

Deze download is uitsluitend voor eigen gebruik bedoeld.
Doorsturen per e-mail of anderszins, kopiëren, op websites of
andertzins op internet plaatsen, of verhandelen is niet toegestaan.

De boeken van Uitgeverij Nieuwezijds zijn verkrijgbaar in
de boekhandel en via www.nieuwezijds.nl.

Doorbraken in de natuurkunde

Redactie

MACHIEL KEESTRA

Deze uitgave is tot stand gekomen in samenwerking met
Studium Generale van de Universiteit van Amsterdam



UITGEVERIJ NIEUWEZIJD'S

Uitgegeven door: Uitgeverij Nieuwezijds, Amsterdam
Eindredactie: Anne Löhnberg, Amsterdam
Zetwerk: CeevanWee, Amsterdam
Illustraties binnenwerk: Maarten Toneman, Amsterdam

Copyright © 2001, 2003, 2010 de respectievelijke auteurs

‘Van Aristoteles tot Galilei: naar een nieuwe bewegingsleer’ van Frans van Lunteren, is een bewerking van een stuk dat eerder verscheen in de bundel *In grote lijnen: Natuurkundige Theorieën* van Studium Generale van de Universiteit Utrecht.

ISBN 978 90 5712 167 8
NUR 924

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, geluidsband, elektronisch of op welke andere wijze ook en evenmin in een retrieval system worden opgeslagen zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel dit boek met veel zorg is samengesteld, aanvaarden schrijver(s) noch uitgever enige aansprakelijkheid voor schade ontstaan door eventuele fouten en/of onvolkomenheden in dit boek.

Voorwoord

Vorig jaar verscheen het boek *Tien westerse filosofen*, met teksten naar aanleiding van lezingen die waren gehouden voor het Studium Generale van de Universiteit van Amsterdam. Die teksten lieten de lezer kennismaken met een tiental belangrijke westerse denkers, waarbij ervoor was gekozen om de nadruk te leggen op hun ethische posities. Op die manier kon er enigszins een gedachteswisseling tussen deze denkers worden geboden, hoewel gemakkelijker andere onderwerpen gekozen hadden kunnen worden. Ook hadden heel andere personen voor het voetlicht gehaald kunnen worden, omdat in de paar duizend jaar filosofiegeschiedenis velen zich over dezelfde problemen hebben gebogen. Bovendien is het typisch voor de filosofie dat er misschien wel hier en daar een hoofdlijn in haar geschiedenis te ontwaren valt, maar dat ook relatief 'onbelangrijke' auteurs belangwekkende bijdragen hebben geleverd. Niet zelden kan een denker lang na zijn dood op een belangstelling rekenen die hij nooit had (durven) voorzien. Al met al moest in dit verband dus een behoorlijke keuze worden gemaakt. De beperkingen die een lezingenserie nu eenmaal heeft, in omvang en in complexiteit, bleken later juist de leesbaarheid van de bundel ten goede te komen.

Daarna organiseerde ondergetekende een serie lezingen

over de biologie, waarbij was gekozen voor een meer systematische benadering. In de biologische wetenschap zijn er te weinig herkenbare individuen geweest aan wie een inleiding tot de biologie kon worden opgehangen. Daarom was in dit verband elke lezing gericht op een bepaald niveau van organisatie of aggregatie: van DNA tot ecosysteem. De historische component was bij deze benadering vrijwel afwezig. Dit kwam grotendeels door het feit dat de biologie een relatief jonge wetenschap is, zodat het niet makkelijk is om de ontwikkelingen te spiegelen aan andere historische ontwikkelingen. Helaas bleek het niet mogelijk om deze lezingen geschikt en beschikbaar te krijgen voor een boek.

Gelukkig was dat anders bij de serie lezingen die fungeerde als een kennismaking met de natuurkunde en die haar weerslag heeft gevonden in dit boek. Ten eerste bleek het mogelijk om natuurkundige begrippen en inzichten te presenteren in een historisch kader. Verscheidene natuurwetten en begrippen zijn immers geldig gebleven in de loop der eeuwen; een situatie die zeker niet in elke wetenschap te vinden is – bijvoorbeeld niet in die mate in de levenswetenschappen. Ten tweede bleken het – uiteraard, zou men zeggen – vaak individuele onderzoekers te zijn die een herkenbare bijdrage hadden geleverd aan de ontwikkeling van de natuurkunde, meestal in de vorm van ontdekte wetmatigheden of bepaalde theorieën. Hoewel er ongetwijfeld belangrijke personen zijn die toegevoegd hadden kunnen worden aan de hier behandelde, is er eigenlijk nauwelijks twijfel mogelijk over het belang van de besproken onderzoekers. Anders dan bij de keuze voor de tien filosofen is hier nauwelijks ruimte voor persoonlijke voorkeuren. Hetzelfde geldt voor de onderwerpen die worden besproken. Natuurlijk wordt er slechts een fractie van het werk van de gekozen onderzoekers belicht, maar toch krijgt de lezer zo een redelijk representatief beeld van de ontwikkeling van de belangrijkste opvattingen in de natuurkunde. Ten derde bleek het door deze historische en aan bepaalde onderzoekers gekoppelde benadering mogelijk om te laten zien hoezeer natuurkundige opvattingen samenhangen met begrippen uit andere domeinen, zoals de filosofie en de theologie en met ander culturele ontwikkelingen. Daarmee kon ook de intentie van het Studium Generale, het be-

lichten van interdisciplinaire verbanden en het bespreken van relaties tussen cultuur en wetenschap, worden gerealiseerd.

Het is helaas niet gelukt om in dit boek bijdragen op te nemen over de huidige stand van zaken. Al bij de voorbereiding van de lezingenserie bleek dat in de naoorlogse natuurkunde een ware explosie van activiteiten heeft plaatsgevonden: er werd enorm veel onderzoek verricht op zeer veel verschillende gebieden. Zo zijn er in toenemende mate verbanden met de astronomie, bijvoorbeeld omdat sterrenkundige verschijnselen informatie kunnen leveren over de begintoestand van de kosmos en daarmee over de vorming van de materie en natuurconstanten. En er zijn aan de andere kant ook complexe vormen van wiskunde, waarvan sommige natuurkundigen hopen dat ze kunnen bijdragen aan de ontwikkeling van een Grote Overkoepelende Theorie voor de natuurkunde. Een belangrijke kandidaat daarvoor is wel de zogenoemde 'snaartheorie'. Het bleek niet mogelijk om een bijdrage hierover op te nemen in deze bundel. Dat heeft zeker te maken met de verregaande complexiteit en onoverzichtelijkheid van deze recente gebieden. Bovendien lopen de meningsverschillen erover soms aardig hoog op, hetgeen niet meer zo sterk geldt voor de ontwikkelingen die wel in dit boek besproken worden.

Al met al zal de lezer van dit boek een behoorlijke indruk kunnen krijgen van de voornaamste inzichten uit de natuurkunde, alsmede van hun ontwikkeling. Dat is in belangrijke mate te danken aan de inspanningen van de auteurs, die hun lezing allemaal hebben willen omwerken tot een leesbare tekst. Daarbij hebben ze wederom rekening willen houden met mijn suggesties, alsmede met de opmerkingen van eindredacteur Anne Löhnberg, die bovendien nuttige dwarsverbanden aanbracht en een index samenstelde waarmee zij het boek extra samenhang gaf.

Machiel Keestra

Inhoud

- Inleiding 11
MACHIEL KEESTRA
- 1 Van Aristoteles tot Galilei: naar een nieuwe bewegingsleer 25
FRANS VAN LUNTEREN
- 2 Christiaan Huygens en de mechanica van het licht 55
FOKKO JAN DIJKSTERHUIS
- 3 Isaac Newton en zijn gravitatie­theorie 81
KEES DE PATER
- 4 Faraday, Maxwell en de theorie van het
elektromagnetisme 109
HARRY SNELDERS
- 5 Warmteleer: van Carnot tot Boltzmann 137
JOS UFFINK
- 6 Einstein en de relativiteitstheorie 157
MAARTEN FRANSEN
- 7 Bohr en de quantummechanica 185
MAARTEN FRANSEN
- Illustratieverantwoording 215
Index 217
Over de auteurs 223

Inleiding

Machiel Keestra

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

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

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

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

1 **Revoluties in de wetenschap: beweging**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2 Rivaliserende visies: licht

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

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

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

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

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

3 Uiteenlopende invloeden: zwaartekracht

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

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

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

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

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

4 Eenheid van natuurkrachten: elektromagnetisme

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

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

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

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

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

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

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

5 Een onomkeerbaar proces: warmte

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

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

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

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

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

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

6 De natuurkundige wereld op zijn kop: relativiteit

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

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

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

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

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

7 Onzekerheid op kleine schaal: quantummechanica

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

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

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

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

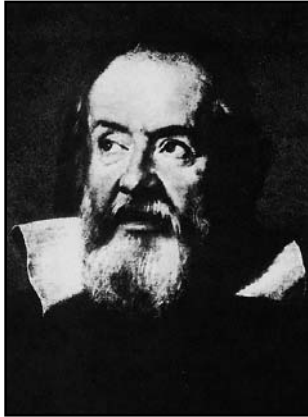
de grenzen van de taal waarmee wij nu eenmaal natuurverschijnselen beschrijven. Op het quantumniveau worden deze grenzen zichtbaar, onder meer doordat we altijd een beroep moeten doen op klassieke modellen voor de beschrijving van quantumverschijnselen.

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

8 Op naar de volgende doorbraak

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

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



I

*Van Aristoteles tot Galilei:
naar een nieuwe bewegingsleer*

Frans van Lunteren

In 1638 verscheen te Leiden een Italiaans drukwerk, dat reeds in de titel pretendeerde 'twee nieuwe wetenschappen' te behandelen. Het boek was het werk van een inmiddels 74-jarige en steekblinde grijsaard die in Italië tot huisarrest gedwongen was, Galileo Galilei genaamd. Zijn huisarrest was een substituut voor zijn oorspronkelijke veroordeling tot levenslange gevangenisstraf door de inquisitie vijf jaar eerder, als gevolg van zijn nauwelijks verholen propaganda voor de kosmologie van Copernicus in een in 1632 in Italië verschenen werk. Het was Galilei daarbij verboden enig boek van zijn hand, oud of nieuw, te laten drukken. Het manuscript van zijn laatste werk werd daarom door vrienden het land uit gesmokkeld, waarna het alsnog in druk verscheen.

De eerste van de twee nieuwe wetenschappen had betrekking op een aantal technische problemen die samenhangen met de samenstelling van materie. Zoals iedere scheepsbouwer wist, aldus Galilei, dreigde bij grote constructies het gevaar van breuk door toedoen van het eigen gewicht, terwijl bij een identieke constructie op veel kleinere schaal dit gevaar afwezig was. Dit uitgangspunt leidde tot een behandeling van het probleem van materiaalsterkte.

Van groter historisch belang was de tweede 'nieuwe wetenschap'. Hier presenteerde Galilei een wiskundige behandeling van

de eenparige (met constante snelheid) én de versnelde beweging, toegepast op de vrije val en de samengestelde beweging van projectielen. Deze verhandeling wordt veelal gezien als de aanvang van de moderne mechanica en, algemener, van de moderne natuurkunde.

Galilei wordt beschouwd als een belangrijke, zo niet de belangrijkste figuur uit de wetenschappelijke revolutie. Het is onmogelijk om recht te doen aan de betekenis van Galilei's werk zonder een voorafgaande beschouwing van eerdere analyses van beweging. Die is des te meer nodig omdat historici die het revolutionaire van de zeventiende-eeuwse wetenschap in twijfel hebben getrokken, in het bijzonder verwezen naar middeleeuwse precedenteren voor Galilei's veronderstelde innovaties in de bewegingsleer.

Na een inleiding over de wetenschappelijke revolutie zullen we beginnen met de aristotelische bewegingsleer. We zullen kennismaken met een aantal middeleeuwse eigenaardigheden, zoals de discussie over de vraag naar de aandrijving van weggeworpen voorwerpen en de analyse van de 'intentie en remissie van aristotelische kwaliteiten', en met wiskundige traktaten over oorlogsvoering uit de Renaissance. Daarna bevinden we ons in een positie om de ontwikkeling van Galilei's opvattingen over de beweging te behandelen, waarbij zijn copernicanisme eveneens aan de orde zal komen. Zoals we zullen zien bestond er een sterke wisselwerking tussen zijn opvattingen over beweging en die over de bouw van de kosmos. Ten slotte zullen we heel kort ingaan op de verdere ontwikkeling van de bewegingsleer, die een centrale positie innam in de natuurkunde van de achttiende en de negentiende eeuw.

1.1 De wetenschappelijke revolutie

In de visie van de meeste wetenschapshistorici stond het werk van Galilei niet op zich, maar maakte het deel uit van een algehele transformatie van de natuurwetenschappen, aangeduid als de *wetenschappelijke revolutie*. Deze omwenteling werd niet primair ge-

stuurd door ontdekkingen van nieuwe verschijnselen, maar door een geheel nieuwe benadering van de natuur. De voornaamste kenmerken van de moderne natuurkunde, namelijk in *wiskundige* vorm gegoten *wetten*, gefundeerd door langs *experimentele* weg gecreëerde *feiten* en gepaard aan een *mechanistisch wereldbeeld*, ontbraken grotendeels in de 'natuurkunde' vóór de wetenschappelijke revolutie.

Dit was niet zozeer een kwestie van middeleeuwse onwetendheid als wel een uitvloeisel van het toenmalige wereldbeeld, dat sterk de signatuur droeg van klassieke wijsgeren als Plato en bovenal Aristoteles. In een wereld die meer gelijkenis vertoont met een bezielde en levend wezen dan met een machine en waar een strikt onderscheid bestaat tussen het chaotische aardse en het onveranderlijke hemelse domein, is het onaannemelijk dat natuurlijke gebeurtenissen worden geregeerd door eenvoudige wiskundige wetten. In een dergelijke wereld is het eveneens onwaarschijnlijk dat men middels het creëren van gekunstelde, onnatuurlijke situaties (zoals in experimenten veelal gebeurt) informatie kan verkrijgen over de natuurlijke aard der dingen. Waar de mechanicus de materiële wereldmachinerie ontrafelt om zo de verborgen werkoorzaken te achterhalen, observeert de in hogere, geestelijke principes geïnteresseerde natuurfilosoof de ongestoorde natuurlijke orde teneinde de doelloorzaken van natuurlijke processen te determineren.

Over de duur, de aard en de oorzaken van de wetenschappelijke revolutie bestaat een groot aantal uiteenlopende visies, en sommige historici willen de term zelfs liever geheel vermijden. Minder problematisch is het om aan te geven wat de voornaamste ingrediënten van het proces waren: de overgang naar een nieuwe kosmologie waarin de aarde haar gefixeerde positie in het middelpunt van een betrekkelijk klein, bolvormig heelal verliest; het ontstaan van een nieuwe bewegingsleer, waarin beweging van één van de verschillende soorten verandering die een voorwerp kan ondergaan, een abstract wiskundig concept wordt; en, meer algemeen, de afrekening met het aristotelische gedachtegoed dat eeuwenlang het denken over de natuur had gedomineerd.

Deze ingrijpende veranderingen werden bewerkstelligd

door een groot aantal geleerden. Maar als er één hoofdrolspeler moet worden uitverkoren dan valt de keus onvermijdelijk op Galileo Galilei. Als fervent anti-aristoteliaan, als luidruchtig propagandist van het copernicaanse zonnestelsel (waarin de zon het middelpunt vormde en niet de aarde), en bovenal als grondlegger van een nieuwe bewegingsleer vervulde hij een essentiële rol in de voornaamste wetenschappelijke ontwikkelingen van zijn tijd. Niemand in zijn tijd gaf krachtiger uiting aan de gedachte dat de schijnbaar chaotische aardse veranderingen, evenzeer als de meer harmonische hemelse verschijnselen, in wezen onderhevig zijn aan eenvoudige geometrische principes. Lange tijd gold Galilei tevens als de grondlegger van de experimentele methode; deze karakterisering is tegenwoordig op zijn minst omstreden, maar verwaarloosbaar was de rol van experimenten in zijn werk zeker niet. Als atomist kan hij worden gezien als een overgangsfiguur tussen het aristotelische en het mechanistische wereldbeeld. Zoals verderop zal blijken, is hij er nooit geheel in geslaagd zich te emanciperen van het aristotelische wereldbeeld, zelfs niet in zijn bewegingsleer.

Hoewel zijn rol in de copernicaanse omwenteling ongetwijfeld het meest spectaculair was, temeer daar deze hem in botsing bracht met de kerkelijke autoriteiten, ligt hier de nadruk op zijn rol in de creatie van een nieuwe benadering van beweging, waarschijnlijk de meest ingrijpende en verreikende innovatie van alle. Centraal in deze nieuwe benadering staat het traagheidsprincipe: de tegen de intuïtie indruisende notie dat beweging, of liever eenparige rechte beweging in essentie geen oorzaak behoeft en niets aan de toestand van een voorwerp verandert. Doordat beweging niets aan de voorwerpen zelf verandert, wordt het mogelijk verschillende, ogenschijnlijk conflicterende bewegingen op wiskundige wijze te combineren – zoals Galilei deed toen hij uit de versnelde valbeweging en de rechte traagheidsbeweging een parabolbaan construeerde.

Zoals we zullen zien, is het moderne traagheidsprincipe strikt genomen niet aanwezig bij Galilei; wel heeft hij zeer veel bijgedragen aan de moderne opvatting ervan. Ook al ontbreken bij Galilei de abstracte tijd- en ruimteconcepties die kenmerkend

zijn voor de moderne mechanica, toch heeft niemand meer dan hij bijgedragen aan de mathematisering van de bewegingsleer. Dit laatste deed hij ten eerste door de formulering van zijn beroemde valwet, en meer nog door zijn analyse van de kogelbaan.

1.2 De bewegingsleer en kosmologie van Aristoteles

Beweging is volgens Aristoteles (vierde eeuw voor Christus) in essentie een vorm van verandering, namelijk verandering van plaats. Zoals elke verandering behoeft ook deze een oorzaak. Anders gezegd: iedere beweging vergt een beweger, een aandrijving die de beweging in stand houdt. Deze bewegingsoorzaak is bovendien altijd in contact met het bewogene. Werking op afstand (zie par. 3.5) accepteert Aristoteles niet. In het geval van *natuurlijke* beweging bevindt de beweger zich in het voorwerp zelf en valt samen met de specifieke aard van het voorwerp, die zich onder meer uit in het streven om zijn natuurlijke plaats te bereiken. Hier is de oorzaak een *doel*-oorzaak. In het geval van *gedwongen* beweging is de oorzaak een uitwendige kracht en spreken we van een *werk*-oorzaak.

Aristoteles maakt een principieel onderscheid tussen natuurlijke bewegingen en gedwongen of tegennatuurlijke bewegingen. De eerste vallen onder de fysica, omdat zij uit het wezen (*physis*) der dingen voortvloeien, de tweede onder de mechanica, de leer der kunstmatige bewegingen, die zich ook bezighoudt met katrollen, hefbomen, windassen en allerhande werktuigen. Door deze fundamentele tegenstelling is de aristotelische mechanica moeilijk te vergelijken met de klassieke mechanica van Newton.

Een natuurlijke beweging is bijvoorbeeld de val naar beneden van een losgelaten steen. Van tegennatuurlijke beweging is sprake in het geval van een steen die wordt weggegooid. Deze beweegt niet naar zijn natuurlijke plaats, maar in een volstrekt willekeurige richting. Hier is een externe beweger noodzakelijk. In eerste instantie is dit natuurlijk de hand die de steen werpt. Maar wat houdt de steen in beweging op het moment dat deze de hand verlaten heeft? Volgens Aristoteles is het de door de hand geacti-

veerde lucht die hierna als voortstuwend mechanisme optreedt en die tevens telkens een volgend luchtlaagje activeert dat voor een verdere voortstuwing zorgt, hetgeen uiteindelijk resulteert in een continue beweging.

Hoewel Aristoteles niet zozeer geïnteresseerd was in wetmatigheden (hij was meer geïnteresseerd in de vraag *waarom* de beweging plaatsvindt, dan *hoe* die plaatsvindt), is het wel mogelijk een soort wetmatigheid uit zijn werk te distilleren. Volgens Aristoteles wordt iedere beweging bepaald door twee factoren, namelijk de aandrijvende kracht en de bij de beweging ondervonden weerstand. De snelheid van een voorwerp is groter naarmate de aandrijvende kracht groter is, en kleiner naarmate de weerstand die de beweging ondervindt, toeneemt.

Deze theorie sluit goed aan bij de alledaagse waarneming. Denk bijvoorbeeld aan een ossenwagen. Zonder trekkende os beweegt de wagen niet. Naarmate de os harder trekt, zal de wagen sneller bewegen; in mul zand, waar de weerstand groter is, zal de wagen trager bewegen dan op een steviger ondergrond. Iets soortgelijks geldt voor natuurlijke beweging. De zware steen valt sneller dan het veel lichtere herfstblad, en de steen valt trager in water dan in de minder weerstand biedende lucht. In een lege ruimte zou een voorwerp bij gebrek aan weerstand oneindig snel vallen en dus op meerdere plaatsen tegelijk zijn, hetgeen onmiddellijk de absurditeit van het vacuüm aantoonde. Voor Aristoteles is weerstand dan ook een essentiële factor bij iedere beweging.

In Aristoteles' bewegingsleer, of liever in zijn wereldbeeld, is er nog een tweede fundamentele tegenstelling die de overgang naar het nieuwe wereldbeeld bemoeilijkt heeft: het principiële verschil tussen het ondermaanse of aardse domein en het bovenmaanse of hemelse domein. Volgens Aristoteles is de aarde omringd door een aantal concentrische bollen, de zogenaamde hemelse *sferen*. De eerste hemelse sfeer is de maansfeer. De wereld buiten deze sfeer is van een totaal andere aard dan die erbinnen. Het hemelse gebied wordt volgens Aristoteles gekenmerkt door perfectie en onveranderlijkheid. Hier wentelen de hemelsferen eeuwig om hun as, waarbij ze de hemellichamen rondvoeren in hun cirkelvormige banen.

Het ondermaanse is het gebied van de vergankelijkheid. Deze wereld is opgebouwd uit de vier elementen aarde, water, lucht en vuur, die alle binnen dit gebied een natuurlijke plaats bezitten. In het midden bevindt zich de massieve aardbol, waarin het zware element aarde overheerst. Daaromheen vinden we het oceaanwater, dat wordt omringd door lucht en daarboven bevindt zich ten slotte het vuur. Dit laatste element is absoluut licht en beweegt zich daarom van nature naar de buitenste sfeer. Lucht en water nemen tussenposities in. Lucht is zwaar ten opzichte van vuur, maar licht ten opzichte van aarde en water. Het bovenmaanse bestaat uit een apart, vijfde element of *quinta essentia*, ook wel ether genaamd.

Het fundamentele verschil tussen beide gebieden komt ook tot uiting in de bewegingsleer. In het ondermaanse is de enige natuurlijke beweging een rechte beweging naar het wereldcentrum toe (van aarde) of juist ervandaan (van vuur). De bewegingsoorzaak noemen we in deze gevallen respectievelijk de *zwaarte* of de *lichtheid* van het voorwerp. Deze beweging kan nooit eeuwigdurend zijn. Dit verklaart waarom de aarde in het middelpunt van de wereld staat, en hieruit volgt tevens dat zij niet om haar as kan draaien, hetgeen immers een tegennatuurlijke beweging zou zijn. In het bovenmaanse zijn er slechts natuurlijke bewegingen. De hemelse natuurlijke beweging is de eenparige cirkelbeweging rond het middelpunt van de wereld.

