zo'n *animistisch* krachtbegrip en de bijbehorende *antromorfe* terminologie ("werking", "afstoten", "aantrekken", kracht "uitoefenen", enzovoort) horen echter in een natuurkunde volgens Machs idealen niet thuis. In zo'n natuurkunde mag alleen gesproken worden over waarneembare grootheden en de geconstateerde relaties daartussen. Het blijkt nu op eenvoudige wijze mogelijk te zijn (althans voor een systeem van twee deeltjes) de mechanische principes inderdaad zo te formuleren dat er alleen verbanden tussen *waarneembare versnellingen* in voorkomen. De grootheden "massa" (waaraan ook onaangename antropomorfe associaties kleven) en "kracht" kunnen dan simpel ingevoerd worden met behulp van een definitie. Op deze wijze worden ze als het ware "onschadelijk gemaakt"; er wordt expliciet aangetoond dat ze niet anders zijn dan afkortingen voor bepaalde combinaties van waarneembare grootheden.

Hier volgt een kort overzicht van Machs herformulering van de bewegingswetten van Newton waarin het duidelijk wordt dat ze niets anders doen dan regelmatigheden in de versnellingen van deeltjes op een rijtje zetten.

Beschouw twee massapunten A en B, die zeer ver verwijderd zijn van alle overige materie. In elkaars aanwezigheid zullen ze een versnelde beweging uitvoeren. Dit is een experimenteel gegeven feit. Men kan nu meten:

\underline{a}_{AB} = versnelling A in aanwezigheid van B,

\underline{a}_{BA} = versnelling B in aanwezigheid van A.

Het 1e postulaat van Mach, dat experimenteel geverifieerd kan worden, luidt nu: \underline{a}_{AB} en \underline{a}_{BA} zijn tegengesteld gericht; de verhouding $\underline{a}_{AB} / \underline{a}_{BA}$ is onafhankelijk van de plaatsen en snelheden van deeltjes, en onafhankelijk van de aard der wisselwerking. We noemen deze verhouding $-M_{BA}$, dus:

$$\underline{a}_{AB} / \underline{a}_{BA} = -M_{BA} \quad (3.1)$$

Daar \underline{a}_{AB} en \underline{a}_{BA} tegengestelde richtingen hebben, is M_{BA} positief. Analoog voeren we in voor de deeltjesparen A, C resp. B, C:

$$\underline{a}_{AC} / \underline{a}_{CA} = -M_{CA}, \quad \underline{a}_{BC} / \underline{a}_{CB} = -M_{CB} \quad (3.2)$$

Eet 2^e postulaat van Mach, dat ook direct empirisch is te verifiëren, luidt:

$$M_{CB} = M_{CA} / M_{BA} \quad (3.3)$$

Substitutie hiervan in de 2^e vergelijking van (2) geeft:

$$M_{BA} \underline{a}_{BC} = -M_{CA} \underline{a}_{CB} \quad (3.4)$$

We beschouwen nu bijvoorbeeld deeltje A als een vast standaarddeeltje; de getallen M_{BA} en M_{CA} etc- zijn dan karakteristiek voor de puntmassa B en C, etc. We noemen deze getallen de massa's van deeltje B resp. C, etc, dus: $M_{BA} = m_B$, $M_{CA} = m_C$? etc. (4) wordt nu:

$$m_B \underline{a}_{BC} = -m_C \underline{a}_{CB} \quad (3-5)$$

Uit de verhouding van de versnellingen volgt dus direct de verhouding van de massa's. Dit geeft een experimentele methode om de massaverhoudingen te meten; door alles te betrekken op het standaarddeeltje A vinden we de massa's zelf. We hebben nu het begrip "massa" gedefinieerd (operationeel), zonder het woord kracht te gebruiken. *Zuiver formeel* kunnen we nu kracht definiëren als:

$$\underline{F}_{BC} = m_B \underline{a}_{BC} \text{ is de kracht die B "ondervindt" van C.}$$

Substitutie in (5) geeft nu:

$$\underline{F}_{BC} = -\underline{F}_{CB} \quad (3.6)$$

Dit is de 3e wet van Newton (actie = - reactie), die dus blijkbaar bij de definitie van de massa gebruikt is.

Tenslotte het *3e postulaat van Mach*. Dit is het superpositie beginsel, dat zegt dat de totale kracht op een deeltje de vectorsom is van alle tweedeeltjes-krachten: $m_B \underline{a}_B = \underline{F}_B = \sum_i \underline{F}_{Bi}$. Met behulp van dit postulaat kan de beweging van een deeltje bepaald worden in aanwezigheid van verscheidene andere deeltjes, als de krachten in twee-deeltjes-situaties bekend zijn. Voor een empirische toetsing van de mechanische wetten moet men natuurlijk nog de precieze vorm van de interacties kennen: $\underline{F}_{Bi} = \underline{F}_{Bi}(\underline{r}, \underline{v}, t)$. Op grond van bovenstaande zal het duidelijk zijn dat de kracht \underline{F}_B hierin slechts een hulpgrootte is, die ook direct vervangen kan worden door $m_B \underline{a}_B$.

Opgemerkt moet worden dat Machs analyse, waarin de begrippen 'massa' en 'kracht' expliciet worden gedefinieerd in termen van waarnemingsgegevens, voor ingewikkelder situaties dan die met twee deeltjes niet zondermeer is over te nemen. Als we n deeltjes beschouwen die met elkaar in wisselwerking zijn, zal de grootte van de kracht niet uit de waargenomen versnellingen kunnen worden afgeleid als n groot wordt. Dit is als volgt in te zien.

Stel we nemen (Machs aanpak generaliserend) de bewegingswetten van Newton als restrictie op de te formuleren uitdrukkingen aan. Dat betekent dat we aannemen dat aan object i een massa m_i toekomt en dat zijn versnelling \underline{a}_i via een vergelijking van het type $m_i \underline{a}_i = \underline{F}_i$ afhangt van een op het object 'uitgeoefende kracht' \underline{F}_i . Laten we verder veronderstellen dat de kracht \underline{F}_i is samengesteld uit langs onderlinge verbindingslijn gerichte twee-lichaamskrachten \underline{F}_{ij} (de kracht door object j uitgeoefend op object i). Tenslotte nemen we aan, in overeenstemming met de derde wet van Newton (actie = - reactie) dat geldt: $\underline{F}_{ij} = -\underline{F}_{ji}$. Kunnen we nu door versnellingen te meten de massa's en krachten (dit zijn 'theoretische grootheden') bepalen? We zouden ons misschien kunnen voorstellen dat Newton op deze manier, gewapend met zijn bewegingswetten, de hemodynamica te lijf ging en zijn universele gravitatiewet gevonden zou kunnen hebben.

Mathematisch ziet het probleem er als volgt uit. Als het om n objecten gaat, zijn er n vergelijkingen $m_i \underline{a}_i = \sum_j \underline{F}_{ij}$ met daarnaast de condities $\underline{F}_{ij} = -\underline{F}_{ji}$. Laten we zeggen dat op r tijdstippen metingen aan de n versnellingen uitgevoerd worden. Er zijn dan in totaal $3nr$ vergelijkingen (iedere

vectorvergelijking $\underline{F} = m\underline{a}$ levert drie algebraïsche vergelijkingen voor de componenten), met $\frac{1}{2}rn(n-1)+(n-1)$ onbekende grootheden. De laatste zijn: de $\frac{1}{2}rn(n-1)$ grootten van de kracht \underline{F}_{ij} (hun richting is immers al vastgelegd., langs de lijn die object i met object j verbindt; de factor $1/2$ houdt rekening met de conditie $\underline{F}_{ij} = -\underline{F}_{ji}$) en de massa's m_i , waarvan er één willekeurig als eenheid kan worden gekozen. Als er één oplossing bekend is van bovenvermelde vergelijkingen, voldoen ook alle waarden van \underline{F}_{ij} en m_i , die verkregen worden door alle gevonden waarden met een constante factor te vermenigvuldigen. De keuze van één m_i als eenheid neemt deze vrijheid weg. De vergelijking hebben nu geen eenduidige oplossing als het aantal onbekenden groter is dan het aantal vergelijkingen, dus als:

$$\frac{1}{2}rn(n-1)+(n-1) > 3nr, \text{ oftewel:}$$

$$n > 7 - 12/(rn + 2)$$

Hieruit volgt dat zodra voor het aantal objecten n geldt dat $n \geq 7$ er geen unieke oplossing voor de krachten bestaat, hoe vaak we ook meten. Het aantal onbekenden neemt immers veel sneller met n toe (n.l. kwadratisch) dan het aantal vergelijkingen (dat lineair met n groeit). De vorm van de krachtwet is dus niet strikt *afleidbaar* uit de experimentele gegevens. Algemeener kunnen we concluderen dat het niet altijd mogelijk is de waarde van theoretische grootheden, en de relaties waaraan ze voldoen, af te leiden uit waarnemingsgegevens. In de moderne wetenschapsfilosofie is men dan ook teruggekomen van het idee dat alle theoretische relaties direct moeten volgen uit relaties tussen meetbare grootheden. We gaan hier later nog verder op in (paragrafen 3.3-3.4).

Bij "kracht" gaat het volgens Mach om een begrip dat wel bruikbaar is, maar dat van ongewenste associaties moet worden bevrijd. Er zijn volgens hem echter ook begrippen die weliswaar nog steeds in de natuurkunde worden gebruikt, maar die feitelijk 'metafysisch' zijn, en daarom principieel ontoelaatbaar. Het belangrijkste voorbeeld van een begrip uit deze laatste categorie is de "absolute ruimte" uit de mechanica van Newton. Newton spreekt over "absolute rust" en de "absolute snelheid" alsof dat welbepaalde begrippen zijn. In de waarneming hebben we echter alleen te maken met *relatieve* beweging of rust, d.w.z. beweging of rust van een lichaam ten opzichte van andere lichamen. Alle plaatsbepalingen die in metingen feitelijk gebruikt worden leggen immers posities alleen op zo'n relatieve wijze vast.

Omdat de absolute ruimte, ten opzichte waarvan absolute rust en beweging gedefinieerd zijn, zelf niet waarneembaar is, dient dit begrip volgens Mach uit de natuurkunde verwijderd te worden. Een werkelijk empirische fysica moet kunnen werken met een mechanica waarin alleen relatieve bewegingen voorkomen.

Newton zelf had het problematisch karakter van het begrip "absolute ruimte" al aangevoeld. Hij meende evenwel te kunnen aantonen dat het wel degelijk in de waarneming gefundeerd kon worden als er maar gelet werd op *dynamische* verschijnselen naast de zuiver *kinematische* (in de kinematica houdt men zich bezig met lengte- en tijdbepalingen, en de in abstracto mogelijke bewegingen; in de dynamica komen daar de feitelijk voorkomende interacties en bewegingsvergelijkingen bij). Ter illustratie daarvan voerde Newton zijn beroemd geworden "emmer-experiment" aan. Een emmer, gevuld met water, wordt aan een touw opgehangen. Vervolgens wordt de emmer een aantal malen rondgedraaid, zodat het touw gewrongen raakt. Wanneer de emmer dan wordt losgelaten begint hij te roteren. Nu zijn achtereenvolgens de volgende verschijnselen waar te nemen.

1. De emmer zelf draait, maar het water draait nog niet mee. Het water oppervlak is vlak.
2. Het water is, door wrijving met de emmer, mee gaan roteren. Het water staat tegen de kanten van de emmer op.
3. De emmer is tot rust gekomen, maar het water draait nog na. Het water staat nog steeds hol in de emmer.

Newton vraagt nu naar de oorzaak van de vervorming van het wateroppervlak. Blijkbaar is die gelegen in de draaiing van het water. Maar draaiing ten opzichte van wat? Het kan geen draaiing ten opzichte van de emmer zijn, want in de situaties 2 en 3 hierboven was het water respectievelijk in rust en in rotatie tegenover de emmer; maar in beide gevallen stond het wateroppervlak hol. Kennelijk, zo redeneert Newton, gaat het hier niet om een relatieve rotatie (een rotatie met betrekking tot andere lichamen), maar om een absolute rotatie; we moeten veronderstellen dat de oorzaak van de vervorming van het wateroppervlak gelegen is in de draaiing van het water ten opzichte van de absolute ruimte. Meer in het algemeen moet het voorkomen van "traagheidskrachten" (centrifugaal- en corioliskrachten) gezien worden als een gevolg van versnelde beweging ten opzichte van de absolute ruimte. Mach constateert dat Newton in zijn gedachte-experiment met de emmer blijkbaar uitgaat van een situatie waarin alleen de emmer en het water

(en een ophangpunt) aanwezig zijn. Om te beoordelen of de draaiing van het water ten opzichte van materie belangrijk is, let Newton immers alleen op de onderlinge beweging van emmer en water. Maar als we het experiment in werkelijkheid uitvoeren, betoogt Mach, kunnen we helemaal niet op Newtons manier redeneren. In een feitelijk experiment zouden we altijd moeten concluderen dat de rotatietoestand van het water *ten opzichte van andere materie in het heelal iets* uitmaakt voor de vorm van het wateroppervlak. We zien dan immers gebeuren dat weliswaar de draaiing met betrekking tot de emmer irrelevant is, maar dat de draaiingstoestand van het water tegenover de Aarde, of de vaste sterren, wel iets uitmaakt. Wat er zou gebeuren in de denkbeeldige situatie waarin zich in een ledige ruimte alleen een emmer met water zou bevinden - daarover kunnen we niets zeggen, stelt Mach. Dat het wateroppervlak zich dan zou gedragen op de door Newton beschreven wijze is in het geheel niet zeker. Overigens beginnen we ons met zo'n vraag al buiten het eigenlijke gebied van de natuurkunde te begeven. In de natuurkunde gaat het immers uitsluitend om de feitelijke, waarneembare regelmatigigheden in *onze* wereld, niet om die in een denkbeeldige andere wereld. Mach drukt dit als volgt uit: "het universum is ons slechts één maal gegeven". We hoeven, met andere woorden, geen theorieën te verzinnen over wat er *zou* gebeuren in omstandigheden die feitelijk nooit gerealiseerd zijn.

Mach trekt de conclusie dat traagheidskrachten in de fysische theorieën kunnen worden ondergebracht zonder de absolute ruimte een plaats in die theorieën te geven. We kunnen simpelweg de regelmatigheden registreren tussen enerzijds de waarneembare centrifugaal- en corioliseffecten en anderzijds de versnellingen ten opzichte van bijvoorbeeld de vaste sterren. Mach gaat nog verder door in zijn "Mechanik" te suggereren dat ook een *dynamische* theorie mogelijk zou zijn, waardoor zulke "schijnkrachten" begrepen kunnen worden als een dynamisch effect van beweging ten opzichte van de verre massa's in het heelal. Zo'n theorie zou bijvoorbeeld voorspellen dat als grote stermassa's plotseling van beweging zouden veranderen, dit merkbaar zou zijn in op Aarde optredende traagheidskrachten. Mach is er echter niet in geslaagd concrete vorm te geven aan deze gedachte. Later heeft het idee - dat wel "het principe van Mach" wordt genoemd - wel een belangrijke rol gespeeld bij Einsteins werk dat tenslotte uitmondde in de algemene relativiteitstheorie. We zien hier een voorbeeld van een in de geschiedenis van de fysica vaker voorkomend verschijnsel: filosofische opvattingen over de aard en functie van natuurkundige theorieën leiden soms op natuurlijke wijze tot fysisch onderzoek in een bepaalde richting.

Opgaven.

1. De boven gegeven analyse waaruit de onbepaalbaarheid van massa's en krachten blijkt bij veel-deeltjessystemen is eigenlijk niet helemaal correct. Als we de bewegingsvergelijkingen optellen, rekening houdend met de conditie $\underline{F}_{ij} = -\underline{F}_{ji}$, vinden we dat $\sum_i m_i a_i = 0$ (d.w.z. het zwaartepunt beweegt eenparig). In deze vergelijking zijn de n massa's onbekend en de versnellingen waarneembaar. Door de versnellingen nu r keer te meten, met $3r > n$, kunnen de massa's worden bepaald. Ga na wat dit voor consequenties heeft voor de bepaalbaarheid van de krachten tussen de deeltjes.
2. Probeer Newtons argumentatie voor het bestaan van een absolute ruimte te analyseren. Stel daartoe dat ook in een verder leeg universum alles zo gebeurt als Newton in de weergave van zijn emmer-experiment beschrijft. Is dan het bestaan van een absolute ruimte (die de notie "absolute rust" zin geeft) werkelijk dwingend aangetoond?
3. Wat vind je van Machs opvatting dat natuurkundige theorieën alleen feitelijk voorkomende regelmatigheden hoeven te ordenen? In de kosmologie heeft men het vaak over verschillende "universa" die horen bij verschillende "randcondities". In werkelijkheid is er, voorzover wij weten, maar één universum, met de daarbij behorende condities. Betekent dit dat de kosmologie zich bezig houdt met niet-fysische speculatie?

Machs positie staat dicht bij die van eerdere radicale empiristen. Doordat hij zich in zijn analyses richt op de 19^e-eeuwse natuurkunde, krijgt die positie een nieuwe, meer technische, uitwerking. Zijn verzet tegen ieder *a priori* in de natuurkunde kreeg de wind extra in de zeilen, toen bleek dat de algemeen geaccepteerde principes van de klassieke fysica bijna allemaal moesten worden vervangen. Zuiver Kantiaanse posities worden in de filosofie van de 20^e-eeuwse fysica vrijwel niet meer aangehangen. Machs denkbeelden met betrekking tot de rol van de ervaring hebben op ruime schaal ingang gevonden. Anders staat het echter met zijn ideeën over wat in de natuurkunde toegelaten begrippen zijn. In Machs ogen kunnen alleen die begrippen genade vinden die direct verwijzen naar waarneembare grootheden of die expliciet definieerbaar zijn in termen van waarneembare grootheden (zie zijn analyse van het kracht begrip). Begrippen waarvoor dat niet het geval is

kunnen hoogstens een nuttige, economische, rol spelen bij de ordening van de waarnemingen. Ze kunnen niet opgevat worden als verwijzingen naar iets dat fysisch reëel is. Deze opvatting is moeilijk in overeenstemming te brengen met de praktijk van de natuurkunde. Dat bleek in het bijzonder toen aan het eind van de 19^e eeuw en aan het begin van deze eeuw een strijd losbrandde over het al dan niet werkelijk bestaan van atomen en moleculen. Mach en zijn medestanders stelden zich in deze strijd op het standpunt dat "aatom" en "molecule" termen zijn die handig zijn om te gebruiken, maar waaraan geen realiteitswaarde toekomt. De enige realiteit waar de fysica mee te maken heeft is de realiteit van de waarneming. Daartegenover zijn "aatom" en "molecule" slechts *woorden*, die dienst doen in een redenering die waarnemingen met elkaar in verband brengt. Vanuit deze visie is de thermodynamica de ideale wetenschappelijke theorie. Deze brengt immers waarneembare grootheden als druk, volume en temperatuur op een zeer directe wijze met elkaar in relatie, met een minimum aan theoretische toevoegingen.

Deze zienswijze werd niet gedeeld door de meeste aanhangers van de kinetische theorie (later: de statistische mechanica). Fysici als Boltzmann, Maxwell en Einstein zagen atomen en moleculen als entiteiten die op dezelfde wijze bestaan als macroscopische objecten zoals tafels en stoelen; ze zijn alleen te klein om door ons te worden gezien. Dit laatste zegt echter alleen iets over de hoedanigheden van ons waarnemingsapparaat en niet iets over de werkelijkheid van de atomen en moleculen zelf. We zien hier weer de instrumentalisme/realisme tegenstelling opduiken.

In de historische ontwikkeling van de fysica kregen de medestanders van Boltzmann de overhand. Dat gebeurde vooral nadat Einstein in 1905 had aangetoond dat de kinetische theorie in sommige situaties tot andere empirische voorspellingen voert dan de thermodynamica (Brownse beweging, fluctuatievervalsingen) en toen deze voorspellingen niet lang daarna in experimenteel onderzoek daadwerkelijk werden geverifieerd (in het bijzonder door het werk van de Franse onderzoeker Perrin). Algemeen werd dit opgevat als een bewijs dat atomen en moleculen echt bestaan. In ieder geval waren na dit werk de begrippen "aatom" en "molecule" niet meer weg te denken uit de natuurkunde. Empiristen zagen zich dan ook in het begin van de 20^e eeuw voor de taak gesteld de analyses van Mach zó te liberaliseren, dat de hoofdideeën ongewijzigd bleven (dus met behoud van de fundamentele rol van de empirie en met afwijzing van ieder a-priorisme) maar dat er wel ruimte kwam voor het gebruik van concepten als "aatom" en "molecule". Dit komt neer op het uitvoeren van een programma waarin aangetoond wordt

dat het gebruik van zulke begrippen, zoals dat in de praktijk plaatsvindt, niet boven de empirie uitgaat en dus ook niets "metafysisch" in de natuurkunde introduceert. De navolgers van Mach die in de eerste helft van de 20^e eeuw dit programma hebben trachten uit te voeren staan bekend als de *logisch-empiristen*.

3.3 Het logisch-empirisme

Het logisch-empirisme is een beweging die in de twintiger en dertiger jaren van deze eeuw ontstond. De beweging groepeerde zich rond een aantal Weense wetenschapsmensen, afkomstig uit verschillende disciplines, die geregeld bijeenkwamen. In deze "*Wiener Kreis*" traden vooral de fysicus Moritz Schlick, de logicus en fysicus Rudolf Carnap, de fysicus Philipp Frank, de historicus Viktor Kraft, de wiskundige Hans Hahn, de socioloog Otto Neurath en de filosofen Herbert Feigl en Friedrich Waismann op de voorgrond. De ideeën van de groep vonden ook buiten Wenen spoedig ingang. In Berlijn ontstond zo een soortgelijke kring rond de fysicus/filosoof Hans Reichenbach, de wiskundige Richard von Mises en de filosoof Carl Hempel. Ook in Engeland (A. Ayer) en Amerika (E. Nagel) vond de beweging veel weerklank. Naast de vaste leden van de Wiener Kreis, die zich verenigd hadden in de "Ernst Mach Verein", werden de discussiebijeenkomsten soms ook bijgewoond door anderen met verwante standpunten. Bekende filosofen uit deze laatste groep zijn Ludwig Wittgenstein en Karl Popper.

Het logisch-empirisme begon als een poging om Machs beeld van de wetenschap te preciseren en om te laten zien dat de wetenschappelijke praktijk niet met dat beeld - mits voldoende uitgewerkt - in strijd was. Mach had gesproken over "atomen" en "moleculen" als economische hulpmiddelen bij het ordenen van de zintuiglijke indrukken. De logisch-empiristen stelden zich nu ten doel de status van dit soort "*theoretische begrippen*" nader te analyseren. Een belangrijk verschil met Machs eigen werk was daarbij dat zij in hun analyse gebruik maakten van de *formele logica*.

De logica neemt al een belangrijke plaats in bij het werk van Aristoteles. Zoals we daar zagen is kenmerkend voor de logische redenering dat zij niets inhoudelijks toevoegt aan wat al bevat is in de premissen. In de 19^e eeuw werd de Aristotelische logica (die lange tijd als een afgesloten wetenschapsgebied was beschouwd) enorm uitgebreid, o.a. door G. Frege. Uit deze tijd stamt het uiterlijk van de formele logica zoals we die nu kennen. In het begin van de 20^e eeuw bereikte de logica een voorlopige afsluiting door het grote

werk van Whitehead en Russell, de Principia Mathematica.

De auteurs probeerden hierin te bewijzen dat de gehele wiskunde tot logica kan worden gereduceerd. Deze poging kon ondernomen worden omdat men beseftte dat de logica zelf niet van empirische aard is; en dat was ook precies de visie die men in de 19^e eeuw op de wiskunde had ontwikkeld. De formele logica is inderdaad zuiver *formeel*; het is een stelsel waarin volgens nauwkeurig vastgelegde regels met symbolen wordt gemanipuleerd. In dit stelsel zijn bepaalde reeksen van symbolen, de *axioma's*, aangewezen als startpunt voor de manipulaties. De regels die de toegestane transformaties vastleggen worden *deductieregels* genoemd.

Met behulp van de deductieregels worden uit de axioma's *stellingen* afgeleid. Het belangrijke punt is dat de symbolen in zo'n systeem (een z.g. *calculus*) geen betekenis hebben boven dat wat gegeven wordt door hun rol in het systeem zelf. In het bijzonder verwijzen zij niet naar objecten in de fysische werkelijkheid. De formele logica is een geschikt instrument voor de logisch-empiristische analyses juist omdat zij geen empirische inhoud heeft. De logisch-empiristen hoopten in staat te zijn te bewijzen dat theoretische termen als "atoom" met logische hulpmiddelen te definiëren zijn in termen van waarnemingsgegevens. Dat zou de consequentie hebben dat, geheel in Machs geest, zulke theoretische begrippen *in principe* kunnen worden vervangen door directe waarnemingstermen; de logica voegt immers niets toe. Het zijn dan inderdaad alleen handige hulpmiddelen voor het ordenen van de waarneming, waaraan geen principiële betekenis toekomt. Hun "realiteitswaarde" zou ook niet langer problematisch zijn; aangezien ze alleen maar fungeren als een soort afkortingen voor verzamelingen van waarnemingsgegevens zouden ze even reëel zijn als de waarnemingen zelf, maar alleen bij de gratie van het feit dat ze naar niets *achter* de waarneming verwijzen.

Als een begrip geheel gedefinieerd kan worden in termen van waarnemingsgegevens is ook steeds op grond van de waarneming uit te maken of het begrip in een concreet geval toepasbaar is of niet. We kunnen immers controleren of de bij het begrip behorende waarneembare verschijnselen zich al dan niet voordoen. Omgekeerd is het ook zo dat als een precies omschreven verzameling van waarnemingsgrootheden altijd voldoende is om uit te maken of een theoretisch begrip van toepassing is, dat begrip gedefinieerd kan worden in termen van die waarnemingsgrootheden. Deze gedachtegang bracht de logisch-empiristen tot het z.g. *verificatiecriterium van betekenis*. Volgens dit criterium hebben begrippen alleen betekenis voorzover ze verbonden zijn met een methode van verificatie, die het mogelijk maakt op grond van waarnemingsgegevens uit te maken of het begrip van toepassing

is. Begrippen waarbij dat niet het geval is hebben een *metafysisch* karakter. Ze kunnen misschien soms wel een functie hebben, bijvoorbeeld in poëzie om een bepaalde gemoedstoestand op te roepen, maar in de natuurwetenschappen horen ze niet thuis. Ze zijn niet geschikt om kennis over de natuur te formuleren (dit wordt ook zo uitgedrukt: ze zijn niet *cognitief significant*). Als nu gevraagd wordt naar de betekenis van uitspraken waarin theoretische begrippen voorkomen die wél cognitief significant zijn, kan het antwoord simpel zijn: hun betekenis wordt gegeven door de ermee verbonden methode van verificatie. Theoretische begrippen *betekenen* niets meer dan een zeker complex van waarnemingsgegevens.

Zo *betekent* het begrip "lengte" volgens deze opvatting eenvoudig datgene wat we vinden bij precies voorgeschreven manipulaties met een meetstok. "Tijd" is niets anders dan de aanwijzing van een nauwkeurig gespecificeerde klok. Als we in het laboratorium zeggen: "door deze draad loopt een stroom van drie ampère", dan heeft dat de *betekenis* dat de wijzer van een in de draad opgenomen metertje op "drie" staat.

De logisch-empiristen kritiseerden, geheel in de stijl van Mach, de klassieke fysica omdat die niet altijd duidelijk maakt welke verificatieprocedures corresponderen met de gebruikte begrippen. Dit gebrek had hier en daar volgens hen geleid tot metafysische elementen in de natuurkunde; d.w.z. tot betekenisinhoud van begrippen die niet gesteund wordt door de waarneming. Een goed voorbeeld van zo'n ongewenste gang van zaken wordt geleverd door de analyse van het gelijktijdigheidsbegrip zoals dat in de 19^e-eeuwse fysica werd gehanteerd. Wat betekent "gelijktijdig" eigenlijk? Voor twee gebeurtenissen op dezelfde plaats is er geen probleem: deze gebeurtenissen zijn gelijktijdig dan en slechts dan als ze samenvallen. Maar voor gebeurtenissen op een afstand ligt de zaak niet zo duidelijk. Wat is de procedure voor het *feitelijk vaststellen* van gelijktijdigheid (de methode van verificatie)? De logisch-empiristen verweten de fysici uit de 19^e eeuw zich niet expliciet met deze vraag bezig te hebben gehouden. Dat had ertoe geleid dat men kritiekloos allerlei eigenschappen van het begrip "gelijktijdig" had aangenomen, zonder dat men eigenlijk wist waarover men sprak. In het bijzonder had men klakkeloos de doctrine van de "absolute tijd" geslikt, volgens welke "gelijktijdigheid" een absolute notie is (d.w.z. dezelfde gebeurtenissen zijn gelijktijdig voor alle waarnemers). Maar hierover kan pas een besluit genomen worden als we weten wat gelijktijdigheid werkelijk is, m.a.w. welke verificatieprocedure met het begrip overeenkomt. Zo'n expliciete vastlegging van het begrip werd pas voor het eerst gegeven door Einstein, in zijn speciale relativiteitstheorie (1905). Einstein stelde de volgende procedure voor. Stel

er zijn twee soortgelijke klokken A en B, op afstand van elkaar. Om ze gelijk te zetten sturen we op tijdstip t_1 (op de klok van A) een lichtsignaal van A naar B, dat onmiddellijk teruggekaatst wordt naar A (met een spiegeltje). Stel dat het signaal op tijdstip t_3 (weer op de klok van A) terugkeert. Dan zeggen we dat klok A gelijk loopt met klok B als klok B op het moment van reflectie (op de plek van B) de tijd $\frac{1}{2}(t_1 + t_3)$ aangeeft. Met andere woorden, het punt uit de geschiedenis van A waarin A de tijd $\frac{1}{2}(t_1 + t_3)$ aanwijst wordt als gelijktijdig genomen met de "reflectie-gebeurtenis" uit de geschiedenis van B. Dit is, zeggen de logisch-empiristen, nu precies het soort van definities dat we nodig hebben in de natuurkunde. We weten nu exact wat "gelijktijdigheid" betekent. Bij verder onderzoek van de eigenschappen van het zo gedefinieerde begrip blijkt nu dat er helemaal geen reden is om aan te nemen dat "gelijktijdigheid" een absoluut begrip is. Integendeel, in de uitwerking van de relativiteitstheorie komt juist naar voren dat *verschillende* gebeurtenissen gelijktijdig zijn voor *verschillende* waarnemers. Volgens de logisch-empiristen was dit te zien als een bewijs voor de juistheid van het verificatiecriterium van betekenis.

Deze eerste vorm van het logisch-empirisme die, afgezien van het logisch instrumentarium, zeer dicht bij Machs wijze van analyse ligt, stuit echter op een aantal moeilijkheden wanneer geprobeerd wordt *alle* theoretische termen in moderne fysische theorieën op de zojuist geschetste wijze te behandelen. Deze problemen zijn aanleiding geweest om de criteria voor zinvolheid en betekenis van theoretische begrippen te versoepelen. Drie van zulke moeilijkheden hebben een centrale rol gespeeld in de ontwikkeling van de logisch-empiristische analyse:

1. als theoretische begrippen expliciet worden gedefinieerd, zoals boven besproken, hoort bij iedere meetprocedure een eigen begrip; dit is echter niet de manier waarop in de fysische praktijk begrippen worden gehanteerd;
2. het is moeilijk om eigenschappen expliciet te definiëren die een "dispositioneel" karakter hebben;
3. de behandeling van theoretische begrippen door middel van expliciete definities doet geen recht aan de praktijk, waarin altijd rekening gehouden wordt met eventueel aanwezige verstoringen die een testresultaat kunnen beïnvloeden.

Beschouw voor het eerste bezwaar het volgende voorbeeld. Stel we definiëren "lengte" als het resultaat van handelingen met meetstokken. Dan

correspondeert het resultaat van wat we normaal ook een lengtebepaling zouden noemen, maar nu met een andere - bijvoorbeeld optische - methode, blijkbaar met een *ander* begrip. Zo krijgen we een rij van begrippen, "*lengte*₁", "*lengte*₂", etc, die in principe allemaal van elkaar onafhankelijk zijn. Dat die verschillende begrippen, voorzover ze tegelijkertijd toepasbaar zijn, door dezelfde *getallen* gekarakteriseerd kunnen worden, is dan een empirische regelmatigheid. Dit strookt niet met de fysische praktijk waarin eerder gedacht wordt aan één lengtebegrip, waarbij verschillende meetprocedures kunnen horen. Deze laatste zienswijze is echter weer niet in overeenstemming te brengen met het idee dat een begrip door een procedure gedefinieerd wordt.