1.3 De impetusleer

De essentie van de aristotelische bewegingsleer, namelijk de doctrine dat voor iedere beweging een beweger (ofwel een aandrijvende kracht) nodig is die direct met het bewogene is verbonden, werd tot in de zeventiende eeuw als vanzelfsprekend beschouwd. Dit gold echter niet voor de meer concrete details van Aristoteles' benadering van verschillende vormen van beweging. Reeds in de zesde eeuw na Christus oefende de Alexandrijnse commentator Philoponus kritiek uit op uiteenlopende aspecten van Aristoteles' doctrines. Zo ontkenne hij de fundamentele rol van een weer-

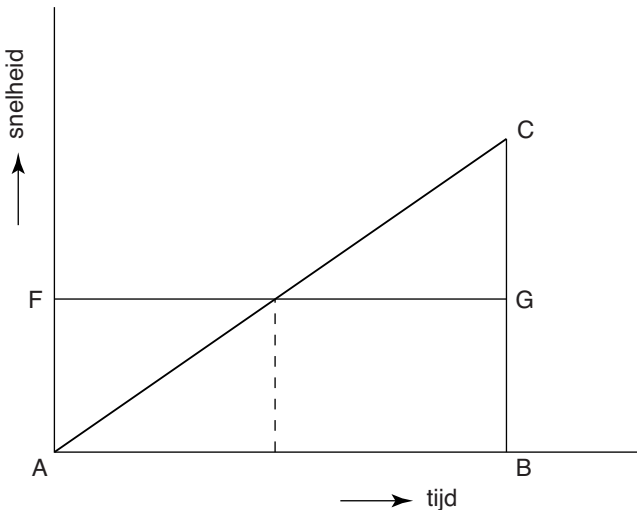
standbiedend medium bij de beweging. Volgens Philoponus is ook zonder weerstand beweging met een eindige snelheid mogelijk. Ook ontkende hij dat zware voorwerpen veel sneller vallen dan lichte voorwerpen. Belangrijker echter was zijn kritiek op Aristoteles' theorie van de gedwongen beweging, in het bijzonder de worp. Zo meende hij dat het niet zozeer de lucht was die voor de continuering van de beweging zorgde, als wel een tijdens de worp in het voorwerp gedrukt vermogen. Door luchtverplaatsing is immers geen steen in beweging te krijgen.

Een soortgelijke opvatting van de worpbeweging vinden we terug in de late Middeleeuwen. Met name in het veertiende-eeuwse Parijs ontwikkelde zich de zogenaamde impetusleer. De voornaamste woordvoerder van de theorie was de Fransman Buridan. De impetus is volgens Buridan de aandrijvende kracht die tijdens een worp door de hand in het voorwerp wordt ingeplant. De grootte van deze kracht wordt bepaald door de hoeveelheid materie in het voorwerp en de snelheid van het voorwerp. Hoe groter de snelheid, hoe langer de beweging aanhoudt, en een met een bepaalde snelheid weggeworpen steen komt verder dan een even groot, met dezelfde snelheid weggeworpen stuk hout. Bij een natuurlijke beweging – bijvoorbeeld een vrije val – is het de zwaarte die niet alleen zorgdraagt voor de oorspronkelijke valbeweging, maar ook voor een voortdurende toename van de impetus in een voorwerp. Vandaar dat voorwerpen versneld vallen.

Bij oppervlakkige beschouwing doet het begrip impetus enigszins denken aan het moderne impulsbegrip (zie ook par. 7.5). De impuls is echter geen oorzaak van, maar een maat voor de beweging. Daarbij moet men zich ook realiseren dat zowel hoeveelheid materie als snelheid in de veertiende eeuw geen nauwkeurig gedefinieerde begrippen waren. Verder meenden de meeste aanhangers van de impetustheorie dat de impetus bij gedwongen beweging geleidelijk aan afnam, zelfs als werd afgezien van weerstand, daar een gedwongen beweging nooit eeuwigdurend zou kunnen zijn. Hoewel de impetusleer een belangrijke stap vormde in de richting van de moderne bewegingsleer, zijn er belangrijke verschillen tussen beide. Het ging hier eerder om een modificatie binnen de aristotelische bewegingsleer dan om een grondige herziening ervan.

Anderzijds vinden we in de veertiende eeuw tamelijk modern ogende wiskundige analyses van de eenparig versnelde beweging (beweging waarbij de versnelling constant blijft), zij het niet toegepast op de valbeweging. Deze bijdragen kwamen voort uit de typisch middeleeuwse preoccupatie met de wijze waarop eigenschappen ofwel kwaliteiten van intensiteit veranderen. Zoals de roodheid van de appel toeneemt bij het rijpen, zo wordt de intensiteit van de beweging groter bij het versnellen. Deze benadering leidde tot een precieze definitie van eenparige versnelling als een beweging waarbij een gelijke snelheidstoename wordt verkregen in ieder van een aantal willekeurig gekozen gelijke tijdsintervallen.

Een van de resultaten die uit de analyse van eenparig versnelde beweging voortvloeiden, was de uitdrukking van de afgelegde weg als het product van de gemiddelde snelheid en de tijd. Of zoals de middeleeuwers het formuleerden: stel dat een aanvan-



Afbeelding 1.1: Geometrische analyse van een eenparig versnelde beweging. De totaal afgelegde afstand is gelijk aan het oppervlak van de driehoek ABC. Met behulp van de meetkunde van Euclides is eenvoudig aan te tonen dat dit oppervlak gelijk is aan dat van de rechthoek AFGB.

kelijk in rust verkerend lichaam gedurende een zeker tijdsinterval een eenparige versnelling ondergaat en daarbij een zekere afstand aflegt; als een zelfde lichaam gedurende een zelfde tijdsinterval zou bewegen met een uniforme snelheid gelijk aan de snelheid verkregen op het middelste tijdstip van de eenparig versnelde beweging, dan zou het eenzelfde afstand doorlopen (zie afbeelding 1.1).

Gedurende de veertiende en vijftiende eeuw werden verschillende rekenkundige en geometrische bewijzen van deze stelling geformuleerd. De bekendste hiervan was een geometrisch bewijs van de Fransman Oresme, een leerling van Buridan. Dergelijke bewijzen mogen tamelijk modern ogen, maar we moeten ons wel realiseren dat soortgelijke analyses werden losgelaten op zaken als toe- of afnemende barmhartigheid, waarbij het erom ging de totale maat van de barmhartigheid te bepalen. Voor de middeleeuwer was er geen verschil tussen beide bespiegelingen. Het ging bovenal om puur intellectuele exercities: wat ontbrak was de toepassing op de werkelijkheid. Oresme zelf karakteriseerde de geometrische representaties van veranderlijke intensiteiten van kwaliteiten als verzinsels van het verstand zonder enige relevantie voor de natuur.

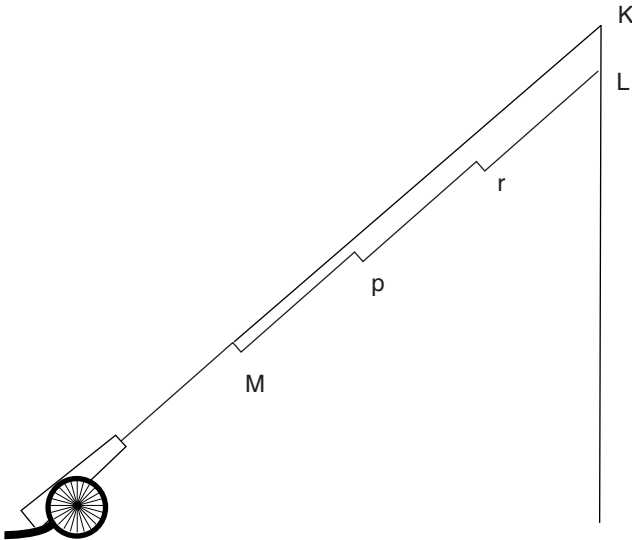
De door sommige historici verdedigde stelling dat de moderne bewegingsleer zich geleidelijk ontwikkelde uit het werk van de genoemde middeleeuwse geleerden, wordt niet alleen verzwakt door een inhoudelijke analyse. Ook historische aanwijzingen ondermijnen deze these. In de zestiende eeuw nam de belangstelling voor de wiskundige analyse van eenparig versnelde beweging zienderogen af – een lot dat veel middeleeuwse tradities ondergingen, ten gevolge van de snel toenemende aandacht voor het werk van de klassieke auteurs, die in alle opzichten superieur geacht werden. Anders verging het de impetustheorie. In de zestiende eeuw verloor deze theorie echter spoedig haar anti-aristotelische karakter en werd ze onderdeel van de aristotelische orthodoxie.

1.4 Kanonnen en kogelbanen

Waren wiskundige analyses van de valbeweging in de Middeleeuwen schaars, nog veel zeldzamer waren pogingen om de worpbeweging wiskundig te beschrijven. Men was over het algemeen meer geïnteresseerd in oorzakelijke verklaringen dan in precieze beschrijvingen. Buiten de universiteit was echter een toenemend aantal wiskundigen te vinden met grote belangstelling voor praktische problemen. Een van die problemen kwam voort uit het snel toenemende gebruik van kanonnen in de oorlogsvoering: welke baan doorloopt een onder een bepaalde hoek afgeschoten kogel?

Verscheidene wiskundigen hielden zich in de zestiende eeuw met deze vraag bezig. Door de militaire relevantie van hun vak te etaleren hoopten zij de welwillende aandacht van vorsten te verkrijgen en zo hun maatschappelijke status te verhogen. De traditionele opvatting onderscheidde twee fasen: die van de gedwongen beweging en die van de natuurlijke beweging. De kogel verlaat de loop met een zekere impetus, die door het buskruit aan de kogel is meegegeven. Deze impetus stuwt de kogel voort in de oorspronkelijke richting. Door de zwaarte van de kogel en de weerstand van de lucht neemt de impetus echter voortdurend af. Op het moment dat de zwaarte de impetus overheerst, gaat de beweging over in een verticale valbeweging (zie afbeelding 1.2).

Uiteraard ontging het ook de zestiende-eeuwers niet dat deze beschrijving sterk geïdealiseerd was. De waarneming leert inderdaad dat kogels de loop rechthoekig verlaten en dat zij uiteindelijk omlaag vallen; voor de scherpe knik op het hoogste punt van de baan is er daarentegen minder empirische ondersteuning. Het probleem was dat de wiskundigen moeilijk konden aanvaarden dat eenzelfde voorwerp tegelijkertijd een gedwongen en een natuurlijke beweging kon ondergaan. Tussen natuurlijke en gedwongen beweging bestond immers een conflict; de sterkste van de twee bepaalde de beweging van de kogel. Er was ook nog een ander fysisch argument waarom natuurlijke en gedwongen beweging niet samen konden gaan: bij gedwongen beweging is er altijd een afname van snelheid, terwijl bij natuurlijke beweging de snelheid altijd toeneemt. Het is evident dat de snelheid niet

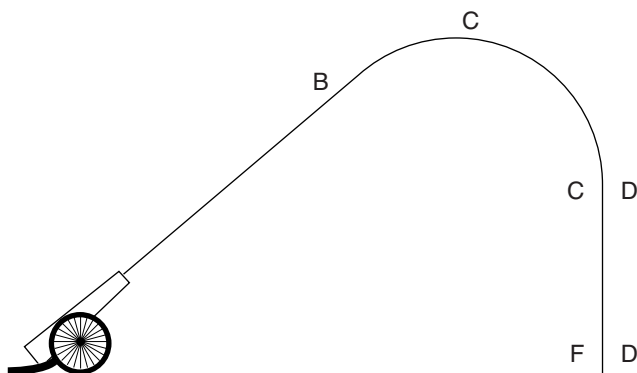


Afbeelding 1.2: Zestiende-eeuwse voorstelling van een kogelbaan. De getrapte lijn M p r L net onder de diagonaal illustreert het conflict tussen de gedwongen en de natuurlijke beweging.

tegelijktijd kan toenemen en afnemen.

Een in onze ogen realistischer compromis vinden we in een vroeg werk over kogelbanen van de Italiaanse wiskundige Tartaglia, verschenen in 1537 en getiteld *Nieuwe wetenschap*. Tartaglia onderscheidde drie fasen in de kogelbaan; het middelste deel van de baan is een cirkelsegment (zie afbeelding 1.3). Ook Tartaglia ziet de eerste twee fasen als gedwongen bewegingen, maar hij beweert dat gedwongen bewegingen niet rechtlijnig zijn maar gekromd door de voortdurende werking van de zwaarte. In zekere zin is hier sprake van een vermenging van natuurlijke en gedwongen beweging. Strikt genomen is volgens Tartaglia zelfs het eerste deel van de baan licht gekromd, zij het dat hier de kromming vrijwel onwaarneembaar is.

Hoewel sommige van de in Tartaglia's boek afgebeelde kogelbanen nauwelijks van een parabool te onderscheiden zijn, was



Afbeelding 1.3: De kogelbaan volgens Tartaglia.

hij in wezen mijlenver verwijderd van Galilei's analyse van de worpbeweging. Deze steunt op vier pijlers, die alle bij Tartaglia ontbreken: de traagheidswet, de valwet, de verwaarlozing van de luchtweerstand en ten slotte het inzicht in de wijze waarop de totale beweging wiskundig kan worden samengesteld uit de rechtlijnige traagheidsbeweging en de versnelde valbeweging.

Tartaglia's invloed op Galilei was echter niet alleen gelegen in zijn wiskundige behandeling van de ballistiek. In 1543, het verschijningsjaar van Copernicus' boek over de planetenbeweging, maakte hij de werken van de Griekse wiskundige Archimedes algemeen toegankelijk door de publicatie van vertalingen in het Latijn. Hoewel het werk van Archimedes niet geheel onbekend was in de Middeleeuwen, kreeg het pas in de zestiende eeuw serieuze aandacht van diverse geleerden. Tartaglia heeft in dit opzicht baanbrekend werk verricht. Archimedes zou voor Galilei dé grote leidman worden die hem hielp zich los te maken van het aristotelische gedachtegoed.

Het werk van Archimedes had, anders dan dat van Aristoteles, geen betrekking op de beweging. Zijn voornaamste werken die niet puur wiskundig waren hadden betrekking op mechanische problemen, die hij aan een volledig wiskundige behandeling onderwierp door verregaande abstractie en idealisering. In alle

gevallen ging het hier om de beschouwing van evenwichtssituaties, dat wil zeggen om situaties waar beweging geen rol speelde. Bekende voorbeelden zijn Archimedes' afleiding van de hefboomwet en zijn analyse van de opwaartse druk van vloeistoffen.

Het contrast tussen de geïdealiseerde wiskundige benadering van Archimedes en de meer fysische, oorzakelijke benadering van Aristoteles leidde ook tot inhoudelijke verschillen. In de benadering van Archimedes was het stijgen en dalen van lichamen in wezen een kwestie van verschillen in soortelijk gewicht, een wiskundige grootheid. De beweging werd niet bepaald door de natuurlijke neigingen van de verschillende in het lichaam aanwezige elementen om hetzij naar het middelpunt van de wereld, hetzij naar de maansfeer te bewegen. Benedetti, een leerling van Tartaglia, bekritiseerde al in 1553 op Archimedische gronden de Aristotelische stelling dat een grote kogel sneller valt dan een kleinere van hetzelfde materiaal.

1.5 Galileo Galilei: Pisa en Padua

Galileo Galilei werd geboren op 15 februari 1564 in Pisa, gelegen in het groothertogdom Toscane. Dit Italiaanse staatje werd indertijd geregeerd vanuit Florence door het vermaarde geslacht der Medici. Galilei's vader, Vincenzo Galilei, was een handelaar in stoffen en een professioneel musicus. Hij stuurde zijn zoon in 1581 naar de universiteit van Pisa om geneeskunde te studeren, opdat hij als arts de financiële zorgen van de familie wat kon verlichten. Maar de overwegend op klassieke auteurs gerichte opleiding beviel Galilei niet. Zijn interesse ging meer uit naar de wetenschap, en dat zou gedurende zijn gehele leven niet meer veranderen. Hij ging regelmatig naar Florence, waar hij wiskundelessen volgde bij Ostilio Ricci, een militair ingenieur en leraar aan de *Accademia del Disegno*. Deze wijdde hem in in het werk van Archimedes, die Galilei's voornaamste klassieke voorbeeld zou worden. In 1585 verliet hij de universiteit zonder een graad te hebben behaald.

In 1589 slaagde Galilei erin om via bemiddeling van zijn

invloedrijke vriend en beschermer Guidobaldo de leerstoel in de wiskunde in Pisa te bemachtigen – overigens een zeer mager gehonoreerde positie. Wiskunde werd aan de universiteiten gezien als een ambachtelijke discipline, verwant aan de techniek. Wiskundigen hielden zich immers bezig met vestingbouw, boekhouden, het bepalen van maten en gewichten en andere praktische zaken. Zowel qua maatschappelijke als qua wetenschappelijke status bleef een wiskundige ver achter bij een filosoof. Een hoogleraar wiskunde verdiende dan ook slechts een fractie van een hoogleraar filosofie.

Tijdens zijn hoogleraarschap in Pisa schreef Galilei een ongepubliceerd traktaat, getiteld ‘Over de beweging’. In dit werkje analyseerde hij in navolging van Benedetti de valbeweging in archimedische termen. Zo ontkende Galilei categorisch het bestaan van absoluut lichte voorwerpen: hij beweerde evenals de klassieke atomisten dat alle voorwerpen zwaar zijn. Aan Archimedes ontleende hij het inzicht dat opwaartse beweging het gevolg is van het feit dat het soortelijk gewicht van het omringende medium groter is dan dat van het voorwerp. Volgens Galilei was de valsnelheid van een voorwerp niet evenredig met het gewicht, maar met het *verschil in soortelijk gewicht* tussen voorwerp en medium. Eén van de consequenties van zijn beschouwing van de valbeweging was dat het niet langer ongerijmd was om te spreken van de val van een voorwerp in een lege ruimte. Galilei zag overigens wel in dat voorwerpen aanvankelijk versneld vallen, maar hij beschouwde die versnelling als een tijdelijk verschijnsel. Na verloop van tijd zou de snelheid constant worden, zoals duidelijk te zien was bij de val van lichte voorwerpen.

In hetzelfde manuscript vinden we de eerste aanzet tot het latere traagheidsbegrip. Galilei trachtte namelijk de aristotelische dichotomie tussen natuurlijke en gedwongen beweging te ondermijnen door de introductie van een derde soort beweging, die hij ‘neutrale’ beweging noemde. Het ging hier om bewegingen die noch neerwaarts (natuurlijk), noch opwaarts (tegennatuurlijk) waren: cirkelvormige bewegingen rond het middelpunt van de wereld. In dit verband merkte hij op dat de geringst denkbare kracht voldoende was om een dergelijke beweging tot stand te brengen.

In 1592 wist Galilei zijn positie te verbeteren door de leerstoel in Pisa te verruilen voor eenzelfde leerstoel in Padua, dat onderdeel was van de Venetiaanse republiek. De universiteit van Padua was toentertijd een van de meest prestigieuze van Europa. Toch bleef het honorarium aan de krappe kant. Dit woog des te zwaarder nu Galilei na de dood van zijn vader diens rol als hoofd van de familie had overgenomen, met alle daarbij horende financiële verantwoordelijkheden. Naast universitair wiskunde-onderricht gaf hij daarom ook privé-lessen in verwante vakken als fortificatie, militaire techniek en mechanica. Later zette hij nog een instrumentmakerij op, waarmee hij zijn inkomen meer dan verdubbelde.

Als hoogleraar wiskunde doceerde Galilei tevens astronomie. Zijn lessen waren volledig gebaseerd op het traditionele geocentrische wereldbeeld. Hoewel Copernicus zijn heliocentrische theorie reeds in 1543 had gepubliceerd, had de theorie tot dan toe niet veel stof doen opwaaien. De meeste astronomen zagen Copernicus' werk primair als een wiskundige theorie waaruit nauwkeurige astronomische tabellen konden worden afgeleid, niet als een serieuze poging om het aloude wereldbeeld aan te tasten.

Galilei raakte echter steeds meer doordrongen van de merites van Copernicus' wereldbeeld – niet zo zeer vanwege de astronomische consequenties ervan, als wel vanwege de aardse gevolgen. In deze tijd ontwikkelde hij namelijk zijn theorie over de getijdenbeweging. Volgens Galilei werd door de dubbele beweging van de aarde (de dagelijkse asrotatie en de jaarlijkse beweging rond de zon) elk deel van het aardoppervlak beurtelings versneld en afgeremd. Daardoor werd het water in de zeebekkens voortdurend heen en weer geslingerd. Deze periodieke beweging, die afhankelijk is van de positie op aarde en de vorm van het bekken, kennen wij als de afwisseling van eb en vloed.

In 1597 ontpopte Galilei zich in brieven voor het eerst als een onverholen copernicaan. In een brief aan de astronoom Kepler, een van de weinige openlijke aanhangers van Copernicus in die tijd, beweerde hij zelfs over talloze bewijzen te beschikken voor het copernicaanse systeem. Vermoedelijk was hier sprake van schromelijke overdrijving; ongetwijfeld dacht Galilei vooral aan

zijn getijdentheorie. Zijn leven lang bleef hij overtuigd van de juistheid van deze theorie en vooral van de onmogelijkheid om op een andere manier rekenschap te geven van de getijden. Keplers theorie, gebaseerd op een door de maan uitgeoefende aantrekking op het zeewater, verwierp hij als zijnde absurd.

Het probleem van de beweging bleef Galilei's aandacht houden. In 1602 hield hij zich intensief bezig met de beweging van slingers, en meer algemeen met de afdaling van lichamen langs cirkelbogen en koorden. In een brief van dat jaar probeert hij een sceptische Guidobaldo ervan te overtuigen dat de slinger-tijd onafhankelijk is van de uitwijking van een slinger. Mogelijk dateert zijn interesse voor versnelde beweging uit deze tijd.

In een brief van Galilei uit 1604 vinden we voor het eerst de correcte valwet, dat wil zeggen de evenredigheid tussen de valhoogte en het kwadraat van de tijd. Merkwaardig genoeg meende hij deze wet af te kunnen leiden uit de onjuiste veronderstelling dat de valsnelheid evenredig was met de valhoogte, een aanname die hem het meest eenvoudig en natuurlijk scheen. Vermoedelijk hield Galilei zich tevens bezig met de vraag naar de beweging van projectielen. Hoewel hij in deze tijd tal van experimenten verrichtte, in het bijzonder met slingers en met ballen die langs hellende vlakken bewogen, is de rol en betekenis van die experimenten onduidelijk. Weinig historici geloven dat deze experimenten de grondslag vormden voor zijn wiskundige theorieën. Anderzijds valt het standpunt van traditionele wetenschapshistorici, dat het hier louter om gedachte-experimenten ging, niet langer vol te houden.

De verschijning van een supernova in 1604 zorgde voor een onderbreking van Galilei's studie van de beweging. Dit opzienbarende verschijnsel leidde tot heftige discussies over de door Aristoteles gepredikte onveranderlijkheid van de hemelen. Galilei wijdde drie publieke lessen aan het verschijnsel, waarin hij onder meer beargumenteerde dat het hier inderdaad om een verandering in het 'bovenmaanse' gebied ging. Als copernicaan geloofde hij niet langer in een wezenlijk verschil tussen een ondermaans en een bovenmaans gebied. De aarde was een hemellichaam als alle andere.