Als een begrip *gedefinieerd* wordt in termen van waarnemingsgegevens, moet het totaal vervangen kunnen worden door een uitdrukking waarin alleen die gegevens voorkomen. Dat leidt tot moeilijkheden bij begrippen die een z.g. "dispositie" aanduiden, d.w.z. een "neiging" tot bepaald gedrag die nooit feitelijk op waarneembare wijze tot uiting hoeft te komen. Denk bijvoorbeeld aan begrippen als "breekbaar", "oplosbaar", en "gevoelig voor sterke magneetvelden". Het is heel gewoon in de natuurkunde om zulke eigenschappen aan objecten toe te schrijven ook al doen zich de omstandigheden waaronder die eigenschappen zich direct merkbaar zouden kunnen maken nooit voor. Een klontje suiker is oplosbaar ook als het nooit wordt opgelost; een object kunnen we breekbaar noemen ook al brengen we het nooit in omstandigheden waarin het feitelijk kan breken. Dat betekent dat een begrip als "oplosbaar" niet zonder meer uitwisselbaar is met een verzameling werkelijk beschikbare waarnemingsgegevens. In de fysica is het zo dat de toeschrijving van dispositionele begrippen wel testbare consequenties heeft (*als* op een breekbaar object wordt geslagen, *dan zal* het breken), maar dat zulke begrippen niet *gedefinieerd* worden door de toetsprocedures. We komen op deze wijze tot eenzelfde soort conclusie als bij de bespreking van het eerste bezwaar.

Tenslotte moet nog bedacht worden, en dit is het derde van de boven opgesomde punten, dat de uitkomsten van toetsingsprocedures niet altijd doorslaggevend behoeven te zijn. Stel we willen controleren of een bepaald klontje suiker wel oplosbaar is. We doen het in een kopje water en wachten. Stel, het klontje lost niet op. Zijn we er nu 100% zeker van dat het onoplosbaar is? Dat is niet het geval, want nooit is volledig uit te sluiten dat het gedrag van het klontje niet te wijten is aan een gebrek aan oplosbaarheid, maar aan andere, "verstorende", factoren. Is het bijvoorbeeld wel geheel zeker dat we met water te maken hebben en niet met een vloeistof

waarin suiker nooit oplost? Of is de temperatuur van het water wel voldoende gecontroleerd, zodat we niet met water van 0°C te maken hebben? Altijd is er wel iets te bedenken, hoe "gekunsteld" misschien ook, waarmee het waargenomen gedrag begrepen kan worden zonder de dispositionele eigenschap waarom het begonnen was in twijfel te trekken. Dit wijst er weer op dat zulke eigenschappen niet op een zeer rigide manier vastgekoppeld zijn aan een voor eens en altijd vastgelegde verzamelingen van waarnemingsgegevens. Veeleer is het zo dat de eigenschappen in kwestie een rol spelen in een omvattende theoretische structuur die als geheel empirisch te toetsen is. De logisch-empiristen hebben hun aanvankelijke pogingen dan ook gewijzigd en een liberaler analysemodel voor natuurwetenschappelijke theorieën opgesteld. Het beeld dat op deze wijze is ontstaan wordt wel het "standaardbeeld" genoemd, omdat het gedurende enige decennia (tot in de zestiger jaren) vrijwel unaniem werd geaccepteerd.

Opgave. In de beginjaren van het logisch-empirisme werd geprobeerd dispositionele begrippen met logische hulpmiddelen te definiëren in termen van waarnemingsgegevens. Een voor de hand liggende poging is de volgende:

$$B(x) \equiv \forall t (S(x,t) \longrightarrow K(x,t))$$

te lezen als: "object x is breekbaar" is equivalent met "voor ieder tijdstip t geldt dat als op x geslagen wordt x kapot gaat". Hierin zijn S en K waarnemingstermen en \longrightarrow de logische implicatie. Wat zegt deze definitie over objecten waarop nooit wordt geslagen?

3.4 Het standaardbeeld van empirische theorieën

In het "standaardbeeld" (in het Engels: "received view") worden een aantal componenten in een natuurwetenschappelijke theorie onderscheiden. Allereerst is er een calculus C die geformuleerd is in een logische taal L . De taal L bevat de logische symbolen (implicatie, disjunctie, conjunctie, e.d.) en niet-logische "constanten" (de overige symbolen, die later geschikt zullen zijn dingen van buiten de taal aan te duiden). De calculus C omvat de logische axioma's en de deductieregels waarmee uit deze axioma's stellingen zijn af te leiden. Zoals al eerder is benadrukt is zo'n calculus geen empirische theorie; er is nog geen enkel verband met de waarneming. Een calculus kan voorgesteld worden als een spel, volgens vaste spelregels, met symbolen.

De niet-logische primitieve constanten van L worden onderverdeeld in twee klassen: de observatietermen V_0 en de theoretische termen V_T . Dit induceert een onderverdeling van L in "ondertalen" en van C in "ondercalculi". In het bijzonder krijgen we de observatietaal L_0 , en de geassocieerde calculus C_0 , als de stukken van L en C die alleen termen uit V_0 bevatten. Deze observatietaal en de geassocieerde calculus worden nu *empirisch geïnterpreteerd* door voor ieder symbool uit V_0 aan te geven welke waarneembare gebeurtenissen, objecten, e.d., erdoor worden aangeduid.

Tenslotte wordt het zo ontstane samenstel gecompleteerd met *theoretische axioma's* - hierbij is te denken aan de basiswetten van een fysische theorie, die geformuleerd zijn in termen van theoretische grootheden uit V_T - en z.g. *correspondentieregels*, die verbanden leggen tussen termen uit V_0 en termen uit V_T . De volledige theorie die zo ontstaat wordt "partieel geïnterpreteerd" genoemd. De betekenis van de waarnemingstermen is vastgelegd door hun verwijzing naar waarneembare grootheden, maar de betekenis van de theoretische termen is niet op die wijze vastgelegd. Hun betekenis wordt indirect, en slechts "gedeeltelijk", partieel, gegeven, d.w.z. niet met expliciete definities gefixeerd. Deze partiële interpretatie komt tot stand doordat een aantal theoretische termen via de correspondentieregels met waarnemingstermen in verband staan. De empirische betekenis die zo aan een aantal termen uit V_T wordt gegeven, wordt verder verbreid door het theoretische netwerk via de onderlinge verbanden tussen de theoretische termen die zijn geformuleerd in de theoretische axioma's.

Volgens bovenstaand schema zou een moderne theorie uit de hoge-energie-fysica ongeveer als volgt moeten worden geanalyseerd. Er zijn formele logische ingrediënten; hiertoe kunnen we ook het wiskundig instrumentarium rekenen. (De logisch-empiristen gingen er vanuit dat de wiskunde volledig herleidbaar is tot logica - een in de grondslagen van de wiskunde omstreden zaak. Eventueel kunnen in het standaardbeeld wiskundige symbolen en axioma's naast de logische worden opgenomen.) Verder zijn er de fundamentele fysische axioma's, geformuleerd met behulp van "primitieve" theoretische termen. Deze zouden kunnen gaan over de eigenschappen van quarks, de wisselwerking tussen de quarks, hetzelfde met betrekking tot leptonen, etc. Nieuwe theoretische begrippen kunnen vervolgens gedefinieerd worden op basis van de al voorkomende primitieve theoretische termen. Zo zouden we "neutronen", "protonen", "waterstofatomen", etc. successievelijk kunnen invoeren als aanduidingen van welbepaalde complexen van quarks en elektronen. Het gaat hier dus om *definities* binnen de *theoretische calculus*; er wordt nog geen empirische waarde aan de termen toegekend. Tenslotte

wordt er een verband gelegd tussen een aantal van de theoretische termen (primitieve of gedefinieerde) en waarnemingstermen. Deze laatste verwijzen naar waarneembare verschijnselen, en komen daarom normalerwijs in de omgangstaal al voor. Denk bijvoorbeeld aan begrippen als "helder", "donker", "lampje", "wijzer", "warm", "koud", etc. Het verband tussen theoretische termen en waarnemingstermen wordt in de logisch-empiristische zienswijze tot stand gebracht door correspondentieregels. Dit zijn uitspraken die minstens zowel één theoretische als één observationele term moeten bevatten. Het hoeft echter niet om *definities* van theoretische begrippen in termen van de waarneming te gaan. Een voorbeeld van een correspondentieregel zou kunnen zijn: "bij het passeren van een bellenvat laat een elektron een spoor van belletjes na". Door deze regel wordt het begrip "elektron" niet *gelijkgesteld* met een bellenspoor (iets wat in de begintijd van het logisch-empirisme wel aan de orde was), maar wordt alleen een *relatie* gelegd tussen het gebruik van het theoretische begrip en waarneembare verschijnselen.

De criteria voor "zinnigheid" van theoretische begrippen worden in het standaardbeeld aanmerkelijk versoepeld ten opzichte van het oorspronkelijke verificatiecriterium van betekenis. Volgens dat oorspronkelijke idee had een term alleen betekenis, en mocht alleen toegelaten worden in het wetenschappelijk taalgebruik, als hij geheel vervangen kon worden (in principe) door een complex van waarnemingsgegevens. In de latere analyses wordt het criterium steeds meer dat een term betekenis heeft als hij een rol speelt in een theorie die "partieel geïnterpreteerd" is, d.w.z. door correspondentieregels met de waarneming is verbonden. Een illustratie van het verschil wordt geleverd door het begrip "absolute ruimte" uit de mechanica van Newton. Volgens Mach, en ook de logisch-empiristen in het beginstadium van de beweging, is dit een metafysisch begrip omdat het niet correspondeert met iets waarneembaars. In het standaardbeeld is "absolute ruimte" wel een toegelaten begrip, omdat het een rol speelt in de partieel empirisch geïnterpreteerde mechanische theorie.

Opgave. Probeer aan te geven hoe een analyse van de klassieke mechanica volgens het standaardbeeld eruit zou zien. Welke rol vervullen de begrippen "absolute ruimte" en "absolute rust"?

3.5 Groei van de natuurwetenschap volgens het logisch-empirisme

Het standaardbeeld is gekoppeld aan een visie op de groei van de natuurwetenschap. Volgens de logisch-empiristen wordt een theorie naarmate zij meer voorspellingen doet die ook feitelijk uitkomen, steeds beter *bevestigd*. Als een theorie zeer goed is bevestigd wordt de kans dat zij in de toekomst ongeldig zal blijken heel gering. In de fysica ingeburgerde theorieën als de klassieke mechanica, de theorie van Maxwell, e.d., waarmee generaties van onderzoekers hebben gewerkt, zullen dus vrijwel zeker nooit meer worden verworpen. Natuurlijk leert de geschiedenis ons dat nieuwe theorieën op het toneel verschijnen, zoals de relativistische mechanica en de quantumelektrodynamica. Maar in het logisch-empiristische perspectief gaat het daarbij niet om een aantonen van de ongeldigheid van de oude theorieën, maar om het aanbrengen van *aanvullingen* daarop.

Deze zienswijze staat dicht bij wat we Newton zagen betogen in zijn *Regulae Philosophandi*. Newton stelde dat door inductie verkregen theorieën maar op twee manieren in de toekomst tekort kunnen blijken te schieten:

- doordat ze bij nauwkeuriger waarneming alleen binnen het gebied van de eerdere, onnauwkeurigere, waarnemingen blijken te gelden
- doordat er een nieuw bereik van fenomenen geopend wordt waarin afwijkende wetten gelden.

In beide gevallen blijft de oude theorie van toepassing *binnen zijn eigen domein*. De nieuw verworven kennis geeft alleen een uitbreiding aan de kennis die we al bezaten en tast die niet aan.

Binnen de terminologie van het standaardbeeld is dit ook nog zo te zeggen. Meetprocedures voor theoretische grootheden zijn geformuleerd als correspondentieregels. Wanneer we nu nauwkeuriger gaan meten voegen we eigenlijk correspondentieregels toe, geassocieerd met de nieuwe meettechnieken. We krijgen zo een *uitbreiding* van de theorie, zodat zij op een wijder terrein van verschijnselen toepasbaar is. Als we ons echter beperken tot de oude meettechnieken kunnen we rustig de oude theorie blijven gebruiken.

In principe blijft iet zo dat een theorie, in de empiristische beschouwingswijze, een schema is ter ordening van de verschijnselen. Het totaal van alle verschijnselen die onder een theorie vallen is in zekere zin die theorie zelf, geeft althans de totale empirische inhoud van de theorie weer. Bij verdergaand natuurwetenschappelijk onderzoek neemt nu die totale hoeveelheid

van bekende verschijnselen steeds verder toe. De empirische inhoud van de nieuwe theorieën groeit dus op een continue wijze uit die van de oude theorieën; de oude theorieën blijven een deel van de nieuwe. Ook langs deze weg komen we tot het resultaat dat theorieën niet worden verworpen maar alleen uitgebreid.

Bij zo'n proces van uitbreiding, die meettechnieken en domein van objecten kan betreffen, wordt door de logisch-empiristen gesproken van *reductie*. Wanneer een theorie T_1 uitgebreid wordt tot een meeromvattende theorie T_2 zegt men dat T_1 *gereduceerd* wordt tot T_2 . Zo is de klassieke mechanica te reduceren (te beschouwen als een deel van) de relativistische mechanica, en de thermodynamica is te reduceren tot de statistische mechanica.

Door het steeds verder gaande proces van reductie neemt de natuurwetenschap op continue wijze in omvang toe. Steeds meer verschijnselen worden steeds nauwkeuriger onderzocht en onder de scepter van theorieën gebracht. Bovendien worden theorieën die alleen op beperkte domeinen geldig zijn voortdurend gereduceerd tot algemenere theorieën (unificatie). Ze behouden echter hun geldigheid op hun eigen beperkte domein.

Opgave. Volgens de meeste logisch-empiristen is de klassieke mechanica niet *weerlegd* door relativiteitstheorie en quantummechanica, maar zijn alleen de grenzen van het domein ervan (het gebied waarbinnen de theorie geldt) vastgesteld. Binnen deze grenzen is de theorie nog net zo geldig als voorheen. Ben je het ermee eens dat natuurkundige theorieën op deze wijze als voor altijd geldig beschouwd kunnen worden?

3.6 Het post-positivisme

Het logisch-empirisme¹ rust in zijn standaarduitwerking op twee pijlers:

1. het idee dat er een strikt onderscheid bestaat tussen waarnemingstermen en theoretische termen (de eerste zijn volledig geïnterpreteerd, zonder tussenkomst van een theorie; de tweede zijn partieel geïnterpreteerd, via correspondentieregels en de door de theorie gelegde verbanden);

¹ook vaak "logisch-positivisme" genoemd, hoewel empirisme en positivisme niet strikt hetzelfde zijn. Met "positivisme" wordt dikwijls de opvatting geassocieerd dat de wetenschap in staat is alle problemen, ook maatschappelijke, aan te pakken en op te lossen; "empirisme" heeft niet zulke connotaties.

2. het idee dat de natuurwetenschap groeit door inductie uit de waarnemingen: theorieën worden door herhaalde bevestigingen steeds waarschijnlijker, en kunnen tenslotte niet meer worden weerlegd maar slechts generaliseerd en aangevuld.

Beide ideeën zijn al voor de oorlog heftig bekritiseerd door een aanvankelijke geestverwant van de Wiener Kreis, Karl Popper. Poppers opvattingen hebben vooral grote bekendheid gekregen na het uitkomen van zijn *Logic of Scientific Discovery* (1959), een Engelse vertaling van het oorspronkelijke *Logik der Forschung*.