In 1609 begon Galilei aan een systematische uiteenzetting over de beweging, waarin hij zijn studies over het hellende vlak en slingers wilde integreren met behulp van zijn nieuwe wet van versnelde beweging. Er zijn aanwijzingen dat hij de onvolkomenheden in zijn eerdere afleiding inzag. Hoe dit ook zij, het voorgenomen werk over de beweging zou nog decennia op zich laten wachten. In juli van hetzelfde jaar vernam Galilei geruchten over een nieuwe Hollandse vinding die het mogelijk maakte verafgelegen voorwerpen vergroot waar te nemen. Onmiddellijk zette Galilei zich aan de constructie van sterk verbeterde telescopen, die hij gebruikte voor astronomische waarnemingen. Onder de talrijke ontdekkingen die hij met dit nieuwe instrument deed, was die van de vier manen van Jupiter de meest opzienbarende. De plotse-linge faam die de astronomische ontdekkingen hem brachten, leverde Galilei een benoeming op als hofwiskundige en -filosoof in Florence.

1.6 De Florentijnse periode

Galilei's overstap naar het Toscaanse hof van de Medici betekende niet alleen een aanzienlijke verbetering van zijn maatschappelijke en financiële positie; het feit dat hij mede als filosoof werd aangesteld maakte hem meteen tot een volwaardige gesprekspartner voor de aristotelische filosofen aan de universiteiten. De mening van een wiskundige konden zij naast zich neer leggen als niet ter zake doende; in het geval van een tot de maatschappelijke elite doorgedrongen filosoof was dit niet langer mogelijk. De strijd- lustige Galilei raakte dan ook spoedig betrokken in verschillende controversen. De eerste betrof het drijven van lichamen. Hier verdedigde Galilei de positie van Archimedes tegen de aristotelische visie. Intussen ontving hij een traktaatje over zonnevlekken van de hand van de Jezuïet en astronoom Scheiner. In een aantal brieven, die hij in 1613 publiceerde, ondermijnde Galilei Scheiners stelling dat de zonnevlekken kleine planeten waren. Door te argumenteren dat het hier daadwerkelijk ging om veranderlijke processen die de zon zelf betroffen, ondermijnde Galilei het aristotelische

dogma van de volmaaktheid en onveranderlijkheid der hemellichamen. In zijn boek over de zonnevlekken schaarde Galilei zich voor het eerst publiekelijk en onomwonden achter het copernicaanse stelsel.

In december 1613 hoorde Galilei van theologische bezwaren tegen het copernicanisme die in zijn afwezigheid aan het Toscaanse hof waren geuit, vermoedelijk onder invloed van zijn tegenstanders. Hij schreef daarop een lange brief aan zijn informant, waarin hij theologische inmenging in puur wetenschappelijke kwesties veroordeelde. De theologen moesten hun bijbelinterpretaties maar aanpassen aan wetenschappelijke inzichten, vond hij. Nadat een priester in Florence het copernicanisme publiekelijk had veroordeeld, zond Galilei in 1614 een uitgebreide versie van zijn brief naar Rome. Het jaar daarop reisde hij – tegen het advies van zijn vrienden en de Toscaanse ambassadeur in – naar Rome om zijn naam te zuiveren en om een veroordeling van het copernicaanse stelsel te voorkomen.

In zijn eerste opzet slaagde hij volledig. Noch zijn copernicaanse propaganda in zijn boek over zonnevlekken, noch zijn gewaagde brief aan Rome leidden tot enige sancties. In zijn tweede opzet faalde hij echter. Paus Paulus v, geïrriteerd door de agitatie over de kwestie van bijbelse interpretaties – in die tijd een belangrijk punt van geschil met de protestanten –, benoemde een commissie die de theologische status van de aardse beweging diende vast te stellen. Het resultaat viel negatief uit voor Galilei. In 1616 werd hem opgedragen zijn copernicaanse positie te verlaten en deze niet langer te verdedigen. Zijn boeken werden echter niet verboden en ook tegen zijn persoon werden geen maatregelen genomen. Het boek van Copernicus zelf werd tijdelijk verboden, hangende de correctie van enkele passages.

Galilei keerde terug naar Florence en hield zich enige tijd met minder controversiële onderwerpen bezig, waaronder ook de bewegingsleer. Een Latijns traktaat waarin Galilei een correcte analyse geeft van eenparige versnelling en waarvan diverse passages grote overeenkomsten vertonen met zijn boek van 1638, dateert vermoedelijk uit deze tijd. In 1618 werd Galilei's werk aan de bewegingsleer voor de derde keer onderbroken door een ge-

beurtenis waardoor zijn aandacht naar de astronomie verschoof. Drie kometen brachten geleerd Europa in beroering, hetgeen resulteerde in een groot aantal pamfletten en boeken. Galilei mengde zich in 1623 in de discussie over de aard van de kometen: hij publiceerde zijn meest vermaarde polemische werk, *Il Saggiatore* getiteld. Dit werk werd opgedragen aan de nieuwe paus Urbanus VIII, een oude vriend en beschermer van Galilei die bij eerdere controversen als kardinaal de zijde van Galilei gekozen had.

In 1624 reisde Galilei naar Rome om daar zijn opwachting te maken bij de nieuwe paus. Aldaar kreeg hij toestemming van Urbanus om in een boek het copernicaanse stelsel te bespreken – op voorwaarde dat tevens recht zou worden gedaan aan de argumenten voor het oude geocentrische stelsel. De compositie van de *Dialoog over de twee voornaamste wereldsystemen* nam Galilei gedurende de volgende zes jaar volledig in beslag. Na enige moeilijkheden met de kerkelijke censuur werd het boek in 1632 gepubliceerd.

De publicatie van het boek werd onmiddellijk gevolgd door aanklachten en al spoedig werd uit de archieven van de inquisitie een twijfelachtig document uit 1616 opgevest, waarin het Galilei op straffe van opsluiting verboden werd om het copernicaanse stelsel te bespreken. Galilei werd in 1633 voor de inquisitie gedaagd en, ondanks de steun van een aantal bevriende kardinalen, gedwongen de copernicaanse ketterij af te zweren, waarna hij tot levenslange opsluiting werd veroordeeld. Zoals reeds eerder vermeld werd deze straf vrijwel onmiddellijk verzacht tot huisarrest. De *Dialoog* werd op de index van verboden boeken geplaatst.

1.7 Traagheid en val

Hoe belangrijk de *Dialoog* ook was voor de uiteindelijke doorbraak van het copernicanisme in Europa, zijn grootste belang ontleende het boek aan de nieuwe visie op beweging die hier wordt gepresenteerd. Deze visie hing nauw samen met de ontmanteling van een van de voornaamste argumenten tegen de beweging van de aarde. Volgens het copernicaanse systeem beweegt het aardop-

pervlak met enorme snelheden. Een steen die wordt losgelaten van een hoge toren zou daardoor enkele honderden meters van de voet van de toren moeten neerkomen, hetgeen volledig in strijd is met de waarnemingen.

Galilei's verweer tegen dit argument is gelegen in zijn nieuwe anti-aristotelische visie op beweging. Wanneer de steen aan de top van de toren wordt vastgehouden, beweegt hij mee met het aardoppervlak; eenmaal losgelaten volhardt de steen in deze horizontale beweging, waardoor hij uiteindelijk aan de voet van de toren neerkomt. Hetzelfde gebeurt volgens Galilei wanneer wij een voorwerp van de mast van een snel varend schip laten vallen. Ook dit voorwerp zal met de mast mee blijven bewegen en dus aan de voet van de mast neerkomen. Een beweging evenwijdig aan het aardoppervlak behoeft geen oorzaak om in stand gehouden te worden.

In de *Dialoog* laat Galilei de persoon die hij opvoert als zijn woordvoerder vragen wat er gebeurt met een op een hellend vlak geplaatste bal. Deze rolt met toenemende snelheid naar beneden, is het antwoord. Zou de bal ook omhoog kunnen rollen naar de uitgangspositie, is de daarop volgende vraag. Nee, tenzij de bal een aanvangssnelheid zou krijgen die in grootte overeenkomt met de snelheid waarmee de bal in het eerste geval de helling verlaat. Wat gebeurt er dan als we een volmaakt harde en ronde bal op een perfect horizontaal en volmaakt glad vlak een bepaalde snelheid geven, in de afwezigheid van enige luchtweerstand? Omdat er dan geen oorzaak voor versnelling of vertraging is, zou de beweging voortgaan zo ver het vlak zich uitstrekt, beaamt de aristotelische gesprekspartner. Als het vlak oneindig is, vraagt Galilei's woordvoerder ten slotte, zou dan de beweging niet eeuwigdurend moeten zijn? Het schijnt van wel, antwoordt daarop de verslagen aristoteliaan.

Kortom: beweging, althans beweging op een horizontaal vlak, behoeft geen oorzaak. Zoals Descartes het later samenvatte: men heeft altijd de verkeerde vraag gesteld met betrekking tot beweging. Men vroeg wat een voorwerp in beweging hield; de juiste vraag echter was wat ervoor zorgde dat de beweging uiteindelijk ophield. Achter deze nieuwe opvatting van de traagheid van

voorwerpen ging een nieuwe visie op beweging schuil. Volgens de aristotelische visie heeft beweging alles te maken met de essentiële natuur van voorwerpen, volgens Galilei daarentegen heeft beweging niets van doen met de aard van het voorwerp. Zoals hij keer op keer herhaalde: een voorwerp staat geheel onverschillig tegenover zijn bewegings- of rusttoestand. Er is geen principieel verschil tussen rust en beweging. Daardoor kunnen we met enorme snelheden bewegen zonder er iets van te merken. Voorzover verschillende lichamen eenzelfde beweging delen, zijn er geen merkbare consequenties en is het of de beweging niet bestaat. Alleen relatieve beweging ten opzichte van andere lichamen manifesteert zich in waarneembare gevolgen.

Weer verwijst Galilei naar het voorbeeld van een schip, dat vaart op een volmaakt gladde zee. In de vertrekken aan boord van het schip is niets te merken van de beweging van het vaartuig. Alle voorwerpen bewegen ten opzichte van een meebewegende waarnemer op exact dezelfde wijze als wanneer het schip stil zou liggen (vgl. par. 6.3).

Doordat beweging niets verandert aan de aard van een lichaam, kan een lichaam tegelijkertijd verschillende bewegingen ondergaan. Deze hinderen elkaar op geen enkele wijzen en kunnen worden gecombineerd tot een vloeiende curve. Reeds in de *Dialogo* analyseert Galilei de baan van een voorwerp dat van een hoge, met de aarde mee bewegende toren valt. De baan die Galilei construeert is hier nog een cirkelsegment. Al spoedig zag hij het gebrekkige van zijn wiskundige constructie in en verving hij de cirkel door een paraboolbaan (zie afbeelding 1.4).

Galilei's traagheidsbeweging (beweging van een voorwerp waarop geen kracht wordt uitgeoefend) is nooit de rechtlijnige beweging van Descartes, Huygens en Newton geworden (vgl. par. 3.1). Het bleef voor hem altijd een beweging over een bolvormig vlak evenwijdig aan het aardoppervlak. Deze cirkelvormige traagheidsbeweging loste niet enkel het probleem op dat wij niets merken van de asrotatie van de aarde, ze verklaarde tevens de baanbeweging van de hemellichamen. Keplers fundamentele aantasting van de cirkelvormige planetenbeweging was aan Galilei niet bevestigd. Galilei's wereld was niet het oneindige, abstracte en onper-

soonlijke universum van de mechanische filosofen die hem volgden, maar nog veeleer de geordende kosmos van zijn voorgangers en tijdgenoten. En slechts de cirkelbeweging verdroeg zich met die harmonische orde.

Ook in een ander opzicht stond Galilei nog met één been in de traditie. Hij heeft zich nooit geheel losgemaakt van het aloude impetusbegrip. De neiging tot volharding in een bewegingstoestand bleef hij zien als een gevolg van een in het voorwerp aangebrachte impetus. Hoewel zijn impetusbegrip niet geheel identiek is aan dat van de middeleeuwen en soms zelfs lijkt te figureren als maat voor de hoeveelheid beweging, neigt ook Galilei nog naar de visie van een kracht die geassocieerd is met een bewegend lichaam, die het lichaam doet voortbewegen. Zoals we zullen zien was dit een tamelijk hardnekkige intuïtie, waarvan zelfs Newton zich niet geheel los kon maken.

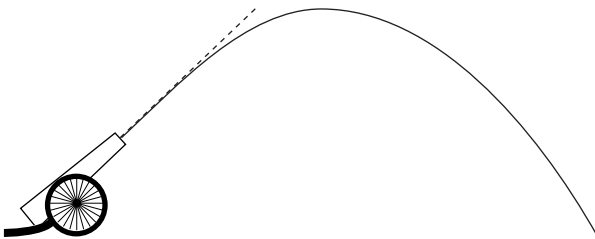
1.8 Wiskundige principes

Tijdens zijn gedwongen verblijf in zijn villa dichtbij Florence vond Galilei eindelijk de tijd om zijn lang gekoesterde project over de bewegingsleer te voltooien. Dit werd het boek over de ‘twee nieuwe wetenschappen’. Niet langer probeerde Galilei de bewegingsleer te versmelten met de hydrostatica van Archimedes: ze kreeg nu een eigen fundament. Centraal stond Galilei’s analyse van de eenparige beweging en de eenparig versnelde beweging, de laatste toegepast op het probleem van de vrije val. We vinden hier de tegenwoordig als correct bekend staande verbanden tussen afstand, versnelling, snelheid en tijd. Galilei motiveerde de afleiding van zijn valwet met overwegingen op basis van eenvoud: als een voorwerp valt, verandert er niets aan dat voorwerp en ook het ‘bewegingsprincipe’ (de zwaarte) blijft gelijk. Waarom zouden dan niet ook alle andere factoren in de beweging gelijk blijven? Aangezien de ervaring leert dat de beweging voortdurend toeneemt, is het noodzakelijk de uniformiteit niet te zoeken in de beweging zelf, maar in de toename van die beweging, dat wil zeggen in de versnelling.

In het boek wordt een belangrijke plaats ingeruimd voor een analyse van de slingerbeweging en de beweging langs een hellend vlak. Zo vinden we hier de relatie tussen de periode en de lengte van de slinger. Een ander belangrijk inzicht is de stelling dat de uiteindelijke snelheid van een dalend voorwerp enkel afhangt van het hoogteverschil tussen begin- en eindsituatie en niet van het specifieke traject. Dit resultaat gebruikt Galilei om zijn valwet met experimentele argumenten te ondersteunen. Zo beschrijft hij een situatie waarbij een metalen bal langs een gootje onder een flauwe helling naar beneden rolt als een praktisch realiseerbare methode om het kwadratische verband tussen afstanden en tijden te toetsen.

In het laatste deel van zijn boek construeert Galilei de parabolische baan van projectielen, door een uniforme horizontale beweging te combineren met een eenparig versnelde valbeweging. Daarnaast leidt hij een aantal resultaten af voor projectielen die onder een hoek worden afgeschoten. Zo bewijst hij dat de grootste horizontale afstand wordt afgelegd als een kogel wordt afgevuurd onder een hoek van 45 graden. Zelfs de heftige, gewelddadige beweging van een kanonskogel conflicteert op geen enkele wijze met de natuurlijke valbeweging. Uiteindelijk overwon Galilei's wiskundige conceptie van de natuur de dichotomieën die eeuwenlang het fysische denken over beweging gedomineerd hadden.

Voor Galilei was de wereld om ons heen niet de aristoteli-



Afbeelding 1.4: Parabolische kogelbaan, zoals Galilei die afleidde.

sche, kwalitatieve wereld van ontstaan en vergaan, maar een wereld geregeerd door diepere, voor het oog onzichtbare principes. Het boek der natuur is geschreven in een code, zo zei hij, en de sleutel tot die code is de wiskunde. Achter de concrete wereld die zich dagelijks aan onze zintuigen voordoet, ligt een diepere wereld, waarin geen weerstand bestaat, waarin vlakken perfect vlak zijn, bollen volmaakt hard en rond, en bewegingen eeuwigdurend. Deze geschetste wereld vertoont opmerkelijke overeenkomsten met de wereld van de moderne natuurkunde.

Veelal wordt het contrast tussen Galilei en zijn aristotelische tegenstanders beschreven als een conflict tussen de moderne wetenschapper die het primaat legt bij de zintuiglijke waarneming en de traditionele rationalisten die kennis ontlenen aan logische afleidingen. Deze visie onderschat enerzijds de mate waarin de aristotelische natuurfilosofie geworteld was in directe zintuiglijke informatie, wat ook tot uiting komt in het aristotelische dogma dat alle kennis ons eerst via de zintuigen bereikt; anderzijds miskent dit beeld het primaat dat Galilei legt bij de wiskunde als hoogste vorm van rationaliteit.

In zijn *Dialog* is het veelal de aristoteliaan die zich beroept op empirische ondersteuning. Galilei's eigen woordvoerder verkiest menigmaal de rede boven de zintuigen. Zo spreekt hij zijn grenzeloze bewondering uit voor de copernicanen, die door logisch nadenken in staat zijn schijnbaar vanzelfsprekende noties – zoals dat de zon om de aarde zou draaien – te overwinnen:

Zij hebben door enkel de kracht van hun intellect hun zintuigen zodanig geweld aangedaan dat zij de voorkeur gaven aan wat de rede hun vertelde boven datgene wat de zintuiglijke ervaring hun in strijd daarmee duidelijk toonde.

Evenzo zegt hij over zijn stelling dat een van de top van de mast van een varende schip losgelaten steen precies aan de voet van de mast zal belanden:

Zonder experiment weet ik zeker dat het precies zo zal gebeuren als ik het je vertel, want het *moet* op die manier gebeuren.

Waar Galilei aan experimenten refereert, zijn het doorgaans ofwel gedachte-experimenten, of experimenten die tot doel hebben zijn langs rationele weg verworven inzichten te ondersteunen. Anders dan voor sommige latere Britse experimentatoren, zoals Boyle, hadden experimenten voor Galilei niet de rol van bronnen voor nieuwe inzichten over de natuur. Daarmee is niet gezegd dat zij een verwaarloosbare rol spelen in Galilei's wetenschap, maar wel dat het voorbarig is om Galilei te verheerlijken als de vader van het moderne wetenschappelijke experiment.

1.9 Epiloog

Galilei's invloed op een volgende generatie natuurwetenschappers was enorm. Dat gold niet alleen voor Italiaanse volgelingen als Torricelli en Cavalieri. Ook wiskundig georiënteerde natuuronderzoekers in Noord-Europa zoals Huygens en Newton bouwden voort op de door hem gelegde fundamenten. De door Galilei gecreëerde bewegingsleer werd door hen verder uitgewerkt en geperfectioneerd. Huygens' analyse van elastische botsingen – een onderwerp waar Galilei zijn tanden op had stukgebeten – en van de slingerbeweging (zie par. 2.1) resulteerde in een reeks botsingswetten, in het principe van behoud van 'levende kracht' (het product van de massa en het kwadraat van de snelheid, tegenwoordig de maat voor de bewegingsenergie) en in de wiskundige uitdrukking voor de centrifugale kracht.

De kroon op het werk leverde Newton. In zijn in 1687 gepubliceerde *Wiskundige beginselen der natuurfilosofie* (de *Principia*, zie par. 3.1 e.v.) presenteerde hij in grote lijnen de klassieke mechanica zoals wij die vandaag de dag nog steeds leren en gebruiken. Newtons bewegingsleer bouwde voort op de door Galilei aange-reikte wiskundige grondslag. Maar Newton voegde daar een belangrijk element aan toe: de op een lichaam inwerkende kracht als oorzaak van de verandering van de bewegingstoestand van dat lichaam.

Het koppelen van kracht aan versnelling was niet simpelweg een logische consequentie van het nieuwe traagheidsprinci-

pe. Het druiste in tegen de intuïtie en vereiste een tweede conceptuele stap die nauwelijks geringer was dan de eerste. Bovendien vereiste het de introductie van een wiskundig krachtbegrip, waarin uiteenlopende zaken als gewicht, botsing en aantrekking onder één noemer konden worden gebracht. Deze *tour de force* begon bij de leerlingen van Galilei en werd (vrijwel) voltooid door Newton. Zo onderscheidde Newton gewicht van massa, waarbij massa een maat werd voor de hoeveelheid materie en gewicht een maat voor neerwaartse de kracht die die massa ondergaat op het oppervlak van de aarde.

Lange tijd is Galilei door wetenschappers en historici beschouwd als de aartsvader van de moderne wetenschap, omdat hij eigenhandig een breuk met de traditie zou hebben geforceerd en het moderne wetenschappelijke denken zou hebben ingevoerd. Tegenover deze wijd verbreide visie stond de iconoclastische visie van Duhem, die beweerde dat Galilei goed beschouwd weinig had toegevoegd aan de revolutionaire denkbeelden van enkele veertiende-eeuwse Parijse geleerden. Beide posities lijken niet langer houdbaar. Duhems Parijzenaren waren minder modern en vooral minder invloedrijk dan hij suggereerde. Maar ook Galilei was minder modern dan veelal gesuggereerd werd. Het is naïef om te veronderstellen dat de enorme breuk met de traditie die zich in de zestiende en zeventiende eeuw voltrok, door één enkele persoon teweeg kon worden gebracht.

Wel kunnen we stellen dat van alle begripsmatige tussenstappen in die periode, die van Galilei de meest belangrijke en ingrijpende was. Hij droeg meer dan enig ander bij aan de ondermijning van de traditionele dichotomieën tussen zware en lichte voorwerpen, tussen natuurlijke en gedwongen beweging en tussen aardse en hemelse processen. Hij gaf de bewegingsleer een stevige positie binnen de wiskunde, waar beweging lange tijd primair als een onderdeel van de filosofie was beschouwd, en creëerde aldus een nieuwe tak van wetenschap. Bovenal gaf hij een geheel nieuwe invulling aan de interpretatie van beweging. Ten slotte isoleerde hij de probleemgebieden – zoals de slingerbeweging, beweging langs een hellend vlak en botsingsprocessen – aan de hand waarvan latere wetenschappers als Descartes, Huygens en

Newton hun innovatieve concepten zouden ontwikkelen.

Door de grondslag te leggen voor een nieuwe bewegingsleer, legde Galilei tevens het fundament voor een nieuwe natuurkunde. Niet alleen omdat de bewegingsleer een essentiële rol vervult in de latere natuurkundige theorieën, maar ook omdat Galilei als eerste overtuigend aantoonde dat naast de harmonische hemelse processen ook aardse processen tot op zekere hoogte onderhevig zijn aan wiskundige regelmaat. Gezien de enorme rol die de wiskunde zou spelen in latere natuurkundige theorieën, kan het precedent van Galilei nauwelijks overschat worden.

Aanbevolen literatuur

De meest gedetailleerde en grondige studie van de bewegingsleer van Aristoteles tot en met Galilei is nog steeds E.J. Dijksterhuis, *Val en worp: een bijdrage tot de geschiedenis der mechanica van Aristoteles tot Newton* (Groningen, 1924). Eveneens lezenswaardig is zijn qua thematiek bredere *De Mechanisering van het wereldbeeld* (Amsterdam, 1950). Een recente en toegankelijke biografie van Galilei is: M. Sharratt, *Galileo: Decisive innovator* (Oxford, 1994). Zowel Galilei's *Dialogo over de twee voornaamste wereldsystemen* als zijn *Gesprekken over twee nieuwe wetenschappen* zijn in het Engels vertaald: *Dialogue concerning the two chief world systems – Ptolemaic and Copernican* (Berkeley, 1974) en *Two new sciences: including centers of gravity and force of percussion* (Madison, 1974).