3.6.1 Popper

Allereerst stelt Popper dat er geen strenge scheiding is tussen waarnemingstermen en theoretische termen. Er bestaat volgens hem geen "naakte", d.w.z. theorie-onafhankelijke, waarneming. Iedere observatie, hoe elementair ook, vooronderstelt een theorie. De begrippen waarmee we onze waarnemingen onder woorden brengen zijn namelijk altijd onderdeel van een totaalvisie, een theorie, die uitgaat boven wat in de zintuiglijke indrukken is vastgelegd. Neem als voorbeeld de waarneming van een glas water. Als we zeggen: "daar staat een glas water" impliceert dat allerlei andere uitspraken, zoals: "als de inhoud van het glas verwarmd wordt, zal hij gaan koken bij 100°C", of "het soortelijk gewicht van de inhoud is 1". Het is zeker niet het geval dat al deze uitspraken door ons gecontroleerd zijn; omdat er in principe oneindig veel van zulke uitspraken zijn zouden we dat ook helemaal niet kunnen. Het gaat hier om een heel algemeen punt, dat geldig is voor de simpelste observaties. Als we zeggen: "op die plaats bevindt zich een rode vlek" vooronderstelt dat van alles over de lichtval, het afwezig zijn van optische illusies, enzovoort.

Een onmiddellijk gevolg van het voorgaande is, zegt Popper, dat we nooit geheel zeker kunnen zijn van een waarnemingsuitspraak. We accepteren zulke uitspraken nooit definitief, maar altijd voorlopig. Als we zeggen "daar staat een glas water" is het niet uitgesloten dat we later die uitspraak terugtrekken, als zij in conflict komt met andere uitspraken.

Het onzekere van de waarnemingsuitspraken is een essentieel element van al onze kennis, aldus Popper. Altijd kan achteraf blijken dat we ons hebben vergist. We komen hiermee bij de kritiek op de tweede pijler van het logisch-empirisme, het inductivisme. Volgens Popper is het een illusie te menen dat herhaalde bevestigingen een theorie waarschijnlijker, zekerder, maken. Hume heeft immers al aangetoond dat de logische basis voor zulke

conclusies ontbreekt. Maar verder is het ook principieel ongewenst om in de wetenschap altijd uit te zijn op bevestigingen van theorieën. Het is namelijk helemaal niet moeilijk om bevestigingen te vinden van welk idee dan ook; en dit geldt des te sterker als de ideeën in kwestie vaag en onwetenschappelijk zijn. Volgens Popper is dit duidelijk te constateren bij bijvoorbeeld de theorie van de psycho-analyse (Freud) of in het Marxisme. Wat er ook gebeurt, aanhangers van deze theorieën weten het altijd wel als een ondersteuning van hun denkbeelden uit te leggen. Als vergaande bevestiging door de feiten het criterium van wetenschappelijkheid zou zijn, dan zouden de obscuurste en vaagste doctrines juist als de meest wetenschappelijke uit de bus komen. We moeten dus omzien naar andere criteria. Wat onderscheidt een fysische theorie van bijvoorbeeld de astrologie? Popper is van mening dat het essentiële verschil daarin is gelegen, dat de fysicus voorafgaand aan de experimenten bereid is omstandigheden te noemen waarin hij zijn theorie laat vallen. Er is een toetsing van natuurkundige theorieën aan de waarneming mogelijk, niet met de bedoeling bevestigingen te vinden, maar juist met het oogmerk de theorie te weerleggen, te *falsifiëren*.

Een wetenschappelijke theorie onderscheidt zich van onwetenschappelijke opvattingen, doordat zij falsificeerbaar, te weerleggen, is. Het gaat er in de wetenschap dus niet om theorieën te bevestigen en te behouden; de juiste tactiek is het formuleren van *gewaagde* theorieën met een grote kans op weerlegging. We leren immers van onze fouten. Iedere falsificatie van een theorie is een wetenschappelijk succes. Het formuleren van "veilige" theorieën, met geringe kans op weerlegging, is als onwetenschappelijk aan te merken; zulke theorieën zullen immers weinig inhoud hebben. Hoe groter de inhoud, de zeggingskracht, van een theorie is, hoe groter ook de hoeveelheid empirische uitspraken zal zijn die zij doet; en hoe groter dus ook de kans op falsificatie.

In plaats van het inductivisme van de logisch-empiristen komt zo een geheel ander beeld. Alle theorieën zijn te beschouwen als voorlopig, als hypothesen die erop wachten gefalsificeerd te worden. Op deze wijze wordt Hume's inductieprobleem opgelost, zo stelt Popper. Weliswaar is het niet logisch verantwoord tot de geldigheid van algemene uitspraken te besluiten op grond van een eindig aantal waarnemingen, maar het is wèl logisch mogelijk te concluderen dat een theorie ongeldig is. Eén enkele waarneming kan daarvoor in principe voldoende zijn. Hoeveel witte zwanen we ook zien, de uitspraak dat alle zwanen wit zijn wordt nooit zeker; telkens zou de volgende zwaan weer zwart kunnen zijn. Maar één zwarte zwaan is voldoende om de ongeldigheid van de uitspraak "alle zwanen zijn wit" aan te tonen.

Bij het voorgaande moet wel aangetekend worden dat ook falsificaties

volgens Popper nooit geheel en al zeker zijn. Een falsificatie is immers een conflict tussen een theorie en een waarnemingsuitspraak. We hebben echter al gezien dat waarnemingsuitspraken zelf nooit 100% zeker zijn. Het kan daarom in principe altijd gebeuren dat de falsificerende uitspraak later wordt teruggedenkt en de theorie weer in ere wordt hersteld. Popper zegt dat de acceptatie van waarnemingsuitspraken berust op een consensus binnen de kring van wetenschapsmensen; een consensus die in laatste instantie een conventioneel karakter heeft.

Waarnemingsuitspraken vooronderstellen volgens Popper een theoretisch kader. We kunnen geen waarnemingen in een theoretisch luchtledig doen; op zijn minst hebben we begrippen nodig om onze waarnemingskennis te formuleren. Maar zelfs als we over zulke begrippen beschikken is het nog niet zonder meer mogelijk waarnemingskennis te verzamelen. Waarneming moet namelijk altijd geleid worden door een *vraagstelling*. Als we de opdracht zouden krijgen: "neem maar waar", zouden we niet weten wat we moesten doen. Wat moeten we waarnemen, waarop moeten we letten? Uit de verlegenheid die we voelen bij de opdracht te observeren zonder meer, blijkt al dat waarneming altijd wordt voorafgegaan door een *probleem*. Pas als we op zoek zijn naar de oplossing van een probleem weten we waarop we moeten letten en wordt het zinvol waar te nemen.

De juiste gang van zaken in de wetenschap is daarom volgens Popper als volgt. In den beginne is er het probleem. Zo'n probleem zal in een theoretische context ontstaan zijn, eventueel op het niveau van de zeer rudimentaire theorieën die ons dagelijks leven beheersen. Ter oplossing van het probleem wordt een theorie voorgesteld. Hoe men aan die theorie komt doet niet ter zake; het zou om het resultaat kunnen gaan van een toevallige associatie, een droom of overschrijffout bij het kopiëren van een tekst. Dit is het gebied van de "context of discovery", dat interessant is voor de psychologie, maar niet relevant is voor de wetenschapsleer die zich bezig houdt met de vraag wat de wetenschappelijk merites zijn van de voorgestelde theorie. Bij de beantwoording van deze laatste vraag komen we op het terrein van de "context of justification". Volgens Popper wordt in de "context of justification" een overheersende rol gespeeld door de mate van falsificeerbaarheid van de theorie. Nadat de theorie is voorgesteld moet zij systematisch aan falsificatiepogingen worden onderworpen. In deze fase worden waarnemingen heel belangrijk. De ter discussie staande theorie *stuurt* de waarnemingen in de zin dat zij voorspellingen doet over bepaalde verschijnselen, die dan vanuit dat oogpunt experimenteel onderzocht kunnen worden. Er wordt vooruitgang geboekt als de onderzochte theorie in conflict raakt met één of meer

geaccepteerde waarnemingsuitspraken. In die situatie kunnen we zeggen dat we van de waarneming leren. Er moet dan gezocht worden naar een nieuwe theorie ("context of discovery") waarna de hele gang van zaken opnieuw begint.

Naast deze methodologische voorschriften verbindt Popper ook een filosofische visie op de interpretatie van natuurwetenschappelijke theorieën aan zijn analyse. Omdat er volgens hem geen scherp onderscheid is tussen theoretische termen en waarnemingstermen, is er geen reden verschillende ontologische status toe te kennen aan de door die termen aangeduide objecten. Of we het nu over "tafel" hebben of over "quark", in beide gevallen is er sprake van theoretisch geladen begrippen; er is geen principieel verschil. Daarom is het ook niet zinvol een tafel als iets reëls te beschouwen en een quark uitsluitend als een hulpgrootheid. Zoals we gezien hebben maakte Mach dit onderscheid wel; en in zijn voetspoor waren ook de meeste logisch-empiristen geneigd tot een instrumentalistische interpretatie van theorieën. Popper is daarentegen *realist*. Theorieën dienen er volgens hem toe de wereld te beschrijven zoals die is, en niet uitsluitend voor het doen van voorspellingen. Het doel van de wetenschap is *waarheid*. Het begrip "waarheid" wordt daarbij door Popper op de volgende manier gebruikt. Een theorie (of een uitspraak) is waar dan en slechts dan als de in de theorie (of uitspraak) verwoorde stand van zaken ook de *werkelijke* stand van zaken is. Dit is het waarheidsbegrip dat vastgelegd wordt door de z.g. correspondentietheorie van de waarheid: waarheid betekent correspondentie met de werkelijkheid. Daarnaast komen in de filosofische literatuur nog andere opvattingen over waarheid voor. Belangrijk zijn de "coherentietheorie van de waarheid", volgens welke waarheid bestaat in de samenhangendheid en consistentie van een systeem van uitspraken (theorie) en de "pragmatische theorie van de waarheid", volgens welke waarheid gelijk is te stellen aan nuttigheid en efficiëntie voor de praktijk van voorspellen en handelen. Het zal duidelijk zijn dat de correspondentietheorie van de waarheid past bij een realistische wetenschapsopvatting.

Een moeilijkheid bij het hanteren van de correspondentietheorie is dat we niet onafhankelijk van de theorie de werkelijke stand van zaken in de wereld kunnen bekijken om vast te stellen of de theorie waar is. Als de theorie iets over elektronen zegt kunnen we die elektronen niet beetpakken om de uitspraken te controleren. Het enige dat we kunnen doen is het verifiëren van de empirische voorspellingen van de theorie; maar dat is precies hetzelfde als wat de instrumentalist doet (die eventueel aanhanger kan zijn van de pragmatische theorie, als hij überhaupt over "waarheid" spreken wil). De

correspondentietheorie van de waarheid doet geen methode aan de hand om waarheid vast te stellen, maar legt uitsluitend de *betekenis* van het begrip "waarheid" vast. We kunnen over waarheid in de zin van de correspondentietheorie spreken zonder in staat te zijn ooit definitief de waarheid te ontdekken. Popper zegt dan ook dat "waarheid" een "regulatief ideaal" van de wetenschap is: het geeft zin aan de wetenschappelijke activiteit en motiveert de onderzoeker, hoewel we nooit zullen weten of we de ware theorie hebben bereikt. Theorieën zullen immers altijd als hypothesen behandeld moeten worden, falsificaties zijn nooit uitgesloten.

Opgaven.

1. Verificatie van theorieën, in de zin van definitieve vaststelling van hun waarheid, is volgens Popper (en Hume) onmogelijk. Maar is het niet zo dat theorieën steeds *waarschijnlijker* worden naarmate ze vaker worden bevestigd, zodat ze weliswaar nooit zeker zijn maar tenslotte toch een waarschijnlijkheid hebben die heel dicht bij 1 ligt? Wat zou zo'n waarschijnlijkheid betekenen en hoe zou die waarschijnlijkheid kwantitatief gemaakt kunnen worden?
2. In de 19^e eeuw werd ontdekt dat de planeet Mercurius niet de baan volgt die door de gravitatietheorie van Newton wordt voorspeld (de "periheliumbeweging"). Er is hier dus een conflict tussen theorie en waarneming. Is dit volgens jou reden om de mechanica van Newton te verwerpen? Men heeft dit in de 19^e eeuw niet gedaan. Is dit te beschouwen als een irrationele gang van zaken? Hoe verhoudt zich volgens jou de feitelijke gang van zaken tot Poppers wetenschapsleer?

3.6.2 Kuhn

Popper vestigde in zijn werk de aandacht op de rol die theorieën spelen bij het richting geven aan experimenten en bij het onder woorden brengen van de uitkomsten daarvan. Auteurs na hem hebben de rol van "theoretische kaders" nog sterker benadrukt. Het uitgangspunt van de logisch-empiristen, dat theorieën gebouwd zijn op de stevige grond van onafhankelijke waarnemingsfeiten, is daardoor langzamerhand in diskrediet geraakt. Een algemeen geaccepteerd alternatief is echter niet voor het logisch-empirisme in de plaats gekomen. Er zijn enkele invloedrijke auteurs, zoals Popper, Kuhn, Lakatos, wier standpunten veel gemeenschappelijks hebben maar toch ook allerlei on-

derlinge verschillen vertonen. De posities van deze, en geestverwante, wetenschapsfilosofen duidt men tezamen wel aan met de term "post-positivisme."

Kuhn onderschrijft Poppers analyse volgens welke theorieën altijd nodig zijn om de waarneming te interpreteren. Maar hij legt veel meer nadruk op de consequentie dat een strijdigheid met empirische resultaten helemaal niet hoeft te betekenen dat de theorie verworpen moet worden. In de eerste plaats kan getwijfeld gaan worden aan de waarnemingsuitspraak zelf. Popper wijst er al op dat de acceptatie van een waarnemingsuitspraak tenslotte een *beslissing* is die in de wetenschappelijke gemeenschap wordt genomen. Kuhn gaat nog een stuk verder. Als een wetenschappelijke gemeenschap heilig overtuigd is van de geldigheid van een bepaalde theorie, dan zal een daarmee conflicterende waarnemingsuitspraak zeer moeilijk worden geaccepteerd. Stel dat er een hemellichaam wordt waargenomen dat zich niet lijkt te houden aan de bekende fysische wetten. Het eerste dat men dan zal doen is twijfelen aan de juistheid van de waarnemingen. Is dat hemellichaam er echt, of gaat het om een fout in de meetapparatuur? Zijn er bijvoorbeeld omstandigheden die de betrouwbaarheid van telescopen in die omgeving twijfelachtig kunnen maken? Met zulke tegenwerpingen kan men lang doorgaan. Het hangt van *sociale processen in de betrokken gemeenschap van onderzoekers* af, zo zegt Kuhn, of en wanneer de waarneming in kwestie geaccepteerd zal worden. Als het gaat om een algemeen aanvaarde theorie die in conflict is met een niet eenvoudig te verrichten waarneming zal de acceptatiedrempel voor die waarneming heel hoog liggen.

Maar zelfs als de waarnemingsuitspraak wordt aanvaard betekent dat nog niet dat de theorie het onderspit delft. De vergelijking tussen theorie en waarneming is namelijk niet eenvoudig. De situatie kan schematisch als volgt worden weergegeven. Stel er is een theorie T . Om tot voorspellingen te leiden moet T worden gecombineerd met begincondities C . Om bijvoorbeeld de stand van de planeten te voorspellen moeten we uitgaan van een geobserveerde stand in het verleden; T geeft alleen de verbanden tussen de twee constellaties. Maar eigenlijk is de stand van de planeten in het verleden niet voldoende voor de voorspelling; we zouden alle relevante factoren moeten kennen. Zijn er geen kometen in de buurt die van invloed kunnen zijn; moet de inwendige structuur van de Zon niet in de berekening meegenomen worden; enzovoort. In de praktijk houdt men natuurlijk alleen rekening met die factoren die men kent en waarvan men weet dat ze relevant zijn; van overige factoren (zoals het inwendige van de Zon) neemt men aan dat ze geen invloed hebben. Dit impliceert dat eigenlijk in de berekening een z.g. *ceteris-paribus-clausule* P is opgenomen, die zegt dat verondersteld wordt

dat de niet-vennelde factoren niet relevant zijn. Schematisch heeft een voorspelling dus de volgende vorm: $T + C + P \rightarrow E$, met E de tenslotte empirisch te toetsen voorspelling. Stel nu dat E feitelijk niet gevonden wordt. Dan kan de fout in T , C of P liggen; dat T de schuldige is, is niet bij voorbaat duidelijk. Er kan, zoals boven al gezegd, een vergissing gemaakt zijn bij de waarnemingen die tot C leidden. Maar ook als dat niet acceptabel is blijft altijd de mogelijkheid open P als de boosdoener aan te wijzen. Er kan sprake zijn van een nog niet in rekening gebrachte verstoring. Als de wetenschappelijke gemeenschap overtuigd is van T kan T daarom altijd gehandhaafd blijven; de schuld van het conflict met de waarneming kan geschoven worden op een nog niet bekende verstoring.