Een goed overzicht van de ontwikkeling van de natuurwetenschappen (waaronder de bewegingsleer) van de Oudheid tot en met de Middeleeuwen biedt D. Lindbergh, *Pioniers van de Westerse wetenschap* (Amsterdam/Meppel, 1995). R. Vermij, *De wetenschappelijke revolutie* (Amsterdam, 1999) is een beknopte, leesbare en gedegen verhandeling over de stroomversnelling waarin de Westerse wetenschap in de zestiende en zeventiende eeuw geraakte. Een uitgebreide analyse van de talloze geschriften over dit proces biedt H.F. Cohen, *The scientific revolution: A historiographical inquiry* (Chicago, 1994).



2

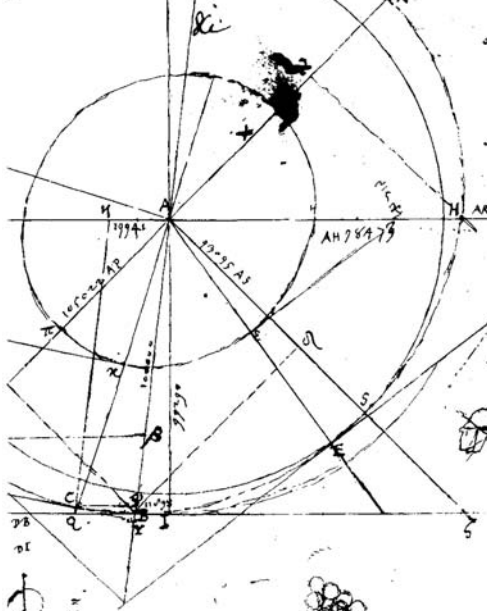
*Christiaan Huygens en de
mechanica van het licht*

Fokko Jan Dijksterhuis

‘ΕΥΡΗΚΑ,’ noteerde Christiaan Huygens op 6 augustus 1677 in zijn aantekeningenboek, ‘causam mirae refractionis in Crystallo Islandica.’ ‘Ik heb het gevonden! De oorzaak van de vreemde breking in IJslands kristal.’ De rest van de betreffende bladzijde is gevuld met meetkundige schetsen, berekeningen en een enkele toelichtende zin. Samen vormen ze de oplossing van een probleem dat hem sinds 1672 dwars had gezeten: de breking van lichtstralen in zogeheten IJslands kristal sprak zijn ideeën over de aard van licht tegen. Het was een lastige puzzel gebleken, maar op deze zesde augustus had hij de oplossing gevonden. Een doorbraak dus, en Huygens begroette die zoals gebruikelijk met een triomfantelijk ‘Eureka’.

Ook wij beschouwen Huygens’ vondst van 6 augustus 1677 als een doorbraak, maar om een geheel andere reden. Waar hij de oplossing van een lastige puzzel zag, zien wij een nieuwe manier om de aard en eigenschappen van licht te bestuderen. Volgens Huygens bestond licht uit golfjes in een zee van minuscule, onzichtbare deeltjes. Zo’n mechanistische opvatting, waarbij natuurverschijnselen verklaard worden in termen van deeltjes in beweging, was vrij gangbaar in die tijd. Minder gangbaar was het om zo’n model een wiskundige vorm te geven (zie par. 1.1). En

parallel. BA. Ergo prop. Ge. XA, HA, GA
 1. 2. 3. prop. Ge. AX, XV, XZ.
 Ergo $XZ \perp AO \perp AG$ in q. XV in MA
 ad q. HA. in q. MA, in KA, HA in l. 2.
 4. KA. Ergo $AG \perp AO \perp AR \perp AK$
 $\perp AO \perp AP$ (sicut in q. HM) in MN $\perp NA$
 in KA $\perp AH$ in RA. Ergo X axis
 $AG \perp AT$ in AR $\perp AH$ in q. AH $\perp AK$.



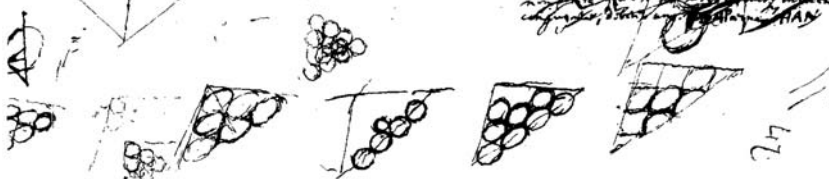
ΕΥΡΗΚΑ 6 Aug. 1677.
 Causa mirae refractionis
 in Crystallo Islandica.

- AC radius in tra. pariterans.
- AB refractio in dy. pupabulanti
- AS axis anguli solidi obtusi.
- AP pup. in AS, axis Ellipticus, sicut
 spheroidis, tangens BD in B.
- Bp, Bq pup. in AP, AS.
- AP pup. in q. Ax. AD. Nam AS
 multi prop. uter AS, AS.
- XM parallela tangens in C. ML par. AC
- K ang. ML in v. h.

Q. The upper lens in
 surface spheric. axis
 radius ML, ad. ut
 crystalli fuerit spheroidis
 TXX in tra. PCH.

ut ML $\perp AH$ in KA, HA.
 sicut AE (dista ad contactu KE)
 refractio in dy. max. spheroidis
 MA. ut in minor. spheroidis parva
 XA' axis. L' in tra. AE d' d' d' d'
 ut XE.

Vid. in AH \perp ~~AE~~ \perp ~~AE~~
 hunc max. refractio in minor. spheroidis
 ad. ut in minor. spheroidis spheroidis
 ad. hanc. Ellipticus AG
 max. refractio in BA, A' in tra. spheroidis
 contactu, sicut in spheroidis HAN



Afbeelding 2.1: Pagina uit het aantekeningenboek van Huygens met zijn ontdekking van 6 augustus 1677.

dat is precies wat Huygens had gedaan. Hij had zijn golftheorie van licht in een wiskundige vorm gegoten en kon zo de zichtbare eigenschappen van lichtstralen langs wiskundige weg afleiden. Op die zesde augustus deed hij dat voor de vreemde breking in IJslands kristal.

Huygens koppelde daarmee twee kanten van de optica die tot dan toe gescheiden waren gebleven: de wiskundige beschrijving van het gedrag van lichtstralen en de mechanistische verklaring van de aard van licht. Als eerste paste hij de precisie van de wiskunde toe op de onwaarneembare wereld van deeltjes in beweging. Een doorbraak, maar van een andere orde dan het oplossen van een lastige puzzel. Huygens vond een nieuwe vorm van optica uit. Daarmee verwierf hij zich definitief een plaats in de geschiedenis van de natuurwetenschap.

2.1 Een onwaarschijnlijke vernieuwer

Merkwaardig genoeg lag het helemaal niet voor de hand dat juist Christiaan Huygens een dergelijke vernieuwing tot stand zou brengen. Als wetenschapper had hij weliswaar het een en ander op zijn naam staan: de uitvinding van het slingeruurwerk, de ontdekking van een maan bij Saturnus en de verklaring van het merkwaardige voorkomen van die planeet. Maar dat waren allemaal bijdragen aan de wiskundige wetenschap. (Astronomie en mechanica werden in die tijd beschouwd als onderdeel van de wiskunde.) Met de mechanistische aard der dingen had Huygens zich nooit zo bezig gehouden. Tot rond 1670 was hij in zijn optische werk met een grote boog om vragen rond de verklaring van lichtverschijnselen heen gelopen. En juist op dat vlak deed hij in 1677 iets nieuws.

Christiaan Huygens was een briljant wiskundige, die al op zeventienjarige leeftijd door een correspondent van zijn vader werd vergeleken met de grote Griekse wiskundige Archimedes. Vader Constantijn, de dichter en diplomaat, noemde zijn tweede zoon, geboren op 14 april 1629, sindsdien 'mon Archimede'. Christiaan

zelf gebruikte zijn leven lang het archimedische ‘ΕΥΡΗΚΑ’ bij belangrijke ontdekkingen.

In 1649 had hij zijn studie afgerond en zijn eerste publicatie op zijn naam gebracht, een bijdrage aan de Latijnse editie van Descartes’ traktaat over de analytische meetkunde, bezorgd door Huygens’ leermeester Frans van Schooten jr. In de volgende jaren volgden er nog tal van wiskundige studies, over de oppervlakte ingesloten door cirkels en andere krommen, over de kansrekening. Maar ook schreef Huygens over meer fysische onderwerpen zoals drijvende lichamen en botsingen. In 1652 corrigeerde hij Descartes’ wetten van de botsing. Hij publiceerde zijn nieuwe – en juiste – wetten echter niet, zoals hij zijn leven lang maar weinig daadwerkelijk publiceerde.

Grote en internationale faam verwierf hij tussen 1656 en 1659. Het begon met de bekendmaking van een ontdekking die hij in 1655 had gedaan: ook de planeet Saturnus had een maan. Titan, zoals Huygens de maan doopte, was het eerste nieuw ontdekte hemellichaam sinds de manen van Jupiter die Galilei vijftig jaar eerder had ontdekt. Het pamflet over de ontdekking bevatte ook een anagram waarin zijn tweede ontdekking verstopt zat. De vreemde uitstulpingen aan Saturnus die Galilei als eerste gezien had en die astronomen sindsdien voor raadsels hadden gesteld, waren volgens Huygens de uiteinden van een ring rond de planeet. In 1659 publiceerde hij de oplossing van zijn anagram, samen met een uitgebreide astronomische verhandeling over de planeet, zijn manen en de ring: *Systema saturnium*.

In de tussentijd had Huygens nog een opzienbarend geschriftje uitgegeven. *Horologium* heette het kortweg en het ging over een klok. In 1656 had hij een manier gevonden om een uurwerk met een slinger te reguleren. Dat een slinger een uiterst regelmatige beweging uitvoert, was al bekend. Ook het idee om een uurwerk met een slinger te reguleren was niet nieuw. Maar Huygens was de eerste die de praktische oplossing vond. Daarmee bouwde hij de eerste klok die echt nauwkeurig was. ‘De uitvinder van de seconde’ is hij wel eens genoemd. De regelmaat van de slingerklok was groot, maar niet volmaakt. Galilei had al aangegeven dat een slinger een zeer stabiele tijdmetende is, maar in tegen-

stelling tot wat hij dacht (zie par. 1.5), verandert de slingertijd wel enigszins als de uitwijking van een slinger kleiner wordt. Huygens bedacht nu dat de baan van de slinger iets aangepast moest worden, opdat de slingertijd bij elke uitwijking gelijk blijft. Door de slinger tussen ‘wangetjes’ op te hangen maakte hij die iets korter bij grotere uitwijkingen. Op die manier blijft de slingertijd constant ook wanneer de slinger steeds minder ver heen en weer zwaait. Heel mooi, maar voor een perfect isochrone slinger moet je precies weten welke vorm de wangetjes moeten hebben. En dat wist Huygens nog niet.

In dezelfde tijd bestudeerde hij de zwaartekracht – om precies te zijn: de grootte van de versnelling van de zwaartekracht (vgl. par. 1.5 en 1.8). Huygens wilde weten over welke afstand een voorwerp in één seconde valt. Experimenteel kwam hij er niet uit, ondanks zijn precieze klok. Hij gooide het daarom over een andere boeg: hij begon een wiskundige analyse van het probleem. Dat deed hij door te kijken naar de versnelling van een voorwerp dat ronddraait. De details laat ik voor wat ze zijn, maar de studie leverde nogal wat op. Huygens ontwikkelde een theorie van centrifugale versnelling. In 1659 vond hij een antwoord op de vraag welke vorm de wangetjes van zijn slingerklok moesten hebben. Hij bewees dat het een stukje van een cycloïde moest zijn; dat is de kromme die het ventiel van een fietswiel ongeveer volgt. Wangetjes met de vorm van een cycloïde zouden ervoor zorgen dat de baan van de slinger ook een cycloïde was. En die baan, kon Huygens nu bewijzen, is isochroon: de slinger heeft bij elke uitwijking dezelfde slingertijd. Het duurde nog bijna vijftien jaar voordat Huygens (een deel van) zijn vindingen over slingers publiceerde. Dat deed hij in 1673 en het werkje heette *Horologium oscillatorium*. Het is een hoogtepunt van de zeventiende-eeuwse wiskunde.

Dit werk onderstreepte Huygens’ status als grootste wiskundige van Europa. Die status had hij in 1666 verzilverd door de uitnodiging te aanvaarden om in Parijs een nieuw op te richten genootschap voor te zitten, een academie van de wetenschappen voor Lodewijk xiv. Als hij de mogelijkheid had gehad, was Huygens misschien liever naar Londen gegaan, want het geleerde klimaat daar kon hij meer waarderen. De Britten, zo had hij op zijn

reizen ervaren, hadden dezelfde praktische instelling als hij. De Fransen waren beschouwelijker van aard en hadden de neiging te verzanden in oeverloos gefilosofeer. En speculaties over de aard der dingen zijn in Huygens' oeuvre vóór 1670 opvallend afwezig. In de optica is dat nog het duidelijkste. Hoewel hij zich in zijn onderzoek van telescopen intensief bezighield met de breking van lichtstralen door lenzen, besteedde hij niet de minste aandacht aan de oorzaak van breking en de aard van licht.

De Christiaan Huygens die in 1666 naar Parijs ging, had een uitgesproken voorkeur voor concrete wiskundige vraagstukken die hij vaak koppelde aan praktische vragen met betrekking tot wetenschappelijke instrumenten. Hij was de vergelijking met Archimedes waardig, maar tamelijk orthodox en nauwelijks geïnteresseerd in niet-wiskundige onderwerpen. Hij hield zich niet bezig met de mechanistische aard van de dingen, en niets in zijn werk tot 1670 doet vermoeden dat hij juist op dat terrein een ingrijpende vernieuwing tot stand zou brengen.

In 1672 zorgde een merkwaardig lichtverschijnsel ervoor dat Huygens geïnteresseerd raakte in de mechanistische aard van licht, wat uiteindelijk vijf jaar later zou leiden tot een geheel nieuwe aanpak van de studie van licht. Dat lichtverschijnsel was de vreemde breking in IJslands kristal.

2.2 Het probleem van de vreemde breking

In 1672 leefde 'mon Archimede' als vermaard geleerde in Parijs. Zijn boek over klokken en slingertheorie was zo goed als af en dat jaar begon hij aan een boekje over de telescoop, het andere instrument waarmee hij faam had verworven. Een theorie van lenzen had hij al in 1653 uitgewerkt. Zo'n theorie behoorde tot de *dioptrica*, de tak van de optica waarin men de breking van lichtstralen behandelde (weerkaatsing was het onderwerp van de *catoptrica*). Huygens' werk op dat gebied was zeker de moeite van het publiceren waard. Hij had als eerste exacte formules afgeleid voor de brandpuntsafstanden van lenzen en bijvoorbeeld de bekende lensformule bewezen.

In *Systema saturnium* had Huygens al opgemerkt dat hij een dioptrica had, maar ondanks aandringen van verschillende correspondenten was hij nog altijd niet aan publicatie toegekomen. De reden voor uitstel was wellicht dat hij in de verbetering van de telescoop nog niet zo'n vooruitgang had geboekt als bij de klok. Hij had een paar verbeteringen aangebracht, zoals een diafragma en een samengesteld oculair die de kwaliteit van de beelden verhoogden en een micrometer die precisiewaarnemingen mogelijk maakte. Een perfecte telescoop, waarin de beperkingen van gewone lenzen ondervangen werden zoals cycloïdale wangetjes dat deden voor gewone slingers, had hij echter nog niet gevonden. Hij had wel een ontwerp, maar dat werkte nog niet naar behoren. Desalniettemin zette Huygens zich ertoe de lenzentheorie, waarnaar zijn tijdgenoten al zo lang uitkeken, publicatierijp te maken.

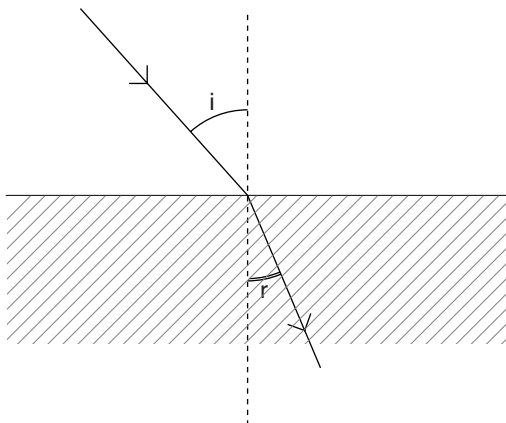
In het najaar van 1672 – dat is althans de datering die volgens mij het meest waarschijnlijk is – maakte Huygens een opzet voor het boekje dat hij in gedachten had: 'Projet du Contenu de la Dioptrique'. (Sinds Huygens in Parijs woonde, schreef hij behalve in het Frans ook in het Latijn over wetenschap.) De opzet bevat een hoofdstukindeling en wat opmerkingen over de inhoud. Die beantwoordt grotendeels aan de verwachtingen die een tijdgenoot van een boekje over de dioptrica zou hebben: een inleidende historische beschouwing over de theorie en praktijk van lenzen, een uitleg van de wet van breking (de voornaamste grondslag van de theorie), en de theorie zelf, waarin wordt uitgelegd hoe lenzen en combinaties daarvan scherpe, vergrote beelden produceren.

Eén kopje springt er echter uit omdat het niets met lenzen of telescopen te maken lijkt te hebben: het derde hoofdstuk heet 'Cristal d'Islande'. IJslands kristal was een exotisch materiaal waarvan met de beste wil van de wereld geen lenzen te slijpen waren. Waarom wilde Huygens in een boekje over lenzentheorie een hoofdstuk wijden aan een materiaal met slechts curiositeitswaarde? Een antwoord geeft het 'projet' niet. Daarin vind je slechts één losse opmerking: 'Moeilijkheid van het kristal of talk van IJsland.' Uit de plaats van dat zinnetje kan afgeleid worden dat IJslands kristal een probleem opwierp voor de verklaring van de

wet van breking die Huygens in het voorafgaande hoofdstuk wilde behandelen. Een probleem dat hij, zo zal blijken, eerst wilde oplossen voor hij zijn *Dioptrique* afmaakte.

De brekingseigenschappen van IJslands kristal hadden Huygens' aandacht kort daarvoor getrokken. In de zomer van 1672 waren in Parijs enkele stukken van het kristal aangekomen, alsmede een boekje waarin het uiterlijk en de eigenschappen uitgebreid werden besproken: *Experimenta crystalli islandici disdiacastici*. Het was in 1669 geschreven door de Deense wiskundige Erasmus Bartholinus. De Deense koning Frederik had in 1667 enkele stukken kristal uit IJsland laten halen om die een plaats te geven in zijn rariteitenkabinet. Het kristal en zijn merkwaardige eigenschappen waren al langer bekend – er bestaan vermoedens dat de Vikingen het gebruikten bij de navigatie. Bartholinus was echter de eerste die er zijn geleerde gedachten over liet gaan. Aan zijn interesse voor het exotische materiaal koppelde Bartholinus een wiskundige blik. Hij vergeleek de eigenschappen van het kristal met de toenmalige kennis op het gebied van de optica en zag dat lichtstralen zich in het kristal niet volgens de bekende wetten van de optica gedroegen.

In de eerste plaats was er sprake van een dubbele breking (daar slaat het woord 'disdiacastici' in de titel op): een lichtstraal die in het kristal valt, wordt opgesplitst in twee stralen. Door het kristal zie je voorwerpen dus dubbel. Zo'n dubbele breking vertonen wel meer kristallen, maar met IJslands kristal is nóg iets bijzonders aan de hand: één van de brekingen is onregelmatig. Voor breking van lichtstralen geldt de sinuswet (zie afbeelding 2.2). Deze wet was aan het begin van de zeventiende eeuw ontdekt en werd beschouwd als een belangrijke doorbraak in de optica. En nu, nog geen halve eeuw later, werd er een brekingsverschijnsel ontdekt dat de sinuswet niet volgde! Wanneer je bijvoorbeeld een stukje kristal plat op een beschreven bladzijde legt en je kijkt er van recht erboven doorheen, zie je de tekst dubbel. Volgens de sinuswet zou dat niet mogen: wanneer lichtstralen loodrecht door een oppervlak gaan, worden ze niet gebroken. Hier is dat wel het geval: een loodrecht invallende lichtstraal wordt wel gebroken



Afbeelding 2.2: Breking van een lichtstraal die van een minder dicht naar een dichter medium gaat. De sinus van de hoek van inval i en de sinus van de hoek van breking r staan in een vaste verhouding tot elkaar, die afhankelijk is van het materiaal.

door het kristal. Een merkwaardige eigenschap; Bartholinus sprak dan ook van een vreemde breking.

Huygens vond de vreemde breking van IJslands kristal niet alleen interessant vanwege de tegenspraak met de sinuswet, maar vooral doordat deze een probleem vormde voor zijn *verklaring* van die sinuswet. Die verklaring had hij niet zelf bedacht maar overgenomen van een Parijse kennis van hem, de jezuïetenpater Ignace-Gaston Pardies. Die stelde zich licht voor als golven in een zee van onmetelijk kleine deeltjes, de ether (vgl. par. 1.2, 3.6, 4.7 en 6.1). Wanneer die golven van bijvoorbeeld lucht naar glas bewegen, verandert hun voortplantingssnelheid. Met behulp van enkele veronderstellingen over het gedrag van zulke golven kon Pardies de sinuswet van de breking verklaren. Een typisch voorbeeld van een *mechanistische* verklaring, want licht en breking worden helemaal uitgelegd in termen van deeltjes in beweging.

Het grote voorbeeld was daarbij de Franse filosoof René Descartes, die uiteen had gezet hoe de hele natuur begrepen kan

worden als een groot samenspel van bewegende deeltjes (zie par. 3.5). Descartes was degene geweest die in 1637 als eerste de sinuswet gepubliceerd had. Hij had de wet tien jaar eerder ontdekt – daarin overigens voorgegaan door Thomas Harriot en Willebrord Snel, maar die hadden hun vinding niet bekend gemaakt. Descartes gaf er ook een mechanistische verklaring bij: licht gedraagt zich bij breking als een bal die in het water geslagen wordt. In werkelijkheid was licht volgens hem echter niet bal-achtig, maar te beschouwen als een *druk* van een lichtbron op het medium. Hij vergeleek de werking van licht met de manier waarop je met een blindenstok een voorwerp voelt. Zonder verder bewijs stelde Descartes dat die druk dezelfde regels volgt als bewegende ballen, vandaar dat hij meende zijn verklaring van breking in termen van ballen te kunnen geven.

Descartes' verklaring van de breking werd door vrijwel niemand overgenomen, maar zijn manier van verklaren was wel zeer invloedrijk. Een beetje geleerde die rond 1670 over de aard der dingen nadacht, deed dat door zich voor te stellen wat voor deeltjes op welke manier zouden moeten bewegen om een bepaald verschijnsel te verklaren. Pardies deed dat met zijn golven voor licht.