In de praktijk van de natuurkunde en astronomie speelt bovengenoemde manier van redeneren inderdaad een belangrijke rol. Toen in de 19^e eeuw systematische afwijkingen in de baan van Uranus gevonden werden (ten opzichte van de door de gravitatie-theorie van Newton voorspelde baan) werd dit niet gezien als een weerlegging van Newtons theorie. Men probeerde de verstoring op te sporen die verantwoordelijk was voor deze "anomalie". De Franse wiskundige Leverrier postuleerde hiertoe in 1846 het bestaan van een nog niet ontdekte planeet. Deze planeet werd ook werkelijk waargenomen en kreeg de naam Neptunus. De ontdekking van Neptunus was zo een triomf voor Newtons theorie, in plaats van een dreigende ondergang. Op dezelfde manier werd ook gezocht naar de oorzaken voor afwijkend gedrag van andere hemellichamen; deze werden niet altijd gevonden. Dit betekende echter nog steeds geen weerlegging van Newton; de anomalieën bleven rustig op hun beurt wachten om opgelost te worden. Dat dit tenslotte met behulp van de wetten van Newton zou lukken, daarvan was de overgrote meerderheid van fysici en astronomen vast overtuigd.

Uit het voorgaande wordt duidelijk dat de *logica* veel ruimte laat voor het handhaven van theorieën. Kuhn meent nu dat de in de praktijk voorkomende overgangen van de ene theorie naar een andere, die dus niet door logica worden afgedwongen, bestudeerd moeten worden als *sociale processen*. De wetenschappelijke gemeenschap moet op dezelfde wijze beschouwd worden als een uitheemse volksstam. De onderzoekersstam heeft zijn eigen rites en gewoonten, en er zijn sociologische regelmatigigheden aan te geven in de veranderingen van de denkbeelden binnen de onderzoekersstam.

Alle wetenschap begint volgens Kuhn met een fase waarin allerlei standpunten naast elkaar worden verkondigd (door verschillende personen). Omdat iedereen de wereld vanuit zijn eigen perspectief ziet en waarnemingen binnen dat perspectief interpreteert, blijven de standpunten ook naast elkaar

staan. Kuhn noemt dit de "pre-paradigmatische fase". Volgens hem is een aantal wetenschapsgebieden, waar sprake is van veel autonoom naast elkaar staande "scholen", nog altijd in die fase.

Op een gegeven moment zal één van de bovengenoemde standpunten erin slagen een bijzonder fraai samenhangend beeld van de verschijnselen op te bouwen; of er wordt op een andere manier een indrukwekkend succes geboekt. Dan kan het gebeuren, zegt Kuhn, dat die ene opvatting veel aanhangers zal verwerven; en hoe meer aanhangers er zijn, hoe meer er nog zullen bijkomen. Dit betekent helemaal niet dat de andere standpunten weerlegd zijn. Maar als uitkomt van een sociaal proces zal tenslotte één visie door vrijwel iedereen geaccepteerd worden. De aanhangers van die visie maken propaganda, leiden volgelingen op, enzovoort; de aanhangers van de concurrerende richtingen sterven langzamerhand uit (ook letterlijk). We komen dan terecht in wat Kuhn noemt de "paradigmatische fase".

In deze fase is er een allesoverheersende theorie waarbinnen alles geïnterpreteerd wordt - Kuhn noemt dit het "paradigma". De wetenschap die in de paradigmatische fase bedreven wordt is de gewone wetenschap die het leeuwendeel uitmaakt van het werk op universiteiten en in laboratoria - Kuhn spreekt van "normal science". Het gaat er daarbij niet om het paradigma omver te werpen; het paradigma geeft juist richting aan al het onderzoek. Doel van het onderzoek is op het eerste gezicht weerbaarstig waarnemingsmateriaal in het paradigma onder te brengen, op de manier zoals de baan van Uranus toch "normaal" bleek. Deze activiteit kan vergeleken worden met het oplossen van puzzles (Kuhn: "puzzle-solving activity"). Het is niet het paradigma dat op de proef wordt gesteld, maar het "puzzle-oplossend vermogen" van de onderzoeker. Een weerspannige anomalie zal eerder als een teken van tekort schieten van de onderzoeker (promovendus) worden gezien dan als een mogelijk feilen van de theorie.

Desondanks zal zich langzamerhand een verzameling onopgeloste anomalieën vormen. Als de verzameling heel groot wordt, en voor iedereen zichtbaar, kan zich allengs een gevoel van onbehagen meester maken van de gemeenschap. Wanneer nu een alternatieve theorie voorgesteld wordt, die voor een aanzienlijk deel van de anomalieën een oplossing biedt, kan het gebeuren dat zich een *wetenschappelijke revolutie* voltrekt. De oude theorie is niet weerlegd - misschien dat nog enige jaren volhouden had geleid tot oplossing van de anomalieën. Maar in een onontkoombaar sociaal proces vinden *bekeringen* plaats van het oude paradigma naar de nieuwe theorie, het paradigma in statu nascendi. Belangrijk hierbij is dat deze bekering door Kuhn niet gezien wordt als een rationeel proces, waarbij argumenten de doorslag

geven. Het is een plotselinge omslag in zienswijze, zoals ook voorkomt bij de afbeeldingen die op verschillende manieren (maar nooit twee manieren tegelijk!) kunnen worden gezien. In de psychologie staan dergelijke omslagen bekend als "gestalt-switches". De werkelijkheid wordt plotseling vanuit een geheel ander perspectief bekeken.

Hoewel het oude paradigma niet wordt weerlegd sterft het een natuurlijke dood. Net als bij de overgang van de pre-paradigmatische naar de paradigmatische fase krijgen nieuwlichters overal de overhand, bezetten leerstoelen, leiden leerlingen op en geven zichzelf subsidie. De aanhangers van de oude theorie sterven uit. Uiteraard begint vervolgens de cyclus opnieuw: het zal niet lang duren voordat de eerste onopgeloste anomalieën van het nieuwe paradigma in stoffige archieven worden weggewerkt.

De ontwikkeling van de natuurwetenschap wordt zo door Kuhn gekenschetst (in zijn boek "The structure of scientific revolutions", 1962) als een opeenvolging van relatief lange perioden van "normal science", beheerst door een paradigma, die afgewisseld worden door korte perioden van revolutie, waarbinnen het ene paradigma vervangen wordt door het andere.

Kuhns paradigma's doen enigszins denken aan Kants a priori vastgelegde schema's, die ook ten doel hadden een kader te vormen voor alle waarnemingen. Het verschil is dat Kants schema's verankerd waren in het "menselijk kenvermogen" en daarmee, volgens Kant, voor eens en altijd vastlagen. Bij Kuhn is het paradigma een in sociale wisselwerking tot stand gekomen denkkader, dat ook de functie heeft de *groep* van onderzoekers een eigen identiteit te geven. Een enkel individu kan er afwijkende ideeën op na houden, maar dat is voor de *wetenschap* (ook weer gezien als een sociaal fenomeen) niet direct relevant. De paradigma's liggen verder niet voor altijd vast, maar kunnen door sociale processen veranderen.

Opgave. "Promovendus X doet bij prof. Z onderzoek naar effecten van quantuminterferentie. In verstrooiingsproeven met elektronen vindt hij inderdaad het op grond van de quantummechanica verwachte effect. Het enthousiasme is groot en er wordt een artikel geschreven in een gezaghebbend tijdschrift. Promovendus Y is minder gelukkig; in zijn experiment is het te verwachten effect nog niet aangetoond. Prof. Z begint langzamerhand wat ongeduldig te worden: als binnen een paar maanden nog geen resultaten zijn bereikt is het misschien verstandiger voor Y naar een ander onderwerp uit te kijken."

Bespreek bovenstaand fictief verslag uit het laboratorium vanuit Poppers en vanuit Kuhns gezichtspunt. Zou het volgens jou kunnen gaan om gebeurte-

nissen die zich werkelijk hebben afgespeeld?

3.6.3 Lakatos

Het is kenmerkend voor Kuhns visie op de wetenschap dat het accent ligt op sociale factoren. In de meer traditionele benaderingen werd de ontwikkeling van de wetenschap, en meer in het bijzonder de ontwikkeling van de natuurkunde, altijd gezien als het schoolvoorbeeld van een door rationaliteit beheerst proces, d.w.z. een proces waarvan het verloop bepaald wordt door *methodologische regels*, die zelf logisch zijn te verantwoorden. De logisch-empiristen stelden daartoe een inductieve methodologie voor; Popper kwam met zijn op falsificatie gerichte regels. Kuhn constateert echter dat de logica geen uitkomst kan bieden als er beslist moet worden tussen theorieën. Dat betekent volgens hem dat alleen sociale invloeden de doorslag kunnen geven. Tegen deze gevolgtrekking verzet Lakatos zich. Weliswaar geeft de zuivere logica niet voldoende houvast om de wetenschap vooruit te helpen, maar dat wil volgens Lakatos niet zeggen dat het verloop van de wetenschappelijke ontwikkeling niet bepaald wordt door rationele factoren. Er mogen dan geen argumenten zijn die werkelijk strikt logisch bewijzen dat de ene theorie vervangen moet worden door de andere, maar dat betekent nog niet dat het onmogelijk is om de wetenschap als een *rationele* onderneming te karakteriseren. In zijn "methodology of scientific research programmes" (1970) geeft Lakatos een overzicht van de rationele factoren die volgens hem de facto de ontwikkeling van de natuurwetenschap bepalen. Hij stelt dat zijn daarop gebaseerde "methodologie" te verkiezen is boven het inductivisme of het falsificationisme omdat deze het best aansluit bij de feitelijke praktijk van de natuurwetenschap.

Lakatos brengt een aantal wijzigingen aan in het door Kuhn geschetste beeld. In de eerste plaats vertekent Kuhn volgens Lakatos de feitelijke geschiedenis wanneer hij stelt dat er steeds slechts een paradigma de dienst uitmaakt. Lakatos meent dat er altijd *elkaar beconcurrerende "researchprogramma's"* zijn aan te wijzen, die strijden om de gunst van de onderzoeker. Een researchprogramma bevat een "harde kern" die de identiteit van het programma bepaalt. Deze kan niet veranderd worden zonder het researchprogramma zelf te veranderen. Daarnaast zijn er meer "perifere" speciale hypothesen, wetten, e.d. die wel aangepast kunnen worden. De harde kern en zulke toevoegingen vormen samen een specifieke theorie binnen een researchprogramma. In de ontwikkeling van een programma kunnen dus elkaar opvolgende theorieën onderscheiden worden.

Een voorbeeld is het researchprogramma verbonden met de klassieke mechanica van Newton. De traagheidswet en de wet $F = ma$ behoren tot de harde kern; als die gewijzigd worden gaan we tot een nieuw soort mechanica over. Maar specifieke krachtwetten, zoals de gravitatiewet, de wet van Coulomb, e.d., kunnen worden toegevoegd of gewijzigd zonder de kern van de klassieke mechanica te raken. Er ontstaan dan allerlei specifieke theorieën (voor beweging in zwaartekrachtsvelden, in statische elektrische velden, enz.) die onder het overkoepelende klassiek mechanische researchprogramma vallen.

Bij de overgang van het ene researchprogramma naar het andere is volgens Lakatos sprake van een rationaal proces. Stel dat twee programma's met elkaar strijden. De kwaliteiten ervan kunnen dan op de volgende punten worden vergeleken.

1. Zijn de programma's *theoretisch progressief*. Lakatos noemt een programma "theoretisch progressief" als er een dynamiek in het programma zit, zodanig dat van tijd tot tijd nieuwe theorieën geformuleerd worden (bij dezelfde harde kern) die *meer* voorspellen dan hun voorgangers. Volgens Lakatos is de normale situatie in de wetenschap namelijk niet dat starre "paradigma's" alle activiteiten precies regelen; de harde kern van een programma laat aanzienlijke speelruimte. Een goed programma zal een rij van theorieën T_1, T_2, \dots, T_n kennen, die elkaar steeds theoretisch verbeteren (in de zin dat ze meer voorspellingen kunnen leveren). Wetenschapsmensen zullen een theorie T_{k+1} voorstellen ook al was T_k niet gefalsificeerd: wetenschappelijke vooruitgang wordt volgens Lakatos niet beheerst door falsificaties en pogingen daartoe.
2. Zijn de programma's *empirisch progressief*? Het op elkaar laten volgen van theorieën met telkens meer voorspellingen is mooi, maar het is natuurlijk wel belangrijk of die voorspellingen ook uitkomen. Lakatos noemt een programma "empirisch progressief" als het steeds nieuwe voorspellingen levert, op steeds nieuwe gebieden, waarvan althans een gedeelte ook uitkomt.

Programma's die zowel in empirisch als in theoretisch opzicht progressief zijn worden "progressief" zonder meer genoemd. Belangrijk is nu, zegt Lakatos, dat ieder programma, ieder theoretisch idee, zijn empirische anomalieën heeft. Geen enkele theorie is ooit voor 100% in overeenstemming met de waarneming. Zoals we al hebben gezien hoeft dat echter niet ernstig

te zijn. Het is altijd mogelijk de fout te zoeken in hulphypothesen of in de hulptheorieën die gebruikt zijn bij het interpreteren van de waarnemingen. Definitieve falsificatie is eigenlijk nooit mogelijk. Maar we kunnen wel onderscheid maken tussen programma's die niets anders doen dan met allerlei kunstgrepen potentiële falsificaties onschadelijk maken en programma's die op eigen kracht met nieuwe voorspellingen komen, die dan nog worden bevestigd ook. Programma's van de eerste soort, die voortdurend achter de feiten aanhollen en met ad-hoc procedures het schip drijvende houden noemt Lakatos "degenererend". De kern van zijn methodologie is nu: *van twee programma's, waarvan het ene progressief is en het andere degenererend, wordt het degenererende vervangen door het progressieve.*

Als we Lakatos' opvattingen vergelijken met die van Popper, zien we dat "verificaties", bevestigingen, weer in ere worden hersteld. Het is rationeel voor de wetenschapsbeoefenaar om naar bevestigingen van zijn theorie te zoeken, omdat die iets zeggen over de progressiviteit van het programma. Falsificaties zijn daarentegen nooit doorslaggevend.

Een moeilijke vraag is welke status Lakatos' methodologie precies bezit. Lakatos stelt dat de feitelijke geschiedenis van bijvoorbeeld de natuurkunde, met de beslissingen t.a.v. verwerping en aanvaarding van theorieën die daar de facto tot stand zijn gekomen, het best past bij zijn methodologie. Dat wil zeggen dat als theorie B theorie A vervangen heeft (bijvoorbeeld B = relativiteitstheorie; A = klassieke mechanica), wij nu achteraf kunnen zeggen dat B deel uitmaakte van een progressief programma en A van een degenererend programma. Deze overeenkomst is, aldus Lakatos, de voornaamste reden om zijn methodologie te verkiezen boven bijvoorbeeld inductivisme en falsificationisme. Er doen zich hier echter een aantal problemen voor. In de eerste plaats wil het feit dat wij achteraf A en B in respectievelijk degenererende en progressieve programma's kunnen onderbrengen niet zeggen dat de betrokken wetenschapsmensen zélf, die tussen A en B moesten kiezen, van zulke criteria bij hun keuze gebruik maakten. Maar zelfs als dat wel het geval zou zijn, is Lakatos' "methodologie" meer dan een sociologische generalisatie omtrent het gedrag van wetenschapsmensen? We hebben immers gezien dat, ook volgens Lakatos, zuiver logische normen tekort schieten om methodologische regels voor empirische wetenschap te formuleren. Lakatos stelt daar nu "regels" voor in de plaats die ontleend zijn aan de feitelijke, historische, praktijk. Maar kan van zulke "regels" gezegd worden dat ze normen geven in de gebruikelijke zin, waaraan de praktische wetenschapsbeoefenaar zich dient te houden? Lakatos zelf meent dat dit maar in zeer beperkte mate het geval is. Hij ziet zijn "methodologie" vooral als een instrument om *achteraf*

de "rationaliteit" van wetenschappelijke ontwikkelingen te beoordelen. We krijgen zo het merkwaardige beeld dat wetenschappelijke ontwikkelingen achteraf gezien rationeel of irrationeel kunnen worden genoemd, onafhankelijk van de argumenten die de betrokken wetenschapsmensen zelf tijdens die ontwikkelingen hebben gehanteerd. Er is dan ook wel gezegd (door *Feyerabend*, een wetenschapsfilosoof die het bestaan van altijd geldige methodologieën ontkent) dat Lakatos' zienswijze een "anarchisme in vermomming" inhoudt. Voor de wetenschappelijke praktijk worden immers geen normen gesteld. Als "methodologie" niet anders betekent dan een weergave van de historisch, tot nu toe, "normale" gang van zaken is er niet veel verschil met een sociologisch getinte analyse zoals Kuhn die geeft.

Opgave. Beschouw de fysici A en B, die de toestandsvergelijking van een gas bij zeer lage temperaturen experimenteel willen bepalen. A en B hebben verschillende visies op dit werk. Als A met een zeer geavanceerde manometer aan de slag gaat, trekt B de zinvolheid hiervan in twijfel. Is het niet zo dat dit instrument buitengewoon gevoelig is, zodat de aanwijzing uiterst onbetrouwbaar is? Met andere woorden, is niet altijd vol te houden dat de druk heel anders is dan de manometer aangeeft; er is immers altijd wel een invloed te bedenken die verantwoordelijk kan zijn voor de foutieve aanwijzing? B meent bovendien dat het hele project nog nadere overweging verdient. Is niet staande te houden dat *ieder* gas idealiter gehoorzaamt aan de vergelijking $PV = nRT$? Dit geeft een bijzonder eenvoudige en elegante natuurbeschrijving. In de praktijk worden natuurlijk altijd afwijkingen gevonden van het ideale geval. Deze zijn echter te wijten aan versturende invloeden, en niet werkelijk interessant.

Meen je dat één van beiden irrationeel is? Zo ja, hoe zou je hem van zijn ongelijk willen overtuigen?

Zijn er volgens jou vaste "rationaliteitsregels" waaraan de natuurkundige zich in de praktijk te houden heeft?

Hoofdstuk 4

Realisme, instrumentalisme en quantummechanica

In de voorgaande drie hoofdstukken zijn enkele centrale vragen uit de wetenschapsfilosofie, vooral vanuit historisch perspectief, behandeld. Een cruciale kwestie was of natuurkundige theorieën de werkelijkheid beschrijven, ook los van de waarneming, of dat ze uitsluitend moeten worden opgevat als hulpmiddelen bij het ordenen en voorspellen van waarnemingen (het realisme-instrumentalisme-debat). In dit hoofdstuk komt kort aan de orde hoe deze vraag een rol speelt in de moderne natuurkunde. Het blijkt dat bovenop de traditionele filosofische argumenten nieuwe aspecten belangrijk zijn, die te maken hebben met de bijzondere structuur van de quantummechanica.

4.1 Het formalisme van de quantummechanica

De quantummechanica wordt, zoals alle theorieën uit de theoretische fysica, gekarakteriseerd door een welomschreven wiskundige structuur. Deze structuur is vastgelegd door de soorten van wiskundige grootheden die voorkomen en de relaties die tussen die grootheden bestaan. Zoals we in het vorige hoofdstuk hebben gezien moet een aantal grootheden een empirische interpretatie hebben; anders zouden we niet te maken hebben met een *fysische* theorie. Het moet duidelijk zijn hoe de theorie, althans in principe, aan het experiment is te toetsen.

De voor theorieën uit de klassieke fysica typerende wiskundige structuur is die van de *faseruimte*. Een faseruimte is een verzameling punten die elk met een mogelijke toestand van een fysisch systeem corresponderen. Een

eenvoudig voorbeeld is de faseruimte die de toestanden kan weergeven van een deeltje dat zich langs een rechte lijn beweegt. De toestand van zo'n deeltje op één moment wordt gegeven door zijn positie en snelheid. Als deze twee grootheden worden opgevat als de coördinaten van een punt in een plat vlak, wordt duidelijk dat alle mogelijke toestanden van het fysisch systeem kunnen worden gerepresenteerd door punten in het vlak; dit vlak is hier de twee-dimensionale faseruimte. Ingewikkelder fysische systemen, die meer dan twee fysische grootheden voor hun beschrijving vereisen, moeten worden voorgesteld door punten in een hoger-dimensionale wiskundige ruimte. De coördinaten van de punten in de faseruimte corresponderen met fysische grootheden van het gerepresenteerde systeem. Hieruit blijkt dat de aard van de samenhang tussen de theoretische representatie en het beschreven natuurkundige systeem eenvoudig is in de klassieke fysica. De eigenschappen van het systeem bepalen zijn plaats in de faseruimte; omgekeerd zijn aan de coördinaten van een fasepunt direct de eigenschappen van het fysische systeem af te lezen. Er is met andere woorden sprake van een één-één afbeelding tussen systemen met hun fysische eigenschappen en de wiskundige representatie door middel van fasepunten.

Om een volgens bovenstaande lijnen opgebouwde theorie tot een respectabele fysische theorie te maken is het in ieder geval nodig om aan te geven hoe *meetbare* grootheden wiskundig worden gerepresenteerd. Volgens de instrumentalistische opvatting is dit het enige dat telt. Voor de realist is het echter bovendien nodig dat niet-waarneembare grootheden (zoals de positie en snelheid van microscopische deeltjes) worden gerepresenteerd. Hoewel over deze twee standpunten filosofische discussie mogelijk blijft, is het zo dat de structuur van theorieën uit de klassieke natuurkunde in ieder geval niet in strijd is met een realistische opvatting. Functies die gedefinieerd zijn op een faseruimte kunnen altijd worden geïnterpreteerd als fysische grootheden, ook als ze niet waarneembaar zijn. Zo kunnen de coördinaten van de fasepunten uit de statistische mechanica worden gezien als posities en impulsen van atomen en moleculen, hoewel de instrumentalist alleen druk, volume, enz., fysisch zal willen interpreteren.

De bij de quantummechanica behorende wiskundige structuur is ingewikkelder dan die van de zojuist besproken faseruimte. Toestanden worden nu voorgesteld door *vectoren* in een bepaald type vectorruimte (een *Hilbert-ruimte*). Deze vectoren worden niet op dezelfde wijze als in de klassieke natuurkunde vastgelegd door meetbare eigenschappen van een individueel fysisch systeem. In het algemeen correspondeert namelijk een quantummechanische toestand niet met unieke uitkomsten voor metingen die aan het

systeem kunnen worden verricht.

Stel we hebben te maken met een systeem dat volgens de quantummechanica wordt voorgesteld door een willekeurig gekozen vector in de Hilbert-ruimte, en we voeren een positiemeting uit. De theorie zegt dan dat met deze toestandbeschrijving een *kansverdeling* verbonden is over *mogelijke* uitkomsten van de meting. De quantummechanica laat met andere woorden een scala van uitkomsten open en voorspelt alleen *kansen* voor het gerealiseerd worden van de verschillende mogelijkheden. Wanneer het experiment zeer vaak wordt herhaald, met een systeem dat steeds door dezelfde quantummechanische toestand wordt gerepresenteerd, worden de kansen benaderd door de relatieve frequenties waarmee de verschillende mogelijke uitkomsten zich voordoen. Op deze wijze zijn de kansuitspraken die de quantummechanica doet empirisch te toetsen. Maar in het individuele geval is er niet één enkele waarde van de positie die door de theorie met het fysische systeem wordt verbonden. Hetzelfde geldt voor andere grootheden. De quantummechanica kent bijvoorbeeld in het algemeen niet één waarde voor de impuls aan het systeem toe, maar geeft weer alleen de kansen dat verschillende mogelijke waarden van de impuls bij een meting worden gevonden.

Het zojuist gezegde geldt voor een willekeurig gekozen quantummechanische toestand. Het is echter mogelijk om bij iedere waarde van een meetbare grootheid een speciale toestand te vinden die slechts die gegeven waarde voor de uitkomst bij meting van de grootheid toelaat (nl. de eigentoestand behorende bij die waarde van de grootheid). Die uitkomst krijgt dan de kans 1; andere meetuitkomsten krijgen de kans 0. Zo bestaan er toestanden die met precies één waarde van de positie corresponderen. Maar in die toestanden is de impuls niet eenduidig bepaald. Vice versa bestaan er toestanden met een welbepaalde waarde voor de impuls; maar in die toestanden is er weer geen vaste waarde voor de positie. Uit het wiskundig formalisme van de quantummechanica kan worden afgeleid dat er geen toestanden bestaan die tegelijkertijd aan *alle* meetbare grootheden precieze waarden geven. Dit is het zogenaamde onzekerheidsprincipe: als wordt getracht een quantummechanische toestand te realiseren waarin één fysische grootheid een vaste waarde krijgt, moet dat altijd worden betaald met een onzekerheid in de verwachting van de uitkomsten bij meting van andere grootheden.

Er is nog een andere eigenaardigheid van het formalisme die hier moet worden vermeld. De quantummechanica is, zoals ook de klassieke mechanica, in staat samengestelde systemen te behandelen. Dit zijn systemen die opgebouwd zijn uit deelsystemen; denk aan het eenvoudige klassieke geval van twee deeltjes, die tezamen als één systeem kunnen worden gezien maar

ook apart kunnen worden beschreven. In de klassieke mechanica zijn de eigenschappen van een samengesteld systeem altijd te beschouwen als opgebouwd uit de eigenschappen van de deelsystemen. De totale massa van een systeem is bijvoorbeeld de som van de massa's van de afzonderlijke systemen. In de quantummechanica doet zich nu de merkwaardige situatie voor dat er toestanden zijn waarin een samengesteld systeem een welbepaalde waarde van een fysische grootheid heeft, hoewel geen precieze waarden worden toegekend aan de corresponderende fysische grootheden van de deelsystemen. Zo kan de positie van het zwaartepunt van een tweedeeltjessysteem een vaste waarde hebben, terwijl de afzonderlijke deeltjes *geen* unieke waarde voor de positie door de quantummechanica krijgen toebedeeld. In dit soort gevallen voorspelt de quantummechanica een spectrum van mogelijke uitkomsten voor metingen aan de deelsystemen, maar een constante relatie tussen de uitkomsten aan de afzonderlijke systemen. Een voorbeeld is het geval van een tweedeeltjessysteem waarin de afzonderlijke deeltjes een gelijke massa hebben. Als de positie van het zwaartepunt de unieke waarde 0 heeft (de oorsprong op een coördinatenas), dan zullen de uitkomsten x_1 en x_2 van positiemetingen aan respectievelijk deeltje één en deeltje twee niet uniek bepaald hoeven te zijn, maar wel zal steeds moeten gelden $x_1 + x_2 = 0$. Er bestaat dan dus een strikte *correlatie* tussen de bij meting gevonden posities van de deeltjes.

4.2 De interpretatie van het formalisme

De quantummechanica kan vanuit zuiver wiskundig oogpunt worden bekeken; we hebben dan te maken met de Hilbert-ruimtestructuur. De presentatie van het formalisme in de vorige paragraaf bevatte echter al meer. We namen daar aan dat bepaalde wiskundige uitdrukkingen een empirische interpretatie hebben, nl. die van kansen op uitkomsten van metingen. Door de op deze wijze gelegde relatie tussen wiskundig formalisme en waarneming is de theorie empirisch toetsbaar. Voor de dagelijkse praktijk van de fysicus is deze empirische interpretatie voldoende; voor het doen van voorspellingen omtrent het gedrag van meetopstellingen is niets méér nodig.

De vraag waarmee we ons willen bezighouden is echter of het formalisme bovendien kan worden opgevat als een *beschrijving* van fysische systemen die ook onafhankelijk van de waarneming bestaan (de wens van de realist). De reden dat deze vraag in de quantummechanica, anders dan in de klassieke mechanica, urgent is hangt samen met het probabilistische karakter van de

theorie. Zoals we zagen is het formalisme van de quantummechanica met de waarneming verbonden via kansuitspraken. In de klassieke fysica komen zulke uitspraken natuurlijk ook voor. Ze zijn daar echter altijd van toepassing op situaties die *niet volledig* worden beschreven. Als bijvoorbeeld van een dobbelsteen wordt gezegd dat hij een kans van $1/6$ heeft om bij een worp het resultaat "6" te geven, wordt afgezien van de precieze details die de beweging van de dobbelsteen in een individuele worp bepalen. Zouden deze details wel in rekening worden gebracht, dan zou volgens de klassieke mechanica precies vastliggen hoe de dobbelsteen terecht kwam. Het werken met kansen is daarom in de klassieke mechanica een gevolg van onze beslissing om een proces niet op het fundamenteelste niveau te beschrijven, of van onze onmacht om dat te doen, maar hangt niet samen met een onbepaaldheid in de beschreven objecten zelf.

In de quantummechanica ligt de situatie anders. In het formalisme is geen fundamenteel niveau voorhanden dan dat van de kansuitspraken. Als van een radioactief atoom wordt voorspeld dat het een kans van bijvoorbeeld $1/2$ heeft in het komende half uur te vervallen, betekent dat niet alleen dat van een grote verzameling van zulke atomen in een half uur ongeveer de helft vervallen is. Ook wanneer we naar de *individuele* kenmerken van een *enkel* atoom kijken komt de quantummechanica niet verder dan het aangeven van kansen. Het problematische hiervan blijkt misschien het duidelijkst als we het voorbeeld van een positiemeting beschouwen.

Zolang geen meting wordt verricht beschrijft de quantummechanica een deeltje, b.v. een elektron, door middel van een kansverdeling die zich in de tijd ontwikkelt. Correkter is het eigenlijk te zeggen dat de toestand in de Hilbert-ruimte, Ψ , zich ontwikkelt via een deterministische vergelijking (de Schrödinger-vergelijking). Deze toestand Ψ levert een kansverdeling $|\Psi(x)|^2$ voor de positie, en andere kansverdelingen voor andere fysische grootheden. Zodra nu de positie van het elektron daadwerkelijk wordt gemeten, wordt één enkele waarde van de positie gerealiseerd; vlak vóór de meting waren alle uitkomsten met een kans groter dan nul nog mogelijk.

Twee vragen dringen zich nu op. *Bezit* het elektron vóór de meting wel een positie? In een *volledige* klassieke beschrijving bezit een individueel systeem altijd een welbepaalde positie, kansen komen slechts voor in een onvolledige beschrijving. De quantummechanica kent evenwel geen vollediger beschrijving dan die met kansen. Als nu geen dieper gaande theorie dan de quantummechanica mogelijk is wordt het dubieus of een fysisch systeem wel een positie *heeft*; verschillende mogelijke waarden van de positie schijnen tegelijk aanwezig te zijn. Als het bestaan van een welbepaalde positiewaarde

echter niet wordt aangenomen, krijgen we te maken met een tweede vraag. Na de meting is duidelijk wel een unieke waarde voor de positie aanwezig; blijkbaar is het feitelijk verrichten van de meting hiervoor beslissend. Hoe heeft de meting het systeem dan beïnvloed? Hebben metingen een speciale status, die ze onderscheidt van gewone fysische wisselwerkingen, zodat ze in staat zijn eigenschappen van fysische systemen te creëren? En in het verlengde hiervan: wat is eigenlijk een "meting"; speelt wellicht de menselijke waarnemer zelf op de een of ander wijze een essentiële rol bij het tot stand brengen van een uniek meetresultaat? We zien hier naar voren komen dat de eigenschappen van de quantummechanica zelf in de richting van een instrumentalistische interpretatie (waarin het begrip "meting" fundamenteel is) schijnen te wijzen.

De genoemde problemen doen zich voor als de quantummechanica wordt opgevat als een volledige fundamentele theorie die men realistisch wil interpreteren. De moeilijkheden worden omzeild als men zich op het standpunt stelt dat de quantummechanica een onvolledige theorie is, op dezelfde wijze als statistische theorieën in de klassieke fysica onvolledig zijn. Dan verschillen de kansuitspraken niet fundamenteel van die in de klassieke natuurkunde. De quantummechanica gaat in deze opvatting niet over gedetailleerd beschreven individuele systemen, maar over *verzamelingen* van systemen die worden beschreven op het statistische niveau van gemiddeldes, frequenties van voorkomen van eigenschappen, enzovoort. Aan metingen behoeft in dit geval geen bijzondere status te worden gegeven: een meting onthult slechts eigenschappen van individuele systemen die voorafgaand aan de meting wel aanwezig maar nog niet bekend waren.