Huygens was ook een overtuigd mechanistisch denker: alleen met die benadering was volgens hem begrijpelijke wetenschap mogelijk, schreef hij later in *Traité de la lumière*. Wat licht betreft bleven er nog verschillende mogelijkheden over. Van het idee dat licht bestaat uit lichtdeeltjes die door de ruimte vliegen, moest Huygens niets hebben. Dan zouden lichtstralen elkaar niet ongehinderd kunnen kruisen en zouden twee mensen elkaar dus niet in de ogen kunnen kijken. Pardies' golven vond hij veel aannemelijker. Dat idee was niet nieuw. De Engelsman Robert Hooke had bijvoorbeeld in 1665 in zijn *Micrographia*, een prachtig geïllustreerd boek over microscoopwaarnemingen, een golftheorie van het licht uiteengezet. Huygens' aantekeningen in zijn exemplaar van *Micrographia* maken duidelijk dat er in zijn ogen nogal wat schortte aan Hookes theorie. De theorie van Pardies, die hij niet lang daarna leerde kennen, vond hij veel helderder en diens verklaring van de breking was volgens hem de beste die op dat moment beschikbaar was.

Alleen bleek in 1672 dat de vreemde breking van IJslands kristal een probleem vormde voor Pardies' theorie. Daarin werden lichtstralen beschreven als de voortplantingsrichting van lichtgolven, en de verklaring van breking was gebaseerd op het uitgangspunt dat stralen en golven altijd loodrecht op elkaar staan. Deze premisse werd tegengesproken door de vreemde breking, in het bijzonder door het breken van de loodrecht invallende straal. Bij een loodrecht invallende straal hoort een golf die plat op het oppervlak van het kristal valt. Daaruit kan in het kristal alleen een vlak golfje voortkomen dat rechthoekig verder beweegt. Maar de waarneming leert dat in het kristal de lichtstraal gebroken wordt, en dus zou die schuin op de golf zijn komen te staan. Een schuine hoek tussen de lichtgolf en de lichtstraal wordt echter door Pardies' theorie uitgesloten. Dit was het probleem dat de vreemde breking opwierp voor de golfverklaring van lichtbreking in het algemeen. Die moeilijkheid wilde Huygens eerst uit de weg ruimen. Want, zo lijkt hij gedacht te hebben, wanneer mijn verklaring van de gewone breking wordt tegengesproken door een ander brekingsverschijnsel, kan ik die niet zomaar gebruiken in een publicatie over de dioptrica. Een wiskundige houdt nu eenmaal niet van inconsistenties.

Datzelfde najaar – nog steeds volgens mijn datering – deed Huygens een eerste poging het probleem van de vreemde breking op te lossen. Hoewel, het eigenlijke probleem lijkt hij in de aantekeningen die bewaard zijn gebleven niet aan te roeren. Behalve de constatering dat de breking van de loodrechte straal een probleem voor zijn golftheorie opwierp, komen lichtgolven niet ter sprake. In plaats daarvan wijdde Huygens zich helemaal aan een analyse van het gedrag van lichtstralen in IJslands kristal. Uit de aantekeningen blijkt dat hij op zoek was naar een wetmatigheid in de vreemde breking, een algemene regel voor het verband tussen de hoek van inval en de hoek van breking van de lichtstraal. Een wet van de vreemde breking analoog aan de sinuswet voor de gewone breking. Bartholinus had ook al een poging gedaan zo'n regelmaat te ontdekken. Hij had een alternatieve sinuswet voorgesteld, waarbij de sinusen niet afgemeten worden ten opzichte van de normaal van het brekingsvlak (de stippellijn in figuur 2.2) maar ten

opzichte van een lijn schuin daarop, evenwijdig aan de rand van het kristal. Kennelijk beviel deze ‘schuine’ sinuswet Huygens niet, want zijn aantekeningen verwijzen er op geen enkele manier naar.

Bartholinus’ metingen gebruikte Huygens daarentegen wel. Op basis daarvan kwam hij al vrij snel tot een eigen ‘wet’ voor de vreemde breking: tel bij de gewone breking van een lichtstraal een vaste afwijking op, namelijk de breking van de loodrecht invallende lichtstraal, en je vindt de vreemde breking van de lichtstraal. Eigenlijk was dit niet eens zo vergezocht: IJslands kristal voegt aan een gebroken lichtstraal een bepaalde ‘vreemde’ component toe. Niemand minder dan Isaac Newton kwam vijftwintig jaar later op precies hetzelfde idee toen hij zijn gedachten over de vreemde breking liet gaan.

Huygens had een elegante regel gevonden om de vreemde breking van lichtstralen te berekenen. Deze was algemener dan die van Bartholinus, want diens ‘schuine’ sinuswet gold niet voor een willekeurige straal. De ‘wet’ van Huygens gaf voor elke hoek van inval de hoek waaronder een lichtstraal in IJslands kristal gebroken wordt. De meeste zeventiende-eeuws wiskundigen zouden tevreden achteroverleunen nu er een regelmaat was gevonden in de vreemde breking. Maar Huygens was niet tevreden. Misschien had hij verwacht met een wet van de vreemde breking ook inzicht te krijgen in de oorzaak ervan en daarmee in het verband tussen gewoon en vreemd gebroken lichtgolven. Dat was niet gebeurd; hij wist nog steeds niet hoe hij de breking van de loodrechte straal kon begrijpen in termen van golven.

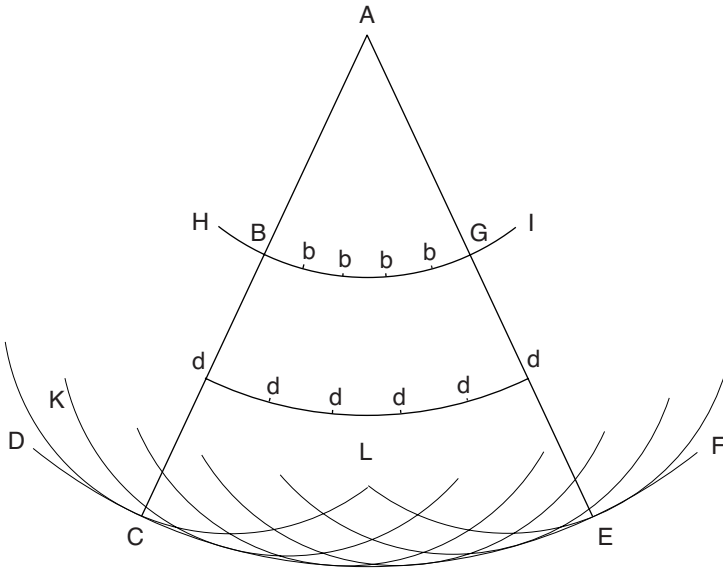
Intussen was de vreemde breking nog vreemder geworden. Wanneer een stuk IJslands kristal een lichtstraal in tweeën splitst en je laat die twee stralen op een tweede stuk kristal vallen, zou je verwachten dat ze zich nogmaals opsplitsen. Huygens ontdekte dat dat niet in alle gevallen gebeurt. Als de kristallen met de oppervlakken evenwijdig aan elkaar lagen, splitsten de stralen zich niet nog een keer. Hij had geen idee hoe dit verschijnsel, een polarisatie-effect, verklaard zou kunnen worden. Hij liet zijn aantekeningen voor wat ze waren en richtte zich op andere zaken.

2.3 De oplossing van de puzzel

Vijf jaar later keerde Huygens terug naar het probleem van de vreemde breking. Eigenlijk was van een probleem al geen sprake meer: de aantekeningen die hij in de zomer van 1677 maakte over vreemde breking, bevatten direct de oplossing van de puzzel. Huygens had een manier gevonden om de breking van de loodrecht invallende straal te begrijpen in termen van lichtgolven. Ditmaal is er geen enkel spoor van gezwoeg; de oplossing lijkt zo maar uit de lucht te komen vallen. Er was echter wel het één en ander gebeurd. Behalve dat hij vanwege ziekte tijdelijk in zijn ouderlijk huis in Den Haag verbleef, had Huygens ergens in de zomer van 1677 een nieuw idee gekregen over de manier waarop lichtgolven zich voortplanten. En daarin was de oplossing van het probleem van de vreemde breking gelegen.

Het nieuwe inzicht staat tegenwoordig bekend als *Huygens' beginsel van golfvoortplanting* (zie afbeelding 2.3). De kern ervan is het idee dat elk punt op een golf, afkomstig uit een lichtbron in punt A, zelf weer de bron is van een nieuw minuscuul golfje. Alle golfjes uit de punten *dddddd* breiden zich in een bepaalde tijd over eenzelfde afstand uit. In die wirwar van golfjes is er echter maar één plaats waar ze allemaal samenkomen om een nieuwe, grote golf te maken: de lijn *DCEF*. Die hoofdgolf produceert zichtbaar licht; afzonderlijk zijn de kleine golfjes te zwak om waargenomen te worden.

Terugredenerend kunnen we vaststellen dat Huygens met dit beginsel een fundamentele lacune in Pardies' golftheorie had opgevuld. Die was er in feite van uitgegaan dat golven bestaan en dat je er eigenschappen als snelheid en richting aan kunt toeschrijven. Huygens draaide de boel om: de golf is niet primair, maar een gevolg ergens van. Licht bestaat volgens Huygens uit een verstoring van de etherzee: de deeltjes van een lichtbron stoten tegen de etherdeeltjes en die botsinkjes planten zich in alle richtingen gelijkmatig voort. Waarneembare lichtgolven ontstaan waar, op de manier die zijn beginsel beschrijft, vele botsinkjes samenkomen. Golven zijn dus geen van zichzelf samenhangende dingen, maar resultaat van het tamelijk willekeurig samenkomen

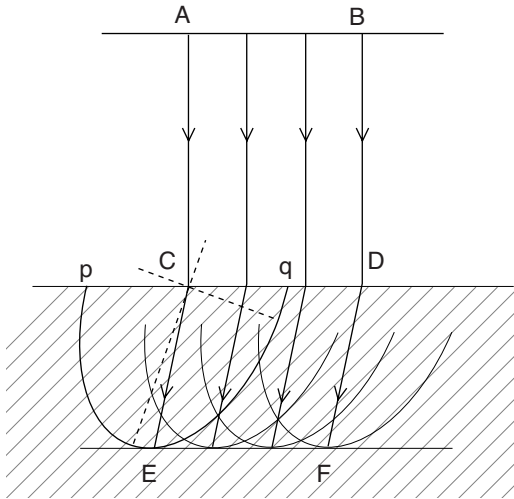


Afbeelding 2.3: Huygens' beginsel van golfvoortplanting.

van verstorinkjes in de etherzee. Het enige wat je nodig hebt om regelmaat in de golven te krijgen, is een vaste voortplantingssnelheid voor die verstorinkjes, zodat ze na een bepaalde tijd op één lijn samenkomen.

In *Traité de la lumière* zou Huygens later betogen dat dit heel aannemelijk is wanneer je je de ether voorstelt als een zee van harde balletjes. Maar in de aantekeningen van 1677 beslaan het hele beginsel en de gedachte erachter niet meer dan een ruw schetsje en een losse zin. Die duiken op in een analyse van lichtgolven die door een glazen lens bewegen – waarvan niet te achterhalen is waarom Huygens eraan begon. Haast terloops zien we het inzicht rijpen dat het bij licht uiteindelijk allemaal draait om voortplantingssnelheid: als je uitgaat van een vaste snelheid die afhangt van het medium, volgt de rest vanzelf.

Kennelijk moest Huygens toen hij dit inzag direct denken aan het probleem dat hij vijf jaar daarvoor niet had weten op te



Afbeelding 2.4: Een vlakke golf AB valt op het oppervlak van het kristal. Rond de punten C...D ontstaan ellipsvormige golfjes pEq. Die komen samen langs de lijn EF, die dus volgens Huygens' beginsel de voortgeplante golf is. Die is nog steeds evenwijdig aan het oppervlak van het kristal, maar beweegt zich ietsje schuin voort langs de lijn CE, de breking van de invallende straal AC.

lossen: de vreemde breking van IJslands kristal. Op de volgende bladzijden van zijn aantekeningenboek verschijnt de oplossing. IJslands kristal is inderdaad vreemd, want licht plant zich daarin niet gelijkmatig voort: de snelheid is in de ene richting net iets groter dan in de andere. Als gevolg daarvan ontstaan ellipsvormige golven in plaats van de cirkelvormige van glas, water en lucht. Met die ellipsvormige golven is de breking van de loodrecht invallende straal eenvoudig te verklaren (zie afbeelding 2.4). De puzzel van de vreemde breking was opgelost. Een terecht 'ΕΥΡΗΚΑ', op die zesde augustus 1677.

2.4 Een nieuwe optica

In onze ogen had Huygens echter meer gedaan dan een uitdagende puzzel oplossen. Zijn beginsel van golfvoortplanting en de toepassing ervan op de vreemde breking bevatten een wezenlijk nieuwe vorm van optica, waarin mechanistisch en wiskundig denken samenvloeien. In zekere zin is dat al te zien aan de figuren die erbij horen. Want het feit dat Huygens zijn beginsel en verklaring van vreemde breking in zulke meetkundige plaatjes kon vatten, toont het wiskundige karakter van zijn theorie. Deze plaatjes zijn de kern van de theorie, niet slechts illustraties erbij. Om de vreemde breking te verklaren had Huygens voldoende aan een passer en een liniaal; het gedrag van lichtstralen in IJslands kristal leidde hij af via een meetkundige constructie. Op dezelfde manier reduceerde hij de verklaring van de sinuswet van gewone breking tot een meetkundige constructie. Het enige wat hij nodig had was de aanname dat lichtgolven in glas wat langzamer bewegen. De cirkeltjes worden dan wat kleiner en wanneer je daar het beginsel van golfvoortplanting op loslaat, kom je met passer en liniaal tot de sinuswet.

Met zijn beginsel had Huygens het mechanistische idee van licht als golven helemaal vertaald naar de wiskunde en dat maakt zijn lichttheorie tot iets nieuws in de zeventiende eeuw. Andere lichttheorieën misten die exactheid. Descartes had zijn druktheorie van licht op geen enkele manier in een wiskundige vorm gegoten; bij zijn verklaring van de sinuswet deed hij een beroep op bewegende ballen. Hij stelde wel dat druk en bal samenhangen, maar beargumenteerde dat op geen enkele manier. Ook de bewegingseigenschappen die hij aan ballen toekende, misten de exactheid van die van Huygens' golven. Zo bleef Descartes' mechanistische verklaring uiteindelijk kwalitatief (vgl. par. 3.5) en zijn volgelingen brachten daar geen verandering in. Zeventiende-eeuwse theorieën over licht als deeltjes in beweging bleven kwalitatief. Mechanistische verklaringen waren mooie praatjes in plaats van strenge wiskunde.

Volgens Huygens moesten in de mechanistische filosofie de *wetten*

van de beweging het uitgangspunt zijn. Hij was daarin strenger dan zijn tijdgenoten. Een deeltjes-in-beweging-verklaring vond hij pas acceptabel als de bewegingen die verondersteld werden een pendant hadden in de wereld van de zichtbare dingen. Van botsende biljartballen kende men de wetten, dus mocht men zich botsende micro-biljartballen voorstellen. Dat is wat Huygens deed in zijn golftheorie, en daarmee was hij de eerste die het mechanistisch redeneren in de exacte vorm van de wiskundige afleiding goot.

Zo dichtte Huygens in de optica een eeuwenoude kloof tussen de fysische verklaring en de wiskundige beschrijving. Van oudsher had de wiskundige studie van het licht – de meetkundige optica – zich namelijk beperkt tot het nauwkeurig beschrijven van het zichtbare gedrag van lichtstralen. Aan de vraag naar het waarom daarvan besteedde de wiskundige wel enige aandacht, maar centraal stond die niet. Het was voldoende dat de wetten van weerkaatsing en breking empirisch onderbouwd waren. De fysische aard van licht was het terrein van de natuurfilosofie. Daar hield men zich bezig met vragen als wat licht is en hoe het waarneming mogelijk maakt. In de astronomie bestond een vergelijkbare taakverdeling: de wiskundige beschreef nauwkeurig de bewegingen van sterren en planeten, de natuurfilosoof hield zich bezig met de ware aard en betekenis van de kosmos.

In de natuurfilosofie speelde de wiskunde van oudsher geen rol van betekenis. Met zijn mechanistische filosofie had Descartes de kloof tussen wiskunde en fysica willen dichten. De essentie van de wereld was volgens hem gelegen in ruimtelijke kenmerken als vorm en grootte. De bouwstenen van de natuur waren daarmee dezelfde als die van de wiskunde. De koppeling van deze mechanistische natuurfilosofie aan de wetten van de natuur bleek echter niet zo eenvoudig als Descartes dacht. In zijn optica bleef een kloof bestaan tussen zijn druktheorie van licht en de sinuswet van de breking. In zijn astronomie gold hetzelfde voor zijn kosmologie en Keplers wetten van de planeetbewegingen. Pas met Huygens werd een eerste brug geslagen tussen mechanistisch verklaren en wiskundig beschrijven, en dan alleen nog wat licht betreft. Newton zou tien jaar later met zijn gravitatie-theorie iets vergelijkbaars doen in de astronomie.

Met name in Huygens' verklaring van de vreemde breking waren de wiskundige beschrijving van lichtstralen en de mechanistische verklaring in termen van golven onlosmakelijk met elkaar verbonden. Met de ellipsgolven is niet alleen de breking van de loodrecht invallende straal af te leiden, maar is voor elke straal de brekingshoek nauwkeurig te berekenen. De verklaring is tegelijk de wet van de vreemde breking. Alleen is die anders dan de wet die Huygens in 1672 zocht en anders dan de vertrouwde wetten van de optica. Die waren geformuleerd in termen van lichtstralen en daarmee empirisch geldig, onafhankelijk van één of andere theorie over de aard van licht. De nieuwe wet van vreemde breking was geformuleerd in termen van onwaarneembare (ellipsvormige) golven en gebaseerd op het beginsel van de golfvoortplanting. Deze golven waren net zo exact als de stralen van de traditionele meetkundige optica. Je zou kunnen zeggen dat Huygens in zijn golftheorie de meetkundige optica had uitgebreid tot de (mechanistische) aard van licht.

Was Huygens zich bewust van de vernieuwing die hij met zijn verklaring van de vreemde breking bewerkstelligde? Dat is nog maar de vraag. Hij was weliswaar uiterst kritisch ten aanzien van Descartes' optica – die zat volgens hem vol fouten en vaagheden – maar dat wil niet zeggen dat hij de spanning daarin zag tussen mechanistische verklaring en wiskundige beschrijving. In de openingsalinea's van *Traité de la lumière* schrijft hij dat hij zal uitgaan van de 'ware filosofie' waarin men alle natuurverschijnselen verklaart met de 'redenen van de mechanica'. Voor Huygens waren die redenen de wetten van de beweging; hij begreep 'mechanica' als de wiskundige leer van beweging waarvoor Galilei de grondslag had gelegd (zie par. 1.8). Niets doet echter vermoeden dat hij zich realiseerde dat niet al zijn tijdgenoten er zo'n strenge, wiskundige opvatting op nahielden – alsof het vanzelfsprekend was om de mechanistische aard van het licht in wiskundige vorm te gieten. In zekere zin was het dat ook voor Huygens, want die pakte alles wiskundig aan.

Dát de Huygens uit 1672 het verklaren van licht als deeltjes in beweging aanpakte, sprak echter niet vanzelf. Volgens mij

maakte juist het door en door wiskundige van zijn denken dat hij toen gegrepen werd door een probleem van lichtgolven. In 1672 had Huygens een verklarende theorie van licht nodig voor zijn boekje over lenzen en in Pardies' golftheorie vond hij er één waar wiskundig goed over nagedacht was. Hij zag echter ook dat de vreemde breking een probleem opwierp voor Pardies' theorie. Tezamen vormde dit een uitdagende puzzel en de oplossing kwam van Huygens' wiskundige denken, toen hij een nieuwe uitwerking van de golfvoortplanting inventief toepaste op IJslands kristal. Bij golven doet alleen snelheid ertoe, zag Huygens in de zomer van 1677 in, en die is met cirkels weer te geven – of met ellipsen wanneer de snelheid niet gelijkmatig is, zoals in IJslands kristal.

Met het verklaren van de vreemde breking had Huygens zijn aandacht onmerkbaar verplaatst van de waarneembare regelmaat van stralen en slingers naar de mechanistische aard der dingen. Voor hem sprak het vanzelf om die met de hem vertrouwde exactheid te benaderen. Op die manier bewerkstelligde hij in de zomer van 1677 een doorbraak op een hoger niveau. Hij had als eerste een mechanistische theorie van licht in een streng wiskundige vorm gegoten en daarmee de exactheid van de wiskundige beschrijving uitgebreid tot de aard der dingen. Zagen Huygens' tijdgenoten de verklaring van de vreemde breking ook als een doorbraak?

2.5 Het lot van de golftheorie

In 1679 was Huygens terug in Parijs, waar hij zijn theorie presenteerde op de Academie. Blijkens een brief van tien jaar later waren de leden onder de indruk van het werk dat hij in Den Haag had gedaan. Van één lid weten we dat hij bezwaren inbracht tegen de ellipswet. Dat was de Deen Ole Rømer die het werk van Bartholinus goed kende. Hij was niet overtuigd van de noodzaak van Huygens' theorie. Wat hem betreft werd Bartholinus' schuine sinuswet er niet door ontkracht. Huygens' weerwoord bestond uit een ingenieus experiment waarbij hij een stuk IJslands kristal op

een onnatuurlijke wijze spleet en liet zien dat de brekingsverschijnselen in het zo ontstane oppervlak dezelfde waren als zijn ellipswet voorspelden. Kennelijk gaf Rømer zich gewonnen, want jaren later schreef hij dat Huygens de enige was die met zijn lichttheorie ook de vreemde breking kon verklaren.

Het experiment met het onnatuurlijk gespleten kristal voorzag de ellipswet van een empirische onderbouwing die Huygens er tot dan toe niet bijgezocht had. Het theoretische construct was voor hem voldoende geweest, de enig denkbare manier om alle eigenschappen van lichtstralen op een samenhangende en begrijpelijke manier te verklaren. Meer was volgens hem ook niet mogelijk, want waar het ging om de onzichtbare aard der dingen was zekerheid onbereikbaar. 'Het is nauwelijks denkbaar dat de situatie niet ongeveer zo is als ik me die voorstel', schreef hij in het voorwoord van *Traité de la lumière*. Zijn golftheorie was de best denkbare hypothese, maar het bleef een hypothese. Dat is nogal wat voor een zeventiende-eeuwse wetenschapper! Niks zekere kennis, wij moeten er maar genoegen mee nemen dat kennis waarschijnlijk en voorlopig is. Huygens keerde zich hier met name tegen Descartes, die zijn theorie van licht met al te grote stelligheid had geponeerd en te weinig had gekeken of zijn uitgangspunten ook empirisch houdbaar waren. Hij had in Huygens' ogen teveel vertrouwd op de kracht van zijn mechanistische filosofie en was daardoor ernstig in de fout gegaan. Speculeren is best, zei Huygens, maar dan moet je het wel goed doen: wiskundig en experimenteel onderbouwd.

Ook die andere hoofdfiguur van de wetenschappelijke revolutie – Isaac Newton – meende dat Descartes door zijn onge-reemd speculeren in de fout gegaan was (zie par. 3.5). Newton trok echter een conclusie die tegenovergesteld was aan het standpunt van Huygens: als je door speculeren in de fout gaat, moet je niet speculeren. Het gebruik van hypothesen was voor hem onaanvaardbaar. Newton had wel degelijk ideeën over de mechanistische aard van licht – licht bestond uit rondvliegende deeltjes – maar die scheidde hij in zijn *Opticks* zorgvuldig van zijn experimenteel bewezen theorie van kleuren. Pas aan het eind van het boek schreef hij zijn onbewezen speculaties op, in de vorm van re-

torische vragen: 'Is het niet zo dat...?' Daar maakte hij ook korte metten met Huygens' golftheorie. Golven konden nooit de rechtlijnigheid van lichtstralen verklaren, hoezeer Huygens in *Traité de la lumiere* ook het tegendeel had proberen te laten zien. Toen Newton *Opticks* publiceerde, was Huygens al een jaar of tien overleden, dus hij kon zich niet meer verweren.

In 1690 had Huygens nog wel zijn verschil van mening met Newton over hypothesen duidelijk gemaakt. Hypothesen waren volgens hem niet alleen toegestaan maar ook noodzakelijk waar het ging om niet-waarneembare zaken. *Traité de la lumiere* bevatte een tweede werkje, waarin Huygens zijn ideeën over zwaartekracht uiteenzette. Hij reageerde op Newtons theorie van universele gravitatie in de *Principia*. Deze had een fraaie wiskundige theorie uitgewerkt waarin alle massa's onderling aantrekking op elkaar uitoefenen. Daarmee konden alle beweging in de hemel en op de aarde nauwkeurig beschreven worden. Wát die aantrekking was, daarover deed Newton echter geen uitspraak en dat weigerde hij ook (zie par. 3.5). Universele gravitatie was volgens hem voldoende bewezen door de verschijnselen en toekomstige generaties moesten zich maar druk maken over de oorzaak ervan. Dat vond Huygens weer niet acceptabel. Aantrekking op afstand, dat riekte naar occulte krachten en die waren sinds Descartes taboe. Geef eerst maar eens een verklaring in termen van deeltjes in beweging waaruit jouw wet van universele gravitatie af te leiden is, zei hij tegen Newton, dan zullen we wel eens zien of die wet acceptabel is. Newton weigerde.

Met zijn strenge opvatting over de mechanistische aard der dingen was *Traité de la lumiere* in 1690 in feite al achterhaald. Hoewel Huygens van verschillende kanten lof kreeg toegezwaaid voor het fraaie werkje dat hij geproduceerd had, zagen zijn tijdgenoten in Newtons *Principia* een veel fundamenteelere doorbraak. *Philosophiae naturalis principia mathematica* luidde de titel voluit, de wiskundige beginselen van de natuurfilosofie, en zo werd het boek ook ontvangen (zie par. 3.7). Het verschaftte een nieuwe wiskundige grondslag voor de studie van de natuur.

Toch had ook Huygens in *Traité de la lumiere* op zijn manier

laten zien hoe de natuur wiskundig bestudeerd kon worden. Anders dan bij Newton betrof dat niet alleen de zichtbare verschijnselen maar ook de onwaarneembare aard van de dingen, hoe onzeker kennis daarover ook was. Voor zijn tijdgenoten bleef dat echter onzichtbaar, hetgeen niet in de laatste plaats aan Huygens zelf te wijten is. Als hij zich er al van bewust was dat zijn golftheorie een omslag inhield in het mechanistisch denken over licht, deed hij weinig moeite om dat de lezer duidelijk te maken. Hij presenteerde zijn theorie als een verbetering van die van Pardies, eentje waarmee een verklaring van de vreemde breking mogelijk was.

Huygens' golftheorie raakte snel in vergetelheid. De achttiende eeuw wordt wel de eeuw van Newton genoemd en dat gaat zeker op voor het denken over licht. Licht bestaat uit deeltjes, zei de meerderheid in de achttiende eeuw Newton na (zie par. 3.7; vgl. par. 7.7).

Pas rond 1800 werden Huygens' golven weer ontdekt. In Engeland zag Thomas Young de mogelijkheden die de golftheorie bood om zowel licht- als geluidsverschijnselen te verklaren. Hij breidde het idee van interferentie uit: waar Huygens alleen sprak over secundaire golfjes die elkaar versterken, keek Young ook naar golven die elkaar uitdoven. Wel moest hij zijn theorie eenvoudig houden, want het interfereren van meerdere golven werd voor zijn meetkunde al snel te complex.

De krachtige wiskunde die nodig was om dergelijke vraagstukken te behandelen was in Frankrijk volop in ontwikkeling. Etienne Malus herschreef in 1810 Huygens' ellipswet voor vreemde breking in analytische vorm en verifieerde de theorie vervolgens met behulp van nauwgezette experimenten. Malus' fysische interpretatie van de wet was echter diametraal tegenovergesteld aan de oorspronkelijke: hij ging uit van deeltjes in plaats van golven. Hij wist een verklaring te geven van het verschijnsel dat Huygens in 1672 had ontdekt maar nooit begrepen: in sommige gevallen splitst IJslands kristal een gesplitste lichtstraal niet nogmaals op. Malus schreef dit toe aan de polarisatie, een zekere mate van gerichtheid, van lichtdeeltjes. In de twee stralen die na eerste

breking uit IJslands kristal komen, zijn deeltjes met verschillende polariteit opgesplitst. Wanneer een straal met de ene polariteit nogmaals op een stuk kristal valt, zal hij onder bepaalde hoeken gebroken worden, onder andere hoeken niet. Malus ontdekte tevens dat lichtstralen niet alleen gepolariseerd raken als ze door het kristal heen gaan, maar ook bij weerkaatsing. Samen met tijdgenoten als Biot en Arago zorgde hij zo voor een verdere ontwikkeling van de optica op basis van Huygens' werk. De huygeniaanse aanpak bleef: hypothesen over de aard van licht werden gematiseerd. Maar Huygens' ideeën over golven waren daarbij van het toneel verdwenen.

In 1815 bracht Augustin Fresnel het één en ander samen: Huygens' golftheorie, Youngs idee van interferentie en het mathematiseren (met behulp van de calculus) van hypothesen. Fresnel stelde een integraal op waarmee de lichtintensiteit bepaald kon worden in een punt waar willekeurige golfjes uit bepaalde punten samenkomen. Daarmee leidde hij een theorie van de buiging van licht af. In 1821 combineerde hij die met Malus' idee van polarisatie, maar daarvoor moest hij wel de aard van lichtgolven opnieuw bekijken. Waar Huygens' golfjes nog het resultaat waren geweest van het botsen van etherdeeltjes die heen en weer bewogen in de richting van de voortplanting van licht, moest Fresnel aannemen dat er juist sprake is van beweging in het vlak loodrecht op de voortplantingsrichting (zie par. 4.7). Deze transversale golven verklaarde hij door aan te nemen dat de ether een vloeistof was die nauwelijks samendrukbaar is. Over de vraag naar de precieze aard van de ether en golven daarin zouden fysici in de negentiende eeuw nog uitgebreid van gedachten wisselen (zie par. 6.1 en 6.2), maar Huygens' golftheorie van licht was definitief terug op het wetenschappelijk toneel. Bovendien was het denken over onwaarneembare golfjes definitief in de taal van de wiskunde gegoten, in navolging van Huygens die daar op die zesde augustus 1677 de eerste proeve van had gegeven.

Aanbevolen literatuur

De correspondentie, werken en handschriften van Christiaan Huygens zijn gepubliceerd in: *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens publiées par la Société hollandaise des sciences*, 22 delen ('s-Gravenhage 1888-1950). Het 'projet' is te vinden in deel XIII-2 (738-145); de aantekeningen over IJslands kristal zijn te vinden in deel XIX (407-431), de pagina met de oplossing van het probleem van de vreemde breking is gereproduceerd op een uitvouwblad tussen pagina 426 en 427. De volledige titel van *Traité de la lumière* luidt: *Traité de la lumière. Où sont expliquées les causes de ce qui luy arrive dans la reflexion, & dans la refraction. Et particulièrement dans l'étrange refraction du cristal d'Islande, par C.H.D.Z., avec un discours de la cause de la pesanteur* (Leiden 1690). Een facsimile plus Nederlandse vertaling is te vinden in C. Huygens, *Verhandeling over het licht* (Utrecht, 1990).

Dit artikel is gebaseerd op promotie-onderzoek uitgevoerd aan de Universiteit Twente: F.J. Dijksterhuis, *Lenses and waves. Christiaan Huygens and the mathematical science of optics in the seventeenth century* (Enschede, 1999). Het proefschrift is in eigen beheer uitgegeven en bij de auteur te bestellen (f.j.dijksterhuis@wmw.utwente.nl).

Een uiterst leesbare biografie van Huygens is: C.D. Andriess, *Titan kan niet slapen. Een biografie van Christiaan Huygens* (Amsterdam, 1993). Beknopt maar verhelderend ten aanzien van de aard van Huygens' wetenschappelijke werk is: H.F. Cohen, *Christiaan Huygens en de wetenschapsrevolutie van de 17de eeuw*. (Museum Boerhaave, Leiden, 1996). Ondanks de status van Christiaan Huygens als belangrijkste Nederlandse wetenschapper uit de Gouden Eeuw is er relatief weinig literatuur over zijn leven en werk. De meest gedegen inleiding is de bundeling van lezingen van een congres dat in 1979 aan hem gewijd werd: *Studies on Christiaan Huygens. Invited papers from the Symposium on the Life and Work of Christiaan Huygens, Amsterdam, 22-25 August 1979*, red. H.J.M. Bos e.a. (Lisse, 1980).



3

*Isaac Newton en
zijn gravitatie­theorie*

Kees de Pater

[...] the cause of gravity is what I do not pretend to know and therefore would take more time to consider of it.

NEWTON AAN BENTLEY, derde brief, 25 februari 1693

Toen de bekende medicus en chemicus Herman Boerhaave in 1715 aftrad als rector van de Leidse universiteit, hield hij een oratie over het verkrijgen van zekerheid in de natuurkunde. Kort daarvoor was in Londen de tweede editie van Newtons *Principia* verschenen, gevolgd door een roofofdruk in Amsterdam. Boerhaave was de eerste op het continent die in een academische redevoering openlijk Newton op een voetstuk plaatste als het 'wonder van de eeuw'. Hij mengde zich in het debat over de gravitatie-theorie (de theorie van de zwaartekracht), dat al direct na de publicatie van de eerste druk van de *Principia* (1687) was begonnen, maar nog steeds voortduurde.

Sommige aanhangers van Newton hadden er weinig problemen mee om de gravitatie te beschouwen als een wezenlijke eigenschap van lichamen, die geen verdere verklaring behoefde. Wie Newtons werk goed las, kwam echter tot andere conclusies. Kennelijk had Boerhaave dat gedaan, want hij blijkt een helder inzicht in Newtons eigen visie te hebben:

[...] hoewel Newton met ongelooflijke ervaring in de astronomie zeer scherp heeft geconcludeerd, dat deze [zwaarte] onafscheidelijk elk zichtbaar lichaam aanleeft, overal dezelfde

wetten volgt, zich steeds in gelijke maat met den omvang der materie verdeelt, toch heeft dit alles nog niet bewerkt, dat de scherpzinnigste der wijsgeeren juister vat, wat wel de zwaarte bij de lichamen zelve is, dan hij, die deze slechts eenmaal door de zinnen heeft waargenomen. [...] Immers, aantrekkingskracht duidt niets anders aan dan een onbekende oorzaak, die een als het ware vanzelf ontstane beweging veroorzaakt, waardoor sommige lichamen gedreven worden tot wederzijdsche aanraking, maar verklaart niet, wat wel die oorzaak is, en legt evenmin uit, op welke begrijpelijke wijze zij deze beweging opwekt. (Boerhaave, ed. Cohen, 1918, pp. 61/63)

Boerhaave prijst de ‘vorst der meetkundigen’, omdat deze eerlijk toegeeft dat de ‘natuur en haar krachten hem in haar diepsten grond onbekend waren’.

Dat is inderdaad de boodschap die Newton telkens weer uitdraagt: de gravitatie is voor hem onomstotelijk als natuurverschijnsel, maar een verklaring in mechanistische zin – dat wil zeggen, op basis van contactwerking van bewegende materiedeeltjes – kan hij niet geven. Newton wijst daar uitdrukkelijk op in het voorwoord van de *Principia*, als hij zijn overtuiging uitspreekt dat de natuurverschijnselen afhangen van krachten waarvan de oorzaken tot nog toe onbekend zijn. In de tweede editie heeft hij een ‘Scholium Generale’, een algemene slotbeschouwing, aan het werk toegevoegd, waarin hij dat met zoveel woorden speciaal van de zwaartekracht zegt. Dat betekent niet dat Newton zich nooit over een mogelijke verklaring uitgesproken heeft, integendeel, zijn leven lang heeft hij met dit vraagstuk geworsteld. Een worsteling die gepaard ging met vele debatten, vooral na het verschijnen van de *Principia*.

3.1 Bewegingswetten; het traagheidsbeginsel

In 1684 bracht de astronoom Edmond Halley een bezoek aan Isaac Newton (1642–1727) om hem de vraag voor te leggen welke vorm de baan van een planeet heeft, als je ervan uitgaat dat de zon

een aantrekkende kracht uitoefent die omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand tussen beide hemellichamen. Newton kon hem zonder aarzelen het antwoord geven: een ellips. Toen Halley verrast naar het bewijs vroeg, waren de betreffende notities onvindbaar, maar Newton beloofde zich opnieuw in de materie te verdiepen.

Nog hetzelfde jaar stuurde hij een kort artikel van negen pagina's naar Halley. Hij raakte zo in de ban van zijn onderwerp dat de aan Halley verstuurde notitie in achttien maanden veranderde in het misschien wel belangrijkste boek dat ooit op natuurkundig gebied is geschreven: *Philosophiae naturalis principia mathematica* (*Wiskundige grondbeginselen van de natuurfilosofie*, 1687, 1713, 1726). Dat de *Principia*, zoals het werk gewoonlijk wordt aangeduid, ooit verschenen is, danken we aan het bezoek en vooral ook aan de verdere bemoeienissen van Halley. Niet alleen stimuleerde hij Newton het werk te schrijven en te voltooien, maar bovendien betaalde hij de drukkosten, omdat de auteur die zelf niet kon betalen, evenmin als trouwens de Royal Society.

Het gevolg was een wending in Newtons leven. Vóór 1687 was Newton een hoogleraar-kluizenaar, die in volstrekte afzondering dag en nacht studeerde. Na 1687 werd hij in toenemende mate een publiek persoon. In 1696 werd hij bedrijfsleider van de Munt in Londen en vier jaar later directeur ervan, terwijl hij bovendien nog van 1703 tot aan zijn dood in 1727 voorzitter van de Royal Society was.

In de *Principia* hebben Newtons fundamentele bijdragen aan de mechanica hun definitieve vorm gekregen. Naar het voorbeeld van de *Elementen* van Euclides – het leerboek dat vanaf de vierde eeuw tot ver in de twintigste eeuw het meetkunde-onderwijs in de westerse wereld bepaald heeft – is de *Principia* opgebouwd volgens een patroon van definities, axioma's en daaruit afgeleide proposities.

Newton geeft acht definities, waaronder die van het begrip 'massa', dat hier voor het eerst scherp wordt onderscheiden van het begrip 'gewicht'. Na de definities volgt een drietal axioma's ofwel bewegingswetten:

1. Ieder lichaam volhardt in zijn toestand van rust of eenparige beweging, behalve voor zover het door inwerking van krachten gedwongen wordt die toestand te wijzigen.
2. De verandering van de hoeveelheid beweging is evenredig met de werkende bewegende kracht en heeft plaats langs de rechte lijn volgens welke die kracht werkt.
3. Tegenover elke actie staat altijd een gelijke reactie; ofwel, de wederzijdse werkingen van twee lichamen op elkaar zijn altijd gelijk en tegengesteld gericht.

Het eerste axioma staat bekend als de traagheidswet; het tweede zou door de achttiende-eeuwse wiskundige Euler worden getransformeerd tot het nu bekende $F = m \cdot a$; het derde wordt meestal verwoord als ‘actie is min reactie’. Onder ‘hoeveelheid beweging’ in de tweede wet verstond Newton het product van massa en snelheid, waarbij niet alleen de grootte, maar ook de richting van de snelheid in acht moet worden genomen. In die zin komt Newtons hoeveelheid beweging overeen met het moderne begrip *impuls* (zie par. 7.5).

Ik wijs met name op het eerste axioma. Het daarin uitgesproken traagheidsbeginsel staat ver af van de dagelijkse ervaring, die leert dat een bewegend lichaam juist tot stilstand komt als er geen kracht op werkt. Het voortbewegen van een (hand)kar vereist permanent de duwende hand van een beweger. Precies deze ondervinding was de hoeksteen van de bewegingsleer van Aristoteles: zolang een lichaam in beweging is, moet men op elk moment een beweger (een bewegende oorzaak) kunnen aanwijzen die rechtstreeks met het bewegend lichaam in contact staat. Met andere woorden: een lichaam waarop geen kracht werkt, verkeert in rust. Dit zouden we de antieke traagheidswet kunnen noemen. Uiteraard zijn hier diverse vragen te stellen, zoals naar de oorzaak van val en worp; Aristoteles’ verklaring voor deze bewegingsverschijnselen is besproken in paragraaf 1.2.

De aristotelische bewegingsleer, die was opgebouwd vanuit de dagelijkse ervaring, was een krachtig argument tegen de asrotatie van de aarde, zoals die door Copernicus werd aangenomen. Als iemand een steen van een toren laat vallen, zal op een

om haar as roterende aarde volgens de aristotelische fysica de toren van de steen weg draaien, met als gevolg dat de steen ver van de voet van de toren op de aarde neerkomt. Er is immers geen contact meer tussen aarde en steen. Wat we echter zien is dat de steen aan de voet van de toren neerkomt. De asrotatie van de aarde is dus volledig in strijd met een van de fundamenteën van de aristotelische fysica.

Het is niet verwonderlijk dat Galilei, die een groot deel van zijn leven besteedde aan de verdediging van het heliocentrische stelsel van Copernicus, de aristotelische bewegingsleer scherp bestreed. Hij richtte zich met name tegen de antieke traagheidswet (zie par. 1.7). Fundamenteel daarbij is dat Galilei niet de dagelijkse ervaring als uitgangspunt neemt, maar uitgaat van een weerstandsloze beweging. Zijn analyse van de bewegingsverschijnselen leidt tot een andere traagheidsopvatting: een lichaam dat in een horizontaal vlak beweegt en aan zichzelf wordt overgelaten, blijft eenparig bewegen. Men mag Galilei's formulering niet gelijkstellen aan die van Newton, want horizontaal wil bij hem zeggen: langs een grote cirkel rond de aarde. Terwijl Galilei's opvatting van traagheid in de praktijk gelijk is aan die van Newton, is ze dat principieel gezien volstrekt niet.

De eerste die ondubbelzinnig rechtlijnige traagheid aannam, was Descartes, wiens formulering van de traagheidswet duidelijk model heeft gestaan voor die van Newton. Bij de Brit werd de wet echter ingebed in een geheel andere fysica en pas daarin kreeg ze haar betekenis.

Newton was ervan overtuigd dat er – los van een relatieve beweging ten opzichte van de aarde of de zon – een absolute beweging bestond in een absolute ruimte (vgl. par. 6.2). De traagheidswet heeft bij hem betrekking op deze laatste, 'ware' beweging. Elk materiedeeltje in de absolute, oneindige ruimte, hoe klein of groot ook, bezit een 'traagheidskracht', die een even essentiële eigenschap van materie is als uitgebreidheid, ondoorringbaarheid, hardheid en beweegbaarheid. Deze 'traagheidskracht' wordt enkel en alleen manifest wanneer een uitwendige kracht de beweging van een lichaam wil vertragen of versnellen, omdat het lichaam zich blijkbaar tegen een dergelijke verandering

verzet. Anders dan in de aristotelische fysica is er bij Newton geen wezenlijk verschil tussen rust en eenparige beweging. In de oude natuurkunde vereist elke beweging een oorzaak, maar voor Newton geldt dat alleen voor een bewegingsverandering. De eenparige rechtlijnige beweging wordt door hem beschouwd als een toestand van een lichaam, die geen nadere fysische verklaring behoeft. Daarmee is de antieke traagheidsopvatting definitief verleden tijd.

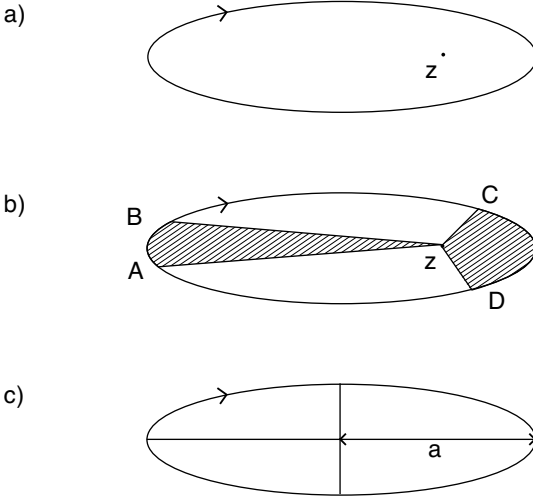
3.2 Mathematische constructies

De definities en de axioma's in de *Principia* en de daaruit in boek I en II afgeleide stellingen bieden strikt genomen geen (hemel)fysica, terwijl boek III dat wel pretendeert te doen. De vraag rijst wat het verband is tussen beide delen. Met name de Amerikaanse wetenschapshistoricus I.B. Cohen heeft dit probleem diepgaand geanalyseerd. Newton scheidt volgens hem in boek I een mathematische constructie, een wiskundig systeem met een algemene dynamica, waarin stellingen worden afgeleid over mathematische punten. Deze punten bewegen in een weerstandsloze, driedimensionale euclidische ruimte volgens de gegeven axioma's en daaruit afgeleide stellingen, waarvan de bewijsvoering verloopt via hoeken, (raak)lijnen en krommen.

Het wiskundige bouwsel van Newton heeft echter wél een natuurkundige 'horizon': de wereld van de verschijnselen speelt op de achtergrond voortdurend mee bij de keuze van door hem behandelde bewegingsproblemen. Die achtergrondverschijnselen betreffen met name de banen van de planeten. Hiervoor had Kepler langs empirische weg een drietal wetten gevonden (1609, 1619). Ze luiden als volgt (zie ook afbeelding 3.1):

1. De baan die een planeet beschrijft, heeft de vorm van een ellips. De zon staat in een van de twee brandpunten van deze ellips.
2. In gelijke tijden doorloopt de voerstraal die de zon en de planeet verbindt, gelijke oppervlakken (de *perkenwet*).

3. De derde macht van de halve lange as van de ellips waarlangs een planeet beweegt, is evenredig met het kwadraat van de omlooptijd. In formule: $a^3 \propto T^2$.



Afbeelding 3.1: De wetten van Kepler.

- a. De baan van een planeet om de zon vormt een ellips. De zon (z) staat in een van beide brandpunten.
- b. Als de sectoren (ofwel perken) AzB en CzD dezelfde oppervlakte hebben, is de tijd die de planeet nodig heeft om van C naar D te bewegen gelijk aan de tijd die nodig is om van A naar B te bewegen.
- c. De afstand a tot de derde macht is evenredig met de omlooptijd in het kwadraat. Een planeet in een grote ellipsbaan beweegt daarmee gemiddeld langzamer dan één in een kleinere.

Deze wetten van Kepler nemen in Newtons mathematische constructies (en in het geheel van de *Principia*) een belangrijke plaats in. Zo stelde Newton zich de vraag hoe een mathematisch punt in een euclidische ruimte beweegt onder invloed van een centrale kracht, dat wil zeggen, een kracht die vanuit één vast punt werkt. De beweging die zo'n punt ten opzichte van het krachtcentrum beschrijft, blijkt in alle gevallen te gehoorzamen aan de tweede

wet van Kepler. Voor het speciale geval dat het punt een ellipsbaan beschrijft, dus dat het beweegt volgens de eerste wet, kon Newton bovendien met behulp van de derde wet bewijzen dat de centrale kracht die op het punt werkt, altijd omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand tussen het punt en het centrum. In formule: $F \propto 1/r^2$. (In afbeelding 3.1.b zetelt de kracht in z en ver- tegenwoordigen A_z , B_z , C_z en D_z verschillende afstanden van het punt tot z .)