4.3 De onvolledigheidsinterpretatie

Sinds het midden van de twintiger jaren, toen het wiskundig formalisme van de quantummechanica werd opgesteld, is er door verscheidene fysici in de richting van een interpretatie als louter statistische theorie gedacht. In het bijzonder Einstein, Schrödinger en De Broglie, die elk zelf belangrijk hebben bijgedragen aan het tot stand komen van de quantummechanica, hebben gepleit voor het zoeken naar een vollediger theorie. Einstein voerde hierover in de twintiger en dertiger jaren een bekend geworden polemie met Niels Bohr. In 1935 publiceerde hij met zijn medewerkers Podolsky en Rosen een artikel waarin hij probeerde aan te tonen dat de quantummechanica zelf laat zien dat ze niet volledig is (Einstein, Podolsky, Rosen, 1935). Het

in dit artikel besproken gedachtenexperiment staat bekend als het EPR-experiment.

In het EPR-experiment wordt gebruik gemaakt van de al gesignaleerde omstandigheid dat de quantummechanica soms eigenschappen toekent aan een samengesteld systeem zonder bijbehorende eigenschappen toe te kennen aan de deelsystemen. In een systeem van twee deeltjes is het zo mogelijk dat de som van de deeltjesposities én het verschil van de deeltjesimpulsen welbepaalde waarden bezitten (de operatoren $Q_1 + Q_2$ en $P_1 - P_2$ commuteren), hoewel de deeltjes afzonderlijk geen welbepaalde waarden voor hun positie en impuls hebben. Beschouw nu het geval dat de twee deeltjes in zo'n toestand ver van elkaar zijn verwijderd. Een meting van de plaats van het eerste deeltje geeft informatie over de plaats van het tweede deeltje, vanwege de al eerder genoemde correlatie die in zo'n geval moet bestaan tussen de meetresultaten aan de individuele systemen. De meting kan, zo redeneert Einstein nu, alleen op het eerste deeltje invloed hebben en daar eventueel een eigenschap creëren. Het tweede deeltje is te ver weg, zodat de meting daar niets te weeg kan brengen. Hieruit volgt dat de welbepaalde waarde van de plaats, die na de meting bij deeltje twee aanwezig is, ook al vóór de meting aanwezig moest zijn. Hetzelfde geldt, zo gaat Einstein verder, voor de impuls. Na afloop van een impulsmeting aan deeltje één kennen we de impuls van deeltje twee. Omdat het laatste deeltje helemaal niet verstoord is door de meting moest die impuls ook al voor de meting in deeltje twee aanwezig zijn. Aangezien het voor het tweede deeltje helemaal niets kan uitmaken of er al dan niet aan deeltje één wordt gemeten, en *als* er gemeten wordt, welke grootte er wordt gemeten, leidt de redenering tenslotte tot de conclusie dat deeltje twee zowel een precieze plaats als impuls bezit. Er bestaan echter geen quantummechanische toestanden die een kans 1 zowel aan een waarde van de positie als aan een waarde van de impuls toekennen (dit volgt uit het onzekerheidsprincipe). Einsteins conclusie is dan ook dat de quantummechanica blijkbaar niet in staat is het individuele deeltje in al zijn feitelijk aanwezige eigenschappen te representeren.

In 1952 werd door D. Bohm daadwerkelijk een kandidaat voor een vollediger theorie dan de quantummechanica voorgesteld (Bohm, 1952). Deze theorie kan worden gezien als een uitwerking van eerdere ideeën van L. de Broglie — Bohm kwam echter onafhankelijk tot zijn voorstel. In Bohms "verborgen-variabelentheorie" bezitten alle deeltjes welbepaalde waarden voor hun positie en impuls — de quantummechanica "kent" deze waarden niet, vandaar de aanduiding "verborgen variabelen". Er wordt een zodanige statistische

verdeling over de variabelen bij een herhaling van experimenten aangenomen dat de quantummechanische voorspellingen over gemiddelde waarden, relatieve frequenties in lange rijen van waarnemingen, e.d., worden gereproduceerd.

De theorie van Bohm heeft, om overeenstemming met de quantummechanica te bereiken, bovendien een bijzondere veronderstelling omtrent de wisselwerking tussen de deeltjes nodig. De wisselwerking moet *niet-lokaal* zijn. Dat wil zeggen dat een verandering in de plaats of snelheid van één deeltje zich ogenblikkelijk laat voelen ter plekke van alle andere deeltjes; de wisselwerking plant zich oneindig snel voort. Bovendien neemt de sterkte van de onderlinge interactie niet af bij groeiende afstand tussen de deeltjes.

Dit zijn eigenschappen van de theorie die door de meeste fysici als ongewenst worden beschouwd. Volgens de relativiteitstheorie planten alle wisselwerkingen, voorzover ze in staat zijn een signaal over te brengen, zich voort met een snelheid die ten hoogste gelijk is aan de lichtsnelheid. De interacties die in Bohms theorie een rol spelen kunnen niet zondermeer voor het versturen van signalen worden gebruikt, zodat het niet helemaal duidelijk is of er een inconsistentie bestaat met de relativiteitstheorie; toch is de theorie in ieder geval naar de geest in strijd met de relativistische principes. Er is dan ook geprobeerd om alternatieve theorieën te ontwikkelen, die wel de quantummechanische voorspellingen op statistisch niveau reproduceren, maar geen niet-lokale wisselwerkingen bevatten.

J. Bell toonde in 1964 echter aan dat dit onmogelijk is (Bell, 1964). De voorspellingen van iedere *lokale* verborgen-variabelentheorie voldoen in een bepaalde situatie van het EPR-type aan een ongelijkheid, de zogenaamde Bell-ongelijkheid, die door de quantummechanische voorspellingen wordt geschonden. Dat betekent dat de voorspellingen van zo'n lokale verborgen-variabelentheorie nooit gelijk kunnen zijn aan die van de quantummechanica; de theorieën kunnen niet empirisch equivalent zijn. Naar aanleiding van dit resultaat is uitvoerig experimenteel onderzoek gedaan naar de *juistheid* van de voorspellingen van de quantummechanica in de situatie in kwestie. De quantummechanica heeft daarbij de toets der kritiek kunnen doorstaan. Lokale verborgen-variabelentheorieën blijken niet in overeenstemming te zijn met de experimentele gegevens.

4.4 Het realisme van de onvolledigheidsinterpretatie

Niet-lokale verborgen-variabelentheorieën, zoals die van Bohm, kunnen wel met de quantummechanische voorspellingen in overeenstemming worden gebracht. Zulke theorieën bieden een realistische interpretatie van de quantummechanica. Er wordt een beeld ontworpen van de fysische werkelijkheid waarin de wereld bestaat uit systemen (deeltjes, velden) die worden gekarakteriseerd door een verzameling goed gedefinieerde eigenschappen. Een meting is binnen dit beeld niets anders dan een procedure om kennis te vergaren over standen van zaken die al bestonden voor, en onafhankelijk van, de meting.

In de niet-lokale verborgen-variabelentheorieën is sprake van een voortdurende actio-in-distans tussen de systemen. Elk systeem "voelt" de aanwezigheid van alle andere systemen, hoe ver weg die ook zijn. Hoewel de wereld dus *analyseerbaar* is in termen van deelsystemen met welbepaalde eigenschappen, is ze niet zonder meer *opsplitsbaar*. Het is niet mogelijk fysische systemen weg te denken uit het geheel zonder aanpassingen elders.

Het realisme dat op deze manier mogelijk blijkt is conceptueel gelijk aan het realisme van de klassieke natuurkunde. Inhoudelijk is er het verschil van de, vanuit klassiek perspectief merkwaardig aandoende, niet-lokaliteit. Dit hoeft voor de realist echter geen principieel probleem op te leveren. Vanuit het gezichtspunt van de verborgen-variabelentheorieën moet de vraag of de quantummechanica realistisch kan worden geïnterpreteerd dan ook zonder meer bevestigend worden beantwoord; de principiële betekenis die in verband met de realismediscussie veelal aan de quantummechanica wordt toegekend lijkt zo gezien niet gerechtvaardigd.

De verborgen-variabelentheorieën hebben echter met een *methodologisch* probleem te kampen. Theorieën zoals die van Bohm bevatten veel meer parameters, nl. de "verborgen variabelen", dan de quantummechanica zelf. Toch zijn ze slechts in staat *dezelfde* voorspellingen te doen. Met andere woorden, de extra theoretische opbouw steunt niet op additionele empirische inhoud. Bovendien moeten, om de quantummechanische voorspellingen te reproduceren, zekere veronderstellingen worden gemaakt over de statistische verdeling van de "verborgen variabelen". Vanuit de verborgen-variabelentheorie zelf geredeneerd zijn deze veronderstellingen volkomen "ad hoc"; de variabelen hadden ook anders kunnen zijn verdeeld, hetgeen dan voorspelling-

gen tot gevolg zou hebben gehad die afwijken van de quantummechanische voorspellingen. De aan de distributie van de variabelen opgelegde eisen zijn slechts te begrijpen als consequentie van de voorwaarde dat de quantummechanische resultaten moeten worden teruggevonden. In deze zin zijn de verborgen-variabelentheorieën *parasitair* op de quantummechanica. Toen Bohm in 1952 zijn theorie publiceerde, sprak hij de verwachting uit dat voortgezet onderzoek tenslotte zou leiden tot de ontdekking van situaties waarin de quantummechanica *niet* en de verborgen-variabelentheorie *wel* empirisch adequaat zou zijn. Dat zou empirische ondersteuning kunnen opleveren voor het werkelijk bestaan van de verborgen variabelen en zo een fundamenteel karakter geven aan de verborgen-variabelentheorie. Veertig jaar onderzoek in deze richting heeft echter niets opgeleverd.

Een realistische interpretatie van de quantummechanica naar klassiek model is dus zeker mogelijk als het quantummechanisch formalisme wordt aangevuld met extra grootheden. Er is echter geen *empirische rechtvaardiging* voor de introductie van zulke extra grootheden. Vanuit realistisch perspectief kan dit ook zo worden geformuleerd: er is geen empirisch bewijsmateriaal voor het *bestaan* van de met de additionele grootheden corresponderende eigenschappen. Hoewel het realisme via de uitweg van de verborgen-variabelentheorieën eenvoudig is te handhaven, is dit daarom geen weg die voor een empirische wetenschap aantrekkelijk is. Methodologische overwegingen spelen hier op interessante wijze mee in discussies over de aard van de fysische realiteit. De vraag die als interessant overblijft, is: kan de quantummechanica, opgevat als *volledige* theorie, realistisch worden geïnterpreteerd?

4.5 De quantummechanica als volledige theorie

De opvatting dat de quantummechanica volledig is, is onproblematisch als men zich op het instrumentalistische standpunt stelt dat de betekenis van de theorie er uitsluitend in gelegen is voorspellingen te doen over macroscopisch waarneembare verschijnselen. Zodra men de theorie wil zien als een beschrijving van fysische systemen, ook voorzover ze niet worden waargenomen, wordt men geconfronteerd met de al eerder genoemde problemen: het probabilistische karakter van de theorie en de daarmee samenhangende bijzondere rol van de meting. Dat de quantummechanica in het algemeen geen welbepaalde waarde toekent aan een fysische grootheid vóór een meting, terwijl na de meting wel een goed gedefinieerde waarde aanwezig is, heeft sommige fysici ertoe gebracht te veronderstellen dat de theorie op *du-*

alistische wijze dient te worden geïnterpreteerd. Zij menen dat "meting" moet worden opgevat als het *ingrijpen* van een *bewuste waarnemer* in de natuur. In deze visie ontstaan eigenschappen van fysische systemen doordat een waarnemer zich van die eigenschappen bewust wordt. Eigenschappen worden gecreëerd door inwerking van het bewustzijn op de natuur (London en Bauer, 1939; Wigner, 1961).

Het is duidelijk dat deze zienswijze te maken krijgt met alle traditionele filosofische problemen van de verhouding tussen het psychische en het fysische. Bovendien is de methodologische tegenwerping te maken dat een interpretatie die een beroep doet op een essentiële rol van het bewustzijn, daarbij stipulerend dat het bewustzijn zelf niet fysisch kan worden begrepen, geen vergroot fysisch begrip van de theorie verschaft; naar een dergelijk vergaande interpretatie zou pas mogen worden gegrepen wanneer duidelijk is gebleken dat de mogelijkheden om zonder speciale rol voor het bewustzijn uit te komen zijn uitgeput. Maar het is niet zo dat de quantummechanica een bijzondere status voor het bewustzijn afdwingt. Naast de instrumentalistische opvatting bestaan wel degelijk mogelijkheden om de quantummechanica "op gewone wijze" realistisch te interpreteren, zoals we al hebben gezien. De dualistische zienswijze geniet dan ook weinig aanhang.

Een onorthodoxe poging om tot een realisme te komen door het probabilistische karakter van de quantummechanica onschadelijk te maken is te vinden in de "veel-wereldeninterpretatie" (Everett, 1957). Hierin stelt men dat de wereld (het universum) zich bij een meting splitst in evenzovele kopieën als er mogelijke uitkomsten van de meting zijn. In iedere wereld wordt precies één mogelijke uitkomst reëel. De waarnemer zelf wordt ook opgesplitst; iedere kopie ziet slechts één uitkomst. Op deze wijze worden alle mogelijkheden even reëel.

De veel-wereldeninterpretatie associeert de formele toestandsbeschrijving met objectief bestaande fysische systemen, met ondubbelzinnig aangegeven eigenschappen, en komt zo aan het realisme tegemoet. Het blijft echter onduidelijk wat precies *metingen*, die een vertakking van werelden tot gevolg hebben, onderscheidt van andere fysische interacties. Verder wordt de principieel onwaarneembare vermenigvuldiging van werelden bedreigd door Ockhams scheermes.

De situatie lijkt per saldo op die in de onvolledigheidsinterpretatie. Daar werden interpretaties van de mathematische theorie beschouwd met meer structuur dan het quantummechanisch formalisme zelf bevat; er is geen empirische ondersteuning voor de toegevoegde structuur (de verborgen van-

abelen). De veel-wereldeninterpretatie werkt ook met grootheden die zich principieel aan de waarneming onttrekken (slechts van één van de vele werelden kunnen wij ons bewust worden). De vraag is of niet een realistische interpretatie te bereiken is die enerzijds direct aansluit bij het formalisme en anderzijds geen beroep doet op principieel onwaarneembare grootheden.

4.6 Bohrs Kopenhaagse interpretatie

Een interpretatie die kan worden opgevat als een poging aan de zojuist gestelde eisen te voldoen is uitgewerkt door Niels Bohr, een van de grondleggers van de quantummechanica (Bohr, 1928). De door Bohr voorgestane opvatting wordt doorgaans aangeduid als de Kopenhaagse interpretatie - hoewel ongelukkigerwijze ook wel eens op sterk van Bohrs zienswijze verschillende meningen wordt gedoeld met deze benaming. Vooral in de oudere literatuur vindt men vaak een gelijkstelling van de Kopenhaagse interpretatie met een instrumentalistische opvatting. Zoals we zullen zien is er echter eerder reden om in Bohrs interpretatie een op de quantummechanica toegesneden vorm van het realisme te zien.

Centraal in Bohrs benadering staat een analyse van de *taal* die we gebruiken om onze waarnemingen te beschrijven. Iedere beschrijving van een waarnemingssituatie en de uitkomst van een experiment maakt in laatste instantie gebruik van de dagelijkse omgangstaal en de technische verfijningen daarop die door de klassieke natuurkunde zijn aangebracht. In deze taal worden objecten gekarakteriseerd door hun eigenschappen en de relaties daartussen. Zelfs in de meest geavanceerde fysische experimenten moeten we tenslotte de situatie weergeven door het specificeren van de posities van de verschillende apparaten, het opgeven van wijzerstanden, de plek waar een fotografische plaat zwart wordt, enzovoort. Deze beschrijvingswijze is de enige manier die ons ter beschikking staat om tot ondubbelzinnige communicatie te komen. In de klassieke natuurkunde zijn we eraan gewend geraakt deze taal uit te breiden tot microscopische, niet direct waarneembare, systemen. We spreken zo niet alleen van de positie van macroscopische objecten, maar ook van de positie van atomen en subatomaire deeltjes. We moeten echter niet vergeten, beklemtoont Bohr, dat onze omgangstaal zich heeft ontwikkeld als communicatiemiddel in de omstandigheden van het dagelijkse leven. Aan die situaties is hij aangepast. Het succes van de klassieke fysica laat zien dat de gebruikelijke beschrijvingswijze ook nog goed opgaat als we ons een zekere afstand van het direct waarneembare verwijderen. Maar we hebben

geen a priori garantie dat de "klassieke taal" overal toepasbaar zal zijn.