In een volgende fase vergelijkt Newton deze geconstrueerde wereld met de wereld der verschijnselen, en op grond daarvan stelt hij de mathematische constructie bij. In het zonnestelsel beweegt een lichaam (planeet) om een ander lichaam (de zon), waarbij het dus gaat om twee lichamen die elkaar wederzijds beïnvloeden. Dat brengt Newton ertoe een verfijnd mathematisch systeem te onderzoeken, waarin niet langer sprake is van een punt dat om een centrum beweegt, maar van twee puntmassa's in wederzijdse wisselwerking. Dit proces van mathematische verfijning van het systeem door confrontatie met de reële wereld leidt ten slotte tot een wiskundig bouwwerk dat ten opzichte van de waargenomen verschijnselen verregaand is bijgesteld, maar dat nog altijd wezenlijk mathematisch van aard is.

Bovendien gaat het in boek I steeds om bewegingen in een weerstandsloze ruimte. Newton besteedt echter ook aandacht aan beweging in een weerstand biedend medium. Dat gebeurt in boek II, waar onder andere een wiskundige behandeling wordt gegeven van verschillende hydrostatische en hydrodynamische problemen, alsmede van de slinger- en golfbeweging.

Ondanks de natuurkundige horizon van zijn mathematische dynamica heeft Newton in de boeken I en II geen fysische onderwerpen willen behandelen – enkele uitzonderingen daargelaten, zoals de de maanbeweging in boek I en de snelheid van het geluid in boek II. Hij biedt slechts een arsenaal van (wiskundige) stellingen, waarin verbanden worden gelegd tussen baanvorm, plaats, snelheid, omlooptijd en kracht, die van toepassing zijn op de beweging van punten en lichamen in zijn wiskundige wereld van eigen makelij. Het zijn deze stellingen die samen de 'wiskundige grondbeginselen van de natuurfilosofie' vormen. De titel van

Newtons werk heeft dus in feite alleen betrekking op de eerste twee boeken. Een aantal van deze grondbeginselen paste Newton vervolgens toe op waarneembare bewegingen. Op basis daarvan leidde hij in boek III zijn algemene gravitatie-wet af, waarmee hij een breed scala van natuurverschijnselen kon beschrijven.

3.3 Regels voor wetenschappelijk redeneren

Het is niet vanzelfsprekend dat de toepassing van de stellingen uit boek I in boek III geoorloofd is. Er zijn namelijk twee fundamentele problemen. Het eerste heeft te maken met het al of niet leeg zijn van de kosmische ruimte. In Newtons geconstrueerde wereld bewegen lichamen in een weerstandsloze, euclidische – dus lege – ruimte. Maar hoe is dat in de ‘echte’ wereld van de planeten? Bewegen zij inderdaad in een lege ruimte?

Ruim vier decennia eerder had Descartes in zijn *Principia philosophiae* (1644) een oneindige kosmos beschreven die volledig gevuld was. In de cartesiaanse wereld worden de planeten meegesleept door een om de zon roterende wervel (vortex, kolk) van uiterst fijn verdeelde hemelmaterie. Op afstand werkende krachten die wezenlijke eigenschappen zijn van lichamen, bestaan in deze wereld niet: in de cartesiaanse mechanica gebeurt er alleen iets door middel van botsende en drukkende materiedeeltjes (zie verderop, par. 5).

De kosmologie van Descartes verdrong binnen een halve eeuw het tweeduizend jaar oude aristotelische wereldbeeld met zijn eindige kosmos, zijn centrale aarde en zijn nadruk op eigenschappen en (verborgen) kwaliteiten van dingen als oorzaken van de verschijnselen. Newton was er zich dan ook zeer wel van bewust dat zijn wiskundige constructies, met het begrip ‘centrale kracht’ als hoeksteen, alleen bruikbaar waren om er de hemelbewegingen mee te beschrijven als hij liet zien dat de cartesiaanse werveltheorie niet deugde. Dat bewijs leverde hij aan het eind van boek II van de *Principia*. Toen pas was de weg vrij voor Newton om de daarvoor geëigende beginselen uit boek I toe te passen op de hemelbewegingen.

Het tweede probleem heeft te maken met de relatie tussen de (val)beweging van lichamen op aarde en die van de maan en de planeten aan de hemel. In Newtons wiskundige constructies geldt slechts één mechanica voor alle bewegingen. Maar wie zegt dat in onze werkelijke wereld van de verschijnselen op iedere plek van het heelal dezelfde wetten heersen? Tweeduizend jaar lang was de aristotelische gedachte springlevend gebleven dat er op de aarde en in haar omgeving geheel andere wetten heersten dan in de hemelse regionen (zie par. 1.2). Weliswaar golden in de kosmos van Descartes eveneens overal dezelfde bewegingswetten, maar de wetten van Galilei voor val en worp (1638, zie par. 1.5-1.8) en de drie van Kepler voor de planeetbeweging stonden nog steeds zonder enige band naast elkaar.

Om voor zijn eigen wetten universele geldigheid te kunnen claimen, moest Newton aannemelijk maken dat alle bewegingen zowel op aarde als aan de hemel eraan gehoorzamen, en dat die van Galilei en Kepler eruit zijn af te leiden. Met het oog hierop liet hij aan de behandeling van het wereldsysteem (zonnestelsel) in boek III van de *Principia* een aantal hypothesen voorafgaan. Twee ervan vormden samen met een nieuwe derde in de tweede editie (1713) de beroemde *Regulae Philosophandi*, de ‘regels van wijsgerig redeneren’. In de derde editie (1726) werd nog een vierde regel toegevoegd. De vier *Regulae* luiden in deze uitgave als volgt:

- Regel 1 Men moet niet meer oorzaken van gebeurtenissen in de natuur aannemen dan die welke waar zijn en die voldoen voor de verklaring van de verschijnselen.
- Regel 2 En daarom moeten aan natuurwerkingen van dezelfde soort dezelfde oorzaken worden toegekend, voor zover mogelijk.
- Regel 3 Eigenschappen van lichamen die niet kunnen worden versterkt of verzwakt en die toekomen aan alle lichamen waarmee men experimenten kan verrichten, moeten voor eigenschappen van alle lichamen worden gehouden.

Regel 4 In de experimentele natuurwetenschappen moeten stellingen (wetten) die door middel van inductie uit de verschijnselen zijn verkregen, voor volkomen waar of bij benadering waar worden gehouden, ook al kan een daarmee strijdige hypothese worden verzonnen, totdat zich andere verschijnselen hebben voorgedaan, waardoor ze [deze wetten] meer vast komen te staan of onderhevig blijken te zijn aan uitzonderingen.

De eerste regel poneert een beginsel van eenvoud en economie dat in de loop van de geschiedenis in verschillende vormen meermalen is uitgesproken. Een van de vele varianten is het 'scheermes van Ockham' (begin veertiende eeuw): 'Entiteiten moeten niet zonder noodzaak vermenigvuldigd worden.' Ook Galilei maakte er gebruik van bij zijn pleidooi voor het copernicaanse stelsel. De tweede regel behelst het principe van de analogie en de uniformiteit van het natuurgebeuren. Als voorbeeld noemt Newton de ademhaling van mens en dier en de valbeweging in Europa en Amerika.

Ook de derde regel vertolkt in zekere zin een analogiebeginsel. Hij biedt de mogelijkheid kenmerken die aan lichamen zijn waargenomen, zoals uitgebreidheid, ondoordringbaarheid, beweegbaarheid, traagheid en ook zwaarte, te generaliseren tot universele eigenschappen van de materie. Deze regel lijkt tamelijk gewaagd; immers met een beroep op een wellicht veel te beperkte ervaring zou men conclusies kunnen trekken die puur speculatief zijn.

De vierde regel lijkt daarom door Newton later te zijn toegevoegd om de grenzen voor de andere regels aan te geven, en wel naar twee kanten: enerzijds moeten we conclusies die langs inductieve weg zijn getrokken, niet in twijfel trekken op grond van allerlei oncontroleerbare hypothesen, maar anderzijds moeten we ons, als dat nodig is, wel door waarnemingen en experimenten laten corrigeren. Met andere woorden: de combinatie van empirie en inductie verdient verre de voorkeur boven welke fantastische hypothese dan ook. Alleen nieuwe waarnemingsfeiten kunnen en

mogen corrigerend werken. De ervaring vormt het eind van alle tegenspraak.

3.4 De regels en de algemene gravitatie

De *Regulae* worden door Newton als algemene regels gepresenteerd om als leidraad te dienen bij het formuleren van conclusies. Als zodanig zijn ze ook in de leerboeken van zijn aanhangers terechtgekomen. De lezer van de *Principia* krijgt echter sterk de indruk dat ze achteraf zijn geconstrueerd om de toepassing van de in boek 1 mathematisch afgeleide bewegingswetten op de planeetbeweging te rechtvaardigen, en vooral ook om zijn principe van de algemene gravitatie te legitimeren. Om dat duidelijk te maken, geef ik in het kort Newtons betoogtrant weer.

In boek 1 heeft Newton bewezen dat als in een systeem waarin een centrale kracht werkzaam is, de bewegingen gehoorzamen aan de drie wetten van Kepler, die kracht omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand van een bewegend punt tot het krachtcentrum (in formule: $F \propto 1/r^2$). Welnu, in het systeem van Jupiter en zijn manen gelden de wetten van Kepler. Dus bewegen de manen volgens de genoemde omgekeerde-kwadratenwet. Hetzelfde geldt voor een aantal andere systemen, namelijk voor Saturnus en zijn manen, voor de zon en de (primaire) planeten en voor de aarde en haar maan. Newtons geniale gedachte was dat de beweging van de maan om de aarde aan dezelfde wetten onderworpen is als de val en worp op aarde. Het lukte hem om deze hypothese te onderbouwen met een mathematische analyse van gegevens over de maanbeweging. De centrale kracht in het aarde-maan-systeem kan daarom worden geïdentificeerd met de zwaarte(kracht). En dat geldt op grond van Newtons *Regulae* ook voor de andere gevallen. Zijn eindconclusie is dan ook dat in al de genoemde systemen de bewegingen plaats vinden onder invloed van een en dezelfde zwaartekracht.

Vervolgens generaliseert Newton deze uitspraak tot zijn algemene gravitatiewet: twee lichamen, of het nu sterren, planeten, stenen of atomen zijn, oefenen een aantrekkende kracht op elkaar

uit die werkt langs de verbindingslijn van hun zwaartepunten en die evenredig is met de massa's van beide lichamen en omgekeerd evenredig met het kwadraat van hun afstand. In moderne weergave: $F \propto m_1 m_2 / r^2$ (zie ook de inleiding van hoofdstuk 4). Overigens formuleert Newton zelf dit eindresultaat in drie deelwetten: hij poneert de evenredigheid van de kracht met de eerste massa, vervolgens die met de tweede massa, en tenslotte de omgekeerde evenredigheid met het kwadraat van de afstand tussen beide massa's.

Het succes van Newtons wet – ik kom hierop nog terug – zorgde ervoor dat men lange tijd als vanzelfsprekend aannam dat ook krachten van andere aard langs een rechte lijn werken. Toen Oersted in 1820 ontdekte dat een loodrecht op een stroomvoerende draad geplaatste magneetnaald een draaiende beweging maakt, kostte het de fysici grote moeite van de rechtlijnigheid af te stappen. Toch zouden de door Faraday en Maxwell voorgestelde gebogen krachtlijnen – later veldlijnen genoemd – kenmerkend worden voor de theorie van het elektromagnetisme (zie hoofdstuk 4).

De verregaande stap om een algemene gravitatie­wet uit te spreken wordt gerechtvaardigd door het generalisatie­beginsel, Newtons derde regel. De effecten tussen lichamen (stukken steen of metaal) op aarde die hij met gravitatie verklaarde, waren voor hem immers niet waarneembaar, laat staan die tussen atomen – en de interactie tussen ver verwijderde sterren evenmin. Daarom stuitte deze veralgemenisering, die in Newtons ogen volstrekt legitiem was, bij Huygens en anderen op grote weerstand.

Met zijn gravitatie­wet kon Newton een groot aantal uiteenlopende verschijnselen verklaren, waaronder de beweging van planeten, manen en kometen, eb en vloed, en de valbeweging. Hij had de definitieve synthese tussen hemel en aarde tot stand gebracht: één wet beheerst alle bewegingen in het universum. De theorie betekende dan ook – om een term van Thomas Kuhn te gebruiken – een nieuw paradigma voor de hemelfysica. In de achttiende en het begin van de negentiende eeuw hebben Euler in Duitsland en vooral Franse onderzoekers zoals Clairaut, d'Alembert, Lagrange en Laplace zich er met vrucht van bediend.

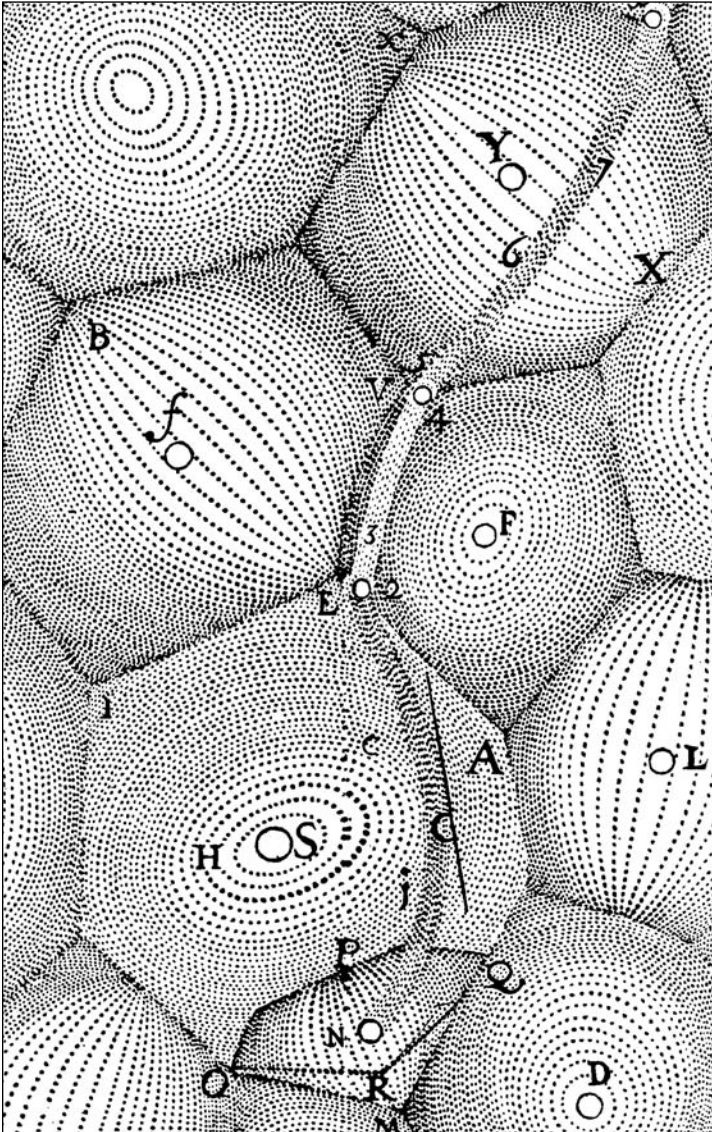
Met succes pasten zij de theorie toe op de vele overgebleven problemen, zoals de maanbeweging, de afplatting van de aarde bij de polen en de verwachte terugkeer van de komeet van Halley in 1758.

De bijdrage van Lagrange en Laplace betrof vooral de storende invloeden van de planeten op elkaar, met name die van de grote planeten Jupiter en Saturnus. Newton zelf was van mening dat deze storingen er op den duur toe zouden leiden dat het zonnestelsel in elkaar zou klappen, tenzij God van tijd tot tijd ingreep om de storingen op te heffen. Laplace dacht daar een eeuw later heel anders over. Zijn berekeningen overtuigden hem ervan dat de storingen een periodiek karakter hebben, dat ze volledig door de zwaartekracht verklaarbaar zijn en dat het planetensysteem niet in elkaar zal storten. In zijn *Exposition du système du monde* (1796) vatte hij de onderzoeksresultaten van het voorbije tijdvak samen:

Het leek er aanvankelijk op dat [Jupiter en Saturnus] een uitzondering vormden op de wet van de universele gravitatie. Welnu, ze zijn er één van de meest frappante bewijzen van. Zo is het deze briljante ontdekking van Newton overkomen dat elke moeilijkheid die zich voordeed, voor haar het onderwerp van een nieuwe triomf geweest is, wat het zekerste kenmerk is van het ware systeem der natuur. (P.S. Laplace *Exposition du Système du Monde* (1796), IV, 11, in: *Oeuvres Complètes*, (Parijs, 1884), dl VI, p.223)

3.5 Newton contra Descartes

De opmerking van Laplace over het ‘ware systeem der natuur’ heeft alleen te maken met waarnemingen en berekeningen: hij was niet geïnteresseerd in een achterliggend mechanisme ter verklaring van de zwaartekracht. Dat was bij het verschijnen van de *Principia* heel anders. De belangrijkste natuurfilosofen, zowel cartesianen als Leibniz en zijn aanhangers, erkenden Newtons meesterschap in de mathematische boeken I en II. Zijn filosofie (fysica) in boek III konden ze echter niet accepteren, omdat hij geen



Afbeelding 3.2: Descartes verklaarde alle natuurverschijnselen door de contactwerking van materiedeeltjes. Ook de ruimte tussen de sterren was volgens hem geheel gevuld met deeltjes. In deze afbeelding stelt S de zon voor, D, E, L et cetera zijn de vaste sterren en de getallen 2-7 geven de baan van een komeet aan.

strikt mechanistische verklaring van de gravitatie had gegeven. En juist dat was voor hen een eis aan een deugdelijke natuurwetenschap die ze niet konden opgeven (vgl. par. 1.1 en 2.4).

Newtons critici verweten hem dat hij was teruggevallen in de nietszeggende terminologie van de middeleeuwse scholastiek, met zijn onherleidbare, occulte eigenschappen die aan elke plant, elke steen en elk geneesmiddel werden toegeschreven. Aan dit type verwerpelijke kwaliteiten was nu blijkbaar door Newton de gravitatie toegevoegd. Hij beschreef een krachtwerking op afstand (*actio in distans*), terwijl de mechanistische natuurfilosofie van Descartes en de zijnen alleen verklaringen van natuurverschijnselen accepteerde die gebaseerd waren op contactwerking van bewegende materiedeeltjes. Dat gold ook voor verschijnselen als magnetisme en zwaarte. Omdat Newtons gravitatiebeginsel het zonder mechanistische verklaring moest stellen, was het voor de mechanici een begrip zonder inhoud en dus per definitie niets anders dan een terugval in de middeleeuwse duisternis.

In zijn verweer wees Newton er telkens weer op dat hij met de term 'gravitatie' geen (niet-mechanistische) verklaring bedoelde te geven, maar slechts een voor ieder waarneembaar verschijnsel mathematisch wilde beschrijven. In het 'Scholium Generale' waarmee de tweede editie van de *Principia* (1713) wordt afgesloten, brengt hij dit als volgt onder woorden:

Tot dusver ben ik er echter niet in geslaagd de oorzaak van deze eigenschappen van de zwaarte uit de verschijnselen te ontdekken en hypothesen fantaseer ik niet [*hypotheses non fingo*]; want wat niet uit de verschijnselen is afgeleid, moet een hypothese genoemd worden en of ze nu metafysisch zijn of fysisch, of ze nu occulte eigenschappen betreffen dan wel mechanisch zijn, hypothesen horen in de experimentele natuurwetenschap niet thuis.

Niet alleen hier, maar ook elders neemt Newton scherp stelling tegen het ongelimiteerd gebruik van hypothesen. De vierde regel voor redeneren sluit hier naadloos bij aan. Toch heeft Newton zelf ook een breed scala aan hypothesen opgesteld. Ze zijn in hun

meest rijpe vorm te vinden in de *Opticks*, waar hij in een groot aantal ‘queries’ – in de uitgaven van 1704 en 1717 respectievelijk 16 en 31 – vragenderwijs allerlei vermoedens uit over uiteenlopende natuurverschijnselen (zie ook par. 2.5).

Met zijn ‘hypotheses non fingo’ bekritiseerde Newton dan ook niet het formuleren van hypothesen in het algemeen, maar het lukraak fantaseren van speculatieve uitspraken, zonder band met de waarneming. Juist de fysica van Descartes steunt in belangrijke mate op het wankel fundament van zulke hypothesen. Hij doet immers oncontroleerbare *a priori* uitspraken over vormen en afmetingen van onzichtbaar kleine materiedeeltjes. Al die vormen en groottes kunnen net zo goed verlegenheidsoplossingen worden genoemd als de verborgen kwaliteiten bij de scholastici. Het zijn deze *ad hoc* hypothesen, die een dwingende verklaring voorschrijven en niet op empirische feiten berusten, waar Newton niets van wilde weten. Dit soort fantasieën leidde in zijn ogen alleen maar tot systemen die op hersenschimmen zijn gebouwd.

Newtons kritiek betreft echter niet alleen dit facet van het cartesianisme: ze geldt het systeem van Descartes in zijn totaliteit. De achterliggende reden was dat hij ervan overtuigd was dat het systeem tot atheïsme leidde. De titel van Newtons hoofdwerk verraad al iets van zijn polemieek met Descartes. De Franse wijsgeer had zijn natuurfilosofische denkbeelden uiteengezet in zijn *Principia philosophiae* en daar stelde de Brit zijn eigen *Principia* tegenover: beginselen tegenover beginselen.

Ook de plaats die boek II inneemt in de *Principia* heeft met dit dispuut te maken. We hebben gezien dat Newton in boek I een theoretische, mathematische mechanica ontwikkelt en deze in boek III op het zonnestelsel toepast, zodat de vraag rijst waarvoor boek II dan eigenlijk dient. Ik wees er al op dat Descartes’ inzichten toonaangevend waren toen Newton zijn *Principia* schreef. Ze vormden een sta-in-de-weg voor de acceptatie van de gravitatie-theorie. Pas toen hij er in boek II in was geslaagd langs mathematische weg aan te tonen dat de werveltheorie van Descartes in strijd was met de astronomische verschijnselen, kon hij er in boek III zijn eigen gravitatie-theorie tegenover stellen. Met suc-

ces, want zo lovend als Laplace een eeuw later was over Newtons gravitatiewet, zo vernietigend was de Engelse astronoom William Herschel in 1785 over de werveltheorie van Descartes: hij betoogde dat ongebreidelde fantasie in de natuurwetenschap moet worden afgewezen, omdat verzonnen werelden zullen ‘verdwijnen als cartesiaanse wervels’.