Volgens Bohr toont de quantummechanica dat inderdaad grenzen zijn gesteld aan het toepassingsgebied van de taal van alledag en van de klassieke natuurkunde. In het algemeen is van een quantummechanisch object niet te zeggen dat het een welbepaalde waarde voor positie, impuls, of andere grootheden, bezit. Onze uitdrukkingsmiddelen schieten dan te kort om het object te beschrijven. Dat stelt ons voor een dilemma: enerzijds vormt de taal van alledag, met in het verlengde daarvan de taal der klassieke fysica, ons enige communicatiemiddel als we willen weergeven wat we hebben gedaan en wat de resultaten daarvan zijn geweest, anderzijds is die taal principieel onvoldoende om de wereld van de quantummechanica recht te doen. Bohrs Kopenhaagse interpretatie wil een uitweg uit dit dilemma bieden.

De kern van Bohrs analyse wordt gevormd door twee stappen. Allereerst stelt Bohr vast dat klassieke begrippen van toepassing zijn in een macroscopische meetsituatie. Natuurlijk zijn zulke begrippen te gebruiken voor de beschrijving van de macroscopische meetapparatuur zelf; door extrapolatie worden ze echter ook toepasbaar op de microscopische objecten waaraan wordt gemeten. Stel bijvoorbeeld dat we een meting verrichten met behulp van een bellenvat. Vanzelfsprekend is het mogelijk de macroscopische belletjes in het vat een positie toe te kennen. Maar in deze situatie is het ook gerechtvaardigd te spreken over de positie van het deeltje, bijvoorbeeld het elektron, waarover we met het bellenvat informatie proberen te verwerven. Het belletjesspoor geeft inlichtingen over de door het elektron doorlopen posities. Het is echter alleen toegestaan over de positie van een elektron te spreken binnen de genoemde, of een soortgelijke, experimentele context. Bohr drukt het zo uit dat het alleen binnen het totale *fenomeen*, dat de macroscopische meetopstelling omvat, gerechtvaardigd is de met de gemeten grootte corresponderende eigenschap aan het microsysteem toe te kennen. Binnen een ander fenomeen zullen in het algemeen andere eigenschappen aan het microsysteem toekomen.

Dit laatste hangt samen met de tweede hoofdstap in Bohrs betoog. Ofschoon het binnen een fenomeen mogelijk is met klassieke begrippen te werken, kan dit niet op ongelimiteerde wijze gebeuren. Het quantummechanisch formalisme is namelijk overal geldig, ook voor de macroscopische meetopstelling zelf. We hebben al gezien dat het een kenmerk van dit formalisme is dat er geen toestanden bestaan met tegelijkertijd een precies bepaalde waarde van positie én impuls - dit is een consequentie van het onzekerheidsprincipe. Algemener impliceert de toepasbaarheid van één klassiek begrip altijd dat andere begrippen met van toepassing zijn. Om rekenschap te geven van

deze karakteristieke eigenschap van de quantummechanica introduceert Bohr de notie "complementariteit". Positie en impuls zijn voorbeelden van complementaire grootheden, die niet tegelijkertijd een precieze waarde kunnen hebben (al zal het effect van die onbepaaldheid voor macroscopische objecten kwantitatief verwaarloosbaar klein zijn, hetgeen de bruikbaarheid van de klassieke fysica begrijpelijk maakt). Zo zijn er nog vele andere grootheden die in complementaire relatie tot elkaar staan. Een fenomeen waarbinnen één begrip uit een complementair paar exact toepasbaar is sluit de toepasbaarheid van het andere begrip uit. Het is bijvoorbeeld niet mogelijk tegelijkertijd een positie en een impuls aan een elektron toe te kennen. Of één van beide begrippen zonder bezwaar op het elektron kan worden toegepast, en zo ja welk, wordt bepaald door de aard van het totale fenomeen waarbinnen het elektron wordt beschouwd. Macroscopische apparatuur kan dus ook nooit zodanig zijn dat zowel een impuls als een positie wordt gemeten.

In het niet gelijktijdig toepasbaar zijn van enerzijds ruimte-tijdbegrippen (precieze lokalisering van systemen in een ruimte-tijd coördinatensysteem) en anderzijds dynamische begrippen zoals impuls en energie, ziet Bohr de achtergrond van het indeterminisme van de quantummechanica. Systemen bezitten niet tegelijkertijd een plaats én een snelheid, ze volgen daarom ook niet een welbepaald pad door de ruimte. Dat maakt het onmogelijk om op de manier van de klassieke mechanica voorspellingen over het toekomstig gedrag van systemen te doen. Het probabilisme van de quantummechanica heeft dus een fundamenteel karakter, en is niet te wijten aan een onvolledigheid in de beschrijving. Het reflecteert de eigen aard van de microscopische werkelijkheid.

Het is interessant kort Bohrs reactie op de argumentatie van Einstein, Podolsky en Rosen te beschouwen. Wanneer van één deeltje van een paar gecorreleerde, ver van elkaar verwijderde, deeltjes de plaats wordt gemeten, wordt het gezien binnen de context van een fenomeen waarin het begrip positie toepasbaar is. Op grond van de correlatie tussen de deeltjes is het begrip "positie" dan ook op het tweede deeltje toepasbaar. Het is niet zo dat de meting via een of andere wisselwerking deeltje twee verstoort of een waarde van de positie in dat deeltje creëert. De aard van de macroscopische meetapparatuur bij deeltje één *definieert* welke klassieke begrippen van toepassing zijn, ook bij deeltje twee. Er wordt door de aard van het fenomeen als het ware een "positie-perspectief" op de wereld geopend. Een impulsmeting aan deeltje één had op dezelfde wijze deeltje twee toegankelijk gemaakt voor een beschrijving met het begrip "impuls" (althans als er ook een correlatie tussen de impulsen bestaat). Het is niet toegestaan over deze

eigenschappen van de deeltjes te spreken buiten het verband van een fenomeen. De uitspraak dat deeltje twee niet wordt verstoord door de meting en daarom de eigenschappen "positie" en "impuls" ook onafhankelijk van de meting moet bezitten wordt dan ook door Bohr van de hand gewezen. Vanwege de complementariteit van de begrippen "positie" en "impuls" kan hoogstens een ervan toepasbaar zijn, afhankelijk van het fenomeen dat daadwerkelijk wordt gerealiseerd. Op deze manier wordt, volgens Bohr, Einsteins redenering ontzenuwd.

4.7 Quantumrealisme

Bij eerste kennismaking maakt Bohrs positie gemakkelijk de indruk dicht bij het instrumentalisme te staan; er ligt immers een grote nadruk op de beschrijving van wat we metterdaad kunnen waarnemen, meten en voorspellen. Bohrs geschriften zijn overigens van een bijna spreekwoordelijke gecompliceerdheid, zodat het vaak moeilijk is zijn bedoeling te achterhalen. Toch is het waarschijnlijk juist Bohr te zien als een realist, en om in zijn Kopenhaagse interpretatie de contouren te zien van het soort van wetenschappelijk realisme dat compatibel is met de resultaten van geavanceerd natuurwetenschappelijk onderzoek (zie voor een uitvoerige verdediging van de stelling dat Bohr realistische bedoelingen had: Folse, 1985).

De nadruk moet dan liggen, zoals hij in de voorgaande uiteenzetting van Bohrs standpunt ook gelegen heeft, op *de beperkte mogelijkheden van de alledaagse taal om te beschrijven wat onafhankelijk van een meetsituatie het geval is*. De kwestie is dan niet dat geen *realiteit* toekomt aan fysische systemen wanneer er niet aan wordt gemeten, maar dat die realiteit zich niet laat vatten in de begrippen van ons dagelijks taalgebruik of de taal van de klassieke natuurkunde. Alleen in de context van "fenomenen" maakt het abstracte formalisme van de quantummechanica contact met datgene wat wij in onze gewone begrippen kunnen uitdrukken. Zelfs binnen een fenomeen is de klassieke taal niet onbegrensd bruikbaar. Het complementariteitsprincipe legt beperkingen op aan de verzameling van begrippen die tegelijkertijd toepasbaar zijn. Maar dit betekent helemaal niet dat het quantummechanisch formalisme niet correspondeert met een onafhankelijk van de mens bestaande werkelijkheid. Het blijkt alleen onmogelijk te zijn een beschrijving van de wereld *in klassieke termen* te formuleren.

Bohr legde sterk de nadruk op de onmisbaarheid van klassieke begrippen ter beschrijving van de werkelijkheid. Maar het ligt voor de hand zijn

standpunt te generaliseren. Als er geen sprake is van een macroscopische meetopstelling, en een fenomeen, hebben we nog altijd de *abstracte taal van de wiskunde*, waarin de theorie is geformuleerd. De onmogelijkheid van een beschrijving in klassieke termen sluit niet uit dat de wiskundige structuur van de theorie is op te vatten als de weerspiegeling van een structuur die inherent is aan een objectieve fysische realiteit. In een "quantumrealisme" langs deze lijnen wordt dus descriptieve betekenis toegekend aan het mathematisch formalisme, iets wat bij Bohr zelf niet is aan te treffen.

Voor het objectieve karakter van de beschrijving is het van belang dat metingen, zoals Bohr ook heeft benadrukt, niet de aanwezigheid van een bewustzijn vereisen. Beslissend voor het toepasbaar zijn van klassieke begrippen is het aanwezig zijn van een onomkeerbare (irreversibele) interactie met een macroscopisch systeem. Als aan dit criterium is voldaan kwalificeert een interactie als meting en wordt een fenomeen gedefinieerd. Het criterium laat zich vertalen (en generaliseren) in termen van eisen waaraan de wiskundige beschrijving moet voldoen om een situatie te representeren die zich in klassieke termen laat beschrijven (zie voor meer details omtrent deze technische kanten en een verdere uitwerking en discussie van een "quantumrealisme" dat in zijn toekenning van beschrijvende betekenis aan het mathematisch formalisme uitgaat boven Bohrs positie: Dieks, 1988, 1989). Het is dus niet zo dat een of andere vorm van subjectiviteit een rol speelt; het maakt voor de toepasbaarheid van een begrip als "impuls" niet uit of een bewuste waarnemer, een computer of een ander meetapparaat een impulsmeting uitvoert.

Het beeld van de werkelijkheid zoals dat tenslotte op deze manier uit de quantummechanica naai voren komt is heel abstract. Het is een beeld waarvan de algemene structuur wordt vastgelegd door de wiskundige structuur van het Hilbert-ruimteformalisme. In "fenomenen" (waarin klassiek beschrijfbaar meetinstrumenten voorkomen) zijn de toepasbare begrippen de vertrouwde klassieke begrippen; de theorie doet fundamenteel probabilistische uitspraken over de *waarden* van de corresponderende grootheden. Verschillende fenomenen fungeren als verschillende invalshoeken voor onze beschrijving van de fysische realiteit met behulp van de omgangstaal. Als gevolg van de complementariteit zijn de fenomenen niet zoals in de klassieke fysica met elkaar te combineren tot één totaalbeeld, dat in zijn geheel voor klassieke begrippen toegankelijk is. Ook is natuurlijk niet in alle gevallen sprake van een fenomeen; in de meeste situaties vindt immers geen macroscopische meting plaats. Klassieke begrippen zijn dan in het algemeen niet toepasbaar. De wiskundige structuur blijft over als het meest algemene descriptieve instrument dat ons in zulke situaties ter beschikking staat.

Hoewel er inhoudelijk een groot verschil bestaat tussen dit mathematisch getinte quantumrealisme en realistische interpretaties van de klassieke natuurkunde, is er vanuit begripsmatig oogpunt overeenkomst. Wanneer bijvoorbeeld wordt gevraagd: "Wat is een elektron?", dan is het antwoord volgens het hier geschetste quantumrealisme dat de term "elektron" verwijst naar dat aspect van de realiteit dat zich met de door de theorie gespecificeerde structuur van elektrontoestanden laat beschrijven en in een macroscopische meetcontext beschrijfbaar is met begrippen als "plaats" of "impuls". In de klassieke fysica is de situatie in principe niet anders. Alleen is de door de klassieke natuurkunde gegeven structuur zodanig dat zonder bezwaar ook onafhankelijk van een context de eigenschappen "plaats" en "impuls" kunnen worden toegekend. In de quantummechanica is dat niet het geval. De toepasbaarheid van begrippen is hier altijd "contextueel", hangt af van de context, d.w.z. met welke andere systemen wisselwerking bestaat.

Hoewel het quantumrealisme voor de klassieke intuïtie wellicht moeilijk is te verteren, blijft het een poging een beschrijving te geven van een objectieve werkelijkheid, die onafhankelijk is van menselijke waarnemers. Ook een ander kernidee van het realisme, dat opeenvolgende theorieën een steeds betere benadering opleveren van éénzelfde werkelijkheid, laat zich binnen het hier geschetste quantumrealisme nog steeds verdedigen. De mathematische structuur van oudere theorieën is namelijk in de quantummechanica terug te vinden voor bepaalde grenssituaties (die zich in onze dagelijkse ervaring normaalwijs voordoen), net zoals de structuur van de klassieke mechanica als limietgeval vervat is in de structuur van de relativiteitstheorie. Dit maakt het mogelijk op basis van de quantummechanica te begrijpen dat de klassieke fysica vaak in zeer goede benadering toepasbaar is.

Wat ontbreekt in de hier aangeduide realistische interpretatie van de quantummechanica is een *aanschouwelijke voorstelling* van de werkelijkheid; er wordt geen letterlijk *beeld* ontworpen van objecten (deeltjes en velden) die geplaatst zijn in ruimte en tijd. Het traditionele substantiebegrip is niet toepasbaar. Daar staat tegenover dat ons voorstellingsvermogen nauw verbonden is met wat we in het dagelijks leven waarnemen, zodat het gebonden is aan soortgelijke beperkingen als onze klassieke taal. In een wetenschappelijk realisme dat zijn uitgangspunt neemt in de resultaten van geavanceerd natuurwetenschappelijk onderzoek mag niet worden verwacht dat aan een verlangen naar aanschouwelijkheid wordt tegemoetgekomen. Desalniettemin kan ook in een wereld waarin de quantummechanica misschien correct is op zinvolle wijze worden getracht aan een realistische opvatting uitwerking te geven.

4.8 Literatuurverwijzingen bij hoofdstuk 4

Overzichtsboeken over de interpretatie van de quantummechanica zijn:

Jammer, M. (1974): *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York (Wiley).

D'Espagnat, B. (1976): *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*. London (Benjamin).

Literatuur over specifieke onderwerpen en interpretaties:

Bell, J.S. (1964): On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. *Physics* 1, 195.

Bohm, D. (1952): A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables. *Physical Review* 85, 166; 180.

Bohr, N. (1928): The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory. *Nature (Suppl.)* **121**, 580.

Dieks, D. (1989a): Quantum Mechanics Without the Projection Postulate and Its Realistic Interpretation. *Foundations of Physics*, 19, 1397; (1989b): Resolution of the Measurement Problem Through Decoherence of the Quantum State. *Physics Letters A* **142**, 439.

Einstein, A., B. Podolsky, N. Rosen (1935): Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review* 47, 777.

Everett, H. (1957): "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics* 29, 454.

Folse, H.J. (1985): *The Philosophy of Niels Bohr*. Amsterdam (North-Holland).

London, F. et Bauer, E. (1939): *La Theorie de l'Observation en Mécanique Quantique*. Paris (Hermaan).

Van Fraassen, B.C. (1991): *Quantum Meehanics. Anempiricist view*. Oxford (Clarendon Press).

Wigner, E.P. (1961): Remarks on the Mind-Body Question. In: *The Scientist Speculates*, I.J. Good (ed.), London (Heinemann).