Blijkbaar was Newton er veel aan gelegen definitief met Descartes' werveltheorie af te rekenen, want in het ‘Scholium Generale’ vatte hij zijn fysische bezwaren ertegen nog eens samen. Maar er zat meer achter. Toen Newton als student kennismakte met de werken van Descartes, werd hij voorgoed gewonnen voor de gedachte dat verschijnselen verklaard dienden te worden met behulp van bewegende deeltjes. De vraag was alleen hoe deze beweging tot stand komt. Het gangbare mechanisme stelde dat de beweging van een lichaam enkel en alleen het gevolg kan zijn van de beweging van andere lichamen – met andere woorden, dat beweging uitsluitend veroorzaakt wordt door contactwerking van deeltjes. Tegen deze opvatting had Newton van meet af aan grote bezwaren. Het was voor hem onvoorstelbaar dat de vormenrijkdom in de natuur zou zijn ontstaan uit altijd eender bewegende, passieve materiedeeltjes. Hetzelfde gold zijns inziens voor de warmteontwikkeling bij chemische reacties, voor magnetisme en diverse andere verschijnselen.

Bovendien raakte hij ervan overtuigd dat het feit dat materie en uitgebreidheid in het systeem van Descartes identiek zijn, gekoppeld aan het idee dat de verklaring van het hele natuurgebeuren uitsluitend op rekening komt van bewegende materiedeeltjes, de weg opende naar het atheïsme. Descartes had weliswaar in zijn *Principia philosophiae* een bewijs gegeven voor het bestaan van God, maar tegelijkertijd had hij betoogd dat de hele kosmos kon worden gededuceerd uit zijn beginselen over materie en beweging. Men hoefde alleen maar aan te nemen dat de Schepper in het begin deeltjes in beweging had gezet. De bewegingswetten deden de rest. Zodoende werd God in het cartesiaanse systeem in feite overbodig.

Voor Newton was dit – net als voor Pascal – volstrekt onaanvaardbaar. Elke speculatie over het ontstaan van het heelal

wees hij af als niet behorend tot het terrein van de fysicus. Uitgangspunt en arbeidsterrein van de natuurkundige is de voltooide kosmos, zoals God die geschapen heeft. Diens activiteit is echter met de schepping niet ten einde. Volgens het inzicht van Newton is Hij blijvend bij Zijn wereld betrokken. Descartes' dichotomie in uitgebreide en denkende substantie, in materie en geest dus, zorgde dat God ten onrechte van de stoffelijke wereld werd losgemaakt.

3.6 Alchemie en gravitatie

De moderne lezer vraagt zich wellicht af of we hier niet op het terrein van theologie en metafysica terechtgekomen zijn. In Newtons tijd waren de grenzen tussen de diverse gebieden van het denken echter veel vager dan tegenwoordig. Newton stelt zelfs uitdrukkelijk in zijn *Principia* dat het spreken over God tot de natuurwetenschap behoort. Juist de problematiek van de relatie tussen schepper en schepping was voor Newton de aanleiding om zich grondig in de alchemie te verdiepen: hij dacht daar antwoorden te vinden met betrekking tot in de natuur werkzame, door God gebruikte krachten.

Vanaf 1661 studeerde Newton aan Trinity College in Cambridge, maar vanwege de pest ging hij in 1665 terug naar zijn geboorteplaats Woolsthorpe. Op de boerderij waar hij geboren was, legde hij de grondslagen voor zijn baanbrekende werk op het gebied van de wiskunde, de optica en de mechanica. Toen hij in 1667 naar Cambridge terugkeerde, inmiddels in bezit van een grondige kennis van de denkbeelden en de verdiensten van de natuuronderzoekers van zijn tijd (Descartes, Galilei, Kepler, Boyle, Gassendi en anderen), begon hij met zijn alchemie-onderzoek, waarmee hij zich een groot deel van zijn leven intens heeft beziggehouden. Hier lag voor hem de sleutel voor het bewijs dat God permanent bij de materiële wereld betrokken was. De wereld was immers door 'Gods grote alchemie' in de schepping tot stand gekomen.

Gods bemoeienis met zijn schepping gold volgens Newton

niet alleen de materiële wereld, maar ook de morele. Vandaar dat hij zich rond 1670 ging verdiepen in de relatie tussen bijbelse profetieën en historische gebeurtenissen. Waar de alchemie het verhaal vertelde van Gods blijvende bemoeienis met de materiële wereld, deed de geschiedenis voor Newton hetzelfde met betrekking tot de morele wereld. Zoals een experiment hielp te beslissen tussen alternatieve theorieën over een natuurverschijnsel, konden historische feiten helpen bij het kiezen tussen verschillende interpretaties van profetische teksten. Bestudering van de kerkgeschiedenis bracht Newton tot de opvatting dat het christendom van zijn tijd, met name het geloof in de drie-eenheid, een verbastering was van het oorspronkelijke christendom. In een ver verleden waren zowel de ware godsdienst als de ware natuurfilosofie bekend geweest. Met zijn *Principia* meende Newton een bijdrage te hebben geleverd aan het herstel van de ware natuurfilosofie en daarmee ook aan het herstel van de ware religie, want ‘er is (althans buiten de openbaring om) geen weg om tot kennis van een Godheid te komen behalve door middel van de bouw van de natuur’.

Juist omdat natuurstudie ons God beter deed kennen, bleef Newton intensief zoeken naar de oorzaak van de gravitatie en spande hij zich tot het uiterste in om de kometen in zijn wereldstelsel in te passen. Maar vooral bleef hij zich intens met alchemie bezighouden. Tegelijk bestudeerde hij de bijbel, las hij de kerkvaders, onderzocht hij sacrale rituelen en beoefende hij de kerkgeschiedenis. Ten diepste vormen Newtons natuurwetenschappelijk, wiskundig, (kerk)historisch en theologisch werk, alsmede zijn onderzoek op het terrein van de alchemie, de numerologie en de harmonie, een eenheid. Ze dienen één doel: het herstel van de ware godsdienst, met name door de ware natuurwetenschap te herstellen, en het leveren van onomstotelijke bewijzen voor de rechtstreekse bemoeienis van God met de kosmos en de geschiedenis.

Diverse manuscripten leggen getuigenis af van Newtons belangstelling voor de alchemie, waaronder zijn *Notebook* dat een verslag bevat van chemische en alchemistische experimenten uit de periode van ca. 1670 tot 1695. Door deze experimenten raakte

Newton er steeds meer van overtuigd dat alle in de natuur optredende processen werden veroorzaakt door krachten. In diverse publicaties vinden we dat terug. In zijn 'An hypothesis explaining the properties of light' (1675) doet hij bijvoorbeeld de suggestie dat alle lichamen samengesteld zijn uit zekere etherische geesten of dampen, die in verschillende mate en in verschillende vormen gecondenseerd zijn. De kracht tot deze vorming en samenballing was in gang gezet door God, toen hij zijn schepselen het bevel gaf zich te vermenigvuldigen. Een van deze vermeende geesten is de ether (zie o.a. par. 6.1), die Newton onderscheidde in de *maine flegmatic body of aether* en de verschillende andere *aethereal spirits*, zoals elektrische en magnetische *effluvia* (uitvloeijsels) en het gravitatieprincipe. Een tweede geest, die zich volledig door de eerste verspreid heeft, is licht. En ether en licht werken onophoudelijk op elkaar in, zodat 'nature is a perpetual worker'. Ook in Newtons latere werk, als zijn denkbeelden meer gerijpt zijn, komen we soortgelijke uitingen tegen. Zo vinden we in de 'Queries' van de *Opticks* een groot aantal opmerkingen over allerlei interacties tussen lichamen, licht en ether.

De overtuiging dat alle in de natuur optredende processen door zulke krachten werden veroorzaakt, werd nog versterkt door wat Newton in de neoplatonische en stoïsche tradities vond. Evenals in de alchemie ontdekte hij daar de tegenpool van het cartesiaanse mechanisme: de wereld als levend organisme, tegenover de wereld als machine. De nadruk ligt ook in deze tradities op actieve beginselen die op de passieve materie inwerken.

Newton paste dit idee van in de natuur werkzame actieve krachten allereerst toe op de hemelverschijnselen. Het fundamentele probleem voor en na het schrijven van de *Principia* was voor hem: moet de zwaarte verklaard worden door middel van contactwerking van een of ander medium, zoals Descartes doet, is het een door God geschapen actief beginsel of staat God rechtstreeks in contact met de materie en bewerkt hij zo de zwaarte onmiddellijk? Vragen die hem zijn leven lang hebben beziggehouden. Alle drie de antwoorden heeft Newton overwogen, maar aangezien hij overtuigd was van de 'analogie van de natuur' voelde hij het meest voor de notie van de *active principles*, die in feite *divine*

principles zijn. Bij gravitatie, fermentatie, warmte, elektriciteit, prikkelgeleiding en magnetisme zijn actieve principes werkzaam, werktuigen waarmee God in contact staat met de materiële wereld.

Juist het feit dat Newton de enge mechanistische categorieën aanvulde met andere beginselen, die hij vooral aan de alchemie ontleende en die nauw met zijn theologische inzichten verbonden waren, baande de weg naar de niet-mechanistische gravitatie-theorie, waaraan hij zijn blijvende faam te danken heeft. Om het compact te zeggen: zonder alchemie en theologie geen gravitatie-theorie.

Gezien het bovenstaande is het begrijpelijk dat Leibniz en de cartesianen Newton beschuldigden van het herinvoeren van middeleeuwse, occulte eigenschappen. Toch is dit niet terecht. Newtons actieve beginselen stammen niet uit de scholastieke traditie, maar uit die van de natuurlijke magie, zoals die in het begin van de Renaissance werd geïmplementeerd. In de scholastiek betekende het invoeren van een occulte eigenschap van een ding alleen maar een poging de aristotelische gedachte in stand te houden dat er specifieke ‘vormen’ en ‘naturen’ van dingen bestaan, zonder dat er verder onderzoek naar plaatsvond. Zo zou opium slaapverwekkend zijn, omdat het een verborgen ‘virtus dormitiva’ (slaapverwekkend vermogen) zou bezitten. Daar bleef het bij. In de traditie van de natuurlijke magie van de Renaissance was echter de gedachte aan het bestaan van een of andere occulte kracht als oorzaak van een verschijnsel een stimulans om langs experimentele weg te pogen die oorzaak manifest te maken.

3.7 De ontvangst van Newtons denkbeelden

Newton's *Principia* markeerde zowel een eindpunt als een nieuw begin. Voor het eerst waren hemelverschijnselen (de planetenbeweging) en aardse fenomenen (zoals val en worp) in één theorie ondergebracht en daarmee was de definitieve synthese tussen beide werelden tot stand gebracht. Newton had daarbij – naar eigen zeggen – op de schouders van reuzen gestaan: Galilei, Kepler, Des-

cartes, Huygens en anderen. Hun werk had hij weerlegd, verbeterd, aangevuld en geperfectioneerd. Hun resultaten werden samen met zijn eigen vernieuwende inzichten tot een grootse synthese samengesmeed, die de mechanica niet alleen tot een zelfstandige wetenschap maakte, maar haar ook model deed staan voor alle natuuronderzoek. Newtons hoofdwerk verschafte een denkkader waarbinnen de natuurwetenschap zich de volgende twee eeuwen zou bewegen. In zijn voetspoor bouwde men in de achttiende eeuw niet alleen de hemelmechanica verder uit, zoals we al zagen, maar begon men ook verschijnselen te bestuderen die tot dan toe nog nauwelijks waren onderzocht of die men, ondanks de beschikbare empirische gegevens, nog niet mathematisch had kunnen behandelen. IJverig speurde men naar krachtwetten voor verschijnselen als magnetisme, elektriciteit, capillariteit en sterkteleer.

In Nederland was het newtonianisme reeds vroeg bekend, maar de eigenlijke doorbraak kwam in 1715, toen Boerhaave zijn reeds genoemde rede hield over het verkrijgen van zekerheid in de natuurkunde. Met name de hoogleraren Willem Jacob 's-Gravesande en Petrus van Musschenbroek hebben door hun natuurkunde-onderwijs in Leiden en Utrecht in de periode 1720-1760 een belangrijke bijdrage geleverd aan de verspreiding van het newtonianisme op het vasteland van Europa.

Wij zijn inmiddels al enkele eeuwen vertrouwd met het gravitatieprincipe, zodat we ons enerzijds niet meer kunnen voorstellen dat cartesianen en leibnizianen er een terugval in de middeleeuwse duisternis in zagen, maar anderzijds we ook niet meer kunnen navoelen wat een geweldige indruk de gravitatiewet maakte op de mensen uit het tijdperk van de Verlichting. De dichter Alexander Pope legt ons in een beroemd geworden distichon uit waarom:

Nature and Nature's laws lay hid in night;
God said: 'Let Newton be!' and all was light.

In deze twee regels zinspeelde hij blijkbaar niet alleen op Newtons belangrijkste natuurwetenschappelijke ontdekkingen, die op

het terrein van de mechanica ('nature's laws') en de optica ('all was light'). Hij bracht ook kernachtig het gevoel onder woorden dat vele achttiende-eeuwers hadden, namelijk dat met de grote Brit eindelijk de eeuw van het licht was aangebroken. Voltaire deed voor Pope niet onder toen hij in een gedicht aan de cherubijnen rond Gods troon vroeg of ze niet jaloers waren op de grote Newton. De Brit was voor hem de werkelijke initiator van de Verlichting, bij wie zelfs beroemde staatslieden en veroveraars ineenschrompelden tot figuren in een schelmengalerij.

De grote belangstelling die men in de achttiende eeuw had voor de natuurwetenschappen, niet alleen onder geleerden, maar ook onder de (gegoede) burgerij, is voor een niet onbelangrijk deel aan Newton te danken. Van de vele genootschappen die in de achttiende eeuw werden opgericht, was er een aantal uitsluitend gewijd aan de beoefening van de natuurwetenschappen, waarbij vooral optische en elektrostatische proeven en experimenten met de luchtpomp erg gewild waren. Bij de hogere standen kwamen ook de dames onder de indruk van de natuurwetenschap. De bellettrie op hun salontafels maakte in vele gevallen plaats voor Francesco Algarotti's *Il Newtonianismo per le Dame* (1737), dat zeven drukken telde en vertaald werd in het Frans, Engels en Nederlands. De volledige Nederlandse titel van dit werk luidt *De Newtoniaansche Wysbegeerte voor de vrouwen, of samenspraaken over het Licht, de Kleuren en de Aantrekkingskragt*. In dialoogvorm wordt een markgravin onderwezen in de fysica van Newton, 'deze Goddelijke man, die voor de grontlegger der wetenschappen kan gehouden worden'. Het kon nog bonter: in 1796 stelde Champlain de la Blancherie voor de kalender zo te wijzigen dat Newtons geboortejaar 1642 het jaar 1 zou zijn, terwijl zijn huis in Woolsthorpe een soort heiligdom moest worden.

Newton's *Principia* is geen gemakkelijke lectuur. Ook in 1687 waren slechts weinigen in staat het boek volledig te begrijpen. Desondanks heeft het werk, vooral vanwege de gravitatiewet en het succes van de empirisch-mathematische methode binnen de natuurwetenschap, een uitstraling gehad die veel verder reikte dan de natuurwetenschap – hoe ruim men dat begrip ook interpreteert. De Europese cultuur van de achttiende eeuw is er in al

haar geledingen diepgaand door beïnvloed. Velen werden erdoor geïnspireerd Newtons succesvol gebleken methode op alle mogelijke terreinen buiten de natuurwetenschappen toe te passen. Dat gebeurde in de theologie, de letteren, de filosofie, de fysiologie en de economie. Het optimisme van Pope en Voltaire werd door velen gedeeld. De mensheid had nu blijkbaar de sleutel in handen die de deur zou openen naar het welzijn van de mensheid. Dezelfde genialiteit van de menselijke geest die in staat was de wetten van de natuur te ontdekken, zou aan de hand van dezelfde methoden ongetwijfeld ook in staat zijn de wetten van de samenleving bloot te leggen. Dat maakte Newton tot boegbeeld van vele Verlichtingsdenkers.

Dat was dan wel de Newton zoals men hem graag zag: een positivist *avant la lettre*, die zich weliswaar jammer genoeg ook met theologie en alchemie had beziggehouden, maar dat was pas op zijn oude dag, nadat hij ten gevolge van een mentale inzinking in 1693 zijn scheppende geest verloren had. Dit Newton-beeld is in de twintigste eeuw, vooral door grondige bestudering van de vele beschikbare manuscripten, radicaal gewijzigd, en juist daardoor raakten velen opnieuw gefascineerd door de mathematicus, fysicus, chemicus, theoloog, (kerk)historicus, alchemist en magiër en niet te vergeten de méns Isaac Newton. Naar mijn mening verdient Newton, die in een gravure van G. Bickham uit 1732 is afgebeeld als een zon in het brandpunt van de ellipsbanen van de planeten eromheen, een even zorgvuldige behandeling in de geschiedenisboeken als zijn Franse tijdgenoot Lodewijk xiv, bekend als de zonnekoning. Al was het alleen maar vanwege het fascinerende onderzoeksprogramma waaraan deze laatste der Renaissance-magiërs met niet-aflatende inspanning soms dag en nacht gewerkt heeft: het ontraadselen van de kosmische mysteries en het onthullen van de ene, ultieme en ondeelbare waarheid over God, de geschiedenis en de natuur.

Aanbevolen literatuur

Voor dit hoofdstuk heb ik vooral gebruik gemaakt van twee arti-

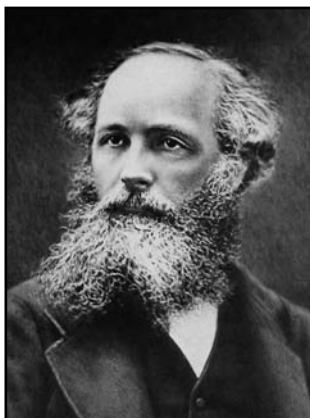
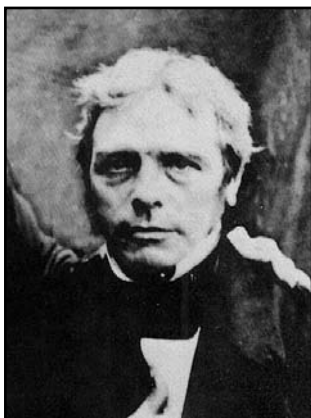
kelen van mijn hand, namelijk 'Isaac Newton' in: *De eeuwwende 1700*, deel 1: *Filosofie en natuurwetenschappen* (Utrecht, 1991), pp.69-107, en 'De newtoniaanse kosmos' in: *Chaos*, CWI Syllabus 41 (Amsterdam, 1996), pp.19-45.

Werken van Newton zelf:

- I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica* (London 1687¹, Cambridge 1713², Londen 1726³). Van dit werk zijn verschillende uitgaven en vertalingen verschenen. De meest recente is: I.B. Cohen en A. Whitman (red.), *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy* (Berkeley / Los Angeles, 1999).
- I. Newton, *Opticks: or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*, (London, 1704¹, 1731⁴); herdruk van de vierde editie met uitvoerige inleiding van I.B. Cohen (New York, 1931, 1952).

Meer informatie over Newton is te vinden in:

- H.J.E. Beth, *Newton's 'Principia'*, twee delen (Groningen/Batavia, 1932).
 - B.J.T. Dobbs, *The Janus faces of genius: The role of alchemy in Newton's thought* (Cambridge, 1991).
 - J. Fauvel e.a. (red.), *Let Newton be! A new perspective on his life and works* (Oxford, etc., 1988).
 - P. van der Hoeven, *Newton, een inleiding tot zijn wijsgerige inzichten* (Baarn, 1979).
 - R.S. Westfall, *Never at rest: A biography of Isaac Newton* (Cambridge, 1980).
 - M. White, *Isaac Newton, The last sorcerer* (London, 1997).
- <http://www.newtoniana.freemove.co.uk/>



4

*Faraday, Maxwell en de theorie
van het elektromagnetisme*

Harry Snelders

Al in de Oudheid was bekend dat magneetsteen een aantrekkende kracht uitoefent op ijzer, en gewreven barnsteen op lichte voorwerpen als kaf en haar. Toch kregen elektrische verschijnselen – in tegenstelling tot magnetische – nauwelijks aandacht tot de achttiende eeuw. In die eeuw nam het onderzoek van elektrostatische aantrekking en afstoting een hoge vlucht. ‘Elektrostatisch’ wil zeggen het onderzoek van elektrische ladingen in rust, die worden voortgebracht door wrijving of inductie. Men begon zich ook af te vragen of er een verband bestond tussen elektriciteit en magnetisme, en zo ja welk.

Nadat de Italiaanse fysicus Alessandro Volta op 20 maart 1800 de ontdekking van stromende elektriciteit bekend had gemaakt in een brief aan de president van de Royal Society te Londen, ontwikkelde de leer van de elektriciteit zich bijzonder snel. Een eerste hoogtepunt was het jaar 1820: de Deense fysicus en chemicus Hans Christian Oersted ontdekte op 20 juli dat een elektrische stroom een magneetnaald van richting doet veranderen en toonde hiermee het verband aan tussen elektriciteit en magnetisme. Blijkbaar waren elektrische stroom en magnetisme gelijkwaardige ‘vloeistoffen’. Dan zouden ook twee elektrische stromen op soortgelijke wijze op elkaar moeten inwerken. Dit

veronderstelde de Franse fysicus André-Marie Ampère, die het ook wist aan te tonen in september 1820. Twee jaar later vond hij voor de krachtwerking tussen twee elektrische stromen een omgekeerde kwadratenwet: de kracht die twee stroomelementjes op elkaar uitoefenen, is evenredig met het product van de hoeveelheden elektriciteit en omgekeerd evenredig met het kwadraat van hun afstand. Hij sprak van een elektrodynamische wet, omdat we hier te maken hebben met bewegende en niet met rustende elektriciteit.

Ampères elektrodynamische wet had eenzelfde vorm als Newtons gravitatiewet (zie par. 3.4), volgens welke de aantrekkende kracht tussen twee lichamen recht evenredig is met hun massa's, omgekeerd evenredig met het kwadraat van hun afstand en gericht langs de verbindinglijn tussen de lichamen. Het grote probleem was dat de kracht bij de proeven van Oersted en Ampère niet werkte in de richting van de verbindinglijn tussen de op elkaar werkende lichamen, maar loodrecht erop! De ontdekking van Oersted wekte niet alleen grote verbazing vanwege het verrassende verband tussen elektriciteit en magnetisme, maar meer nog vanwege de richting van de krachtwerking op de magnetische polen. De Newtoniaanse traditie schreef immers afstands-krachten voor die werken langs de verbindinglijn van de volume-elementjes van de wisselwerkende lichamen. De kracht op de magneetpolen zou dan gelegen moeten zijn in hetzelfde vlak als de stroomdraad en de magneetpool en niet, zoals Oersted vond, loodrecht op dat vlak.

Dit probleem werd in Engeland opgepakt door Michael Faraday, wiens werk later werd geformaliseerd door de Schot Maxwell. In dit hoofdstuk zullen we ons beperken tot de bijdragen van deze twee hoofdfiguren uit de geschiedenis van het negentiende-eeuwse elektromagnetisme.

4.1 Michael Faraday (1791-1867) **Een experimentator van formaat**

Michael Faraday was een geniaal experimentator. Hij werd gebo-

ren op 22 september 1791 in Newington Butts, een zuidelijke buitenwijk van Londen, als zoon van een hoefsmid. Hij was lid van de Sandemans, een kleine religieuze sekte die de *King James*-bijbel letterlijk interpreteerde en ouderlingen had in plaats van priesters. Zij lezen de bijbel zonder enige interpretatie. De diep religieuze Faraday deed hetzelfde met het boek van de natuur. Ook dat moest men direct lezen, zonder enige theoretische interpretatie. Het manipuleren van getallen die afkomstig zijn uit de natuur, was volgens hem het vernietigen van hun natuurlijke betekenis. Voor Faraday was het experiment de meest volmaakte methode om de natuur te onderzoeken.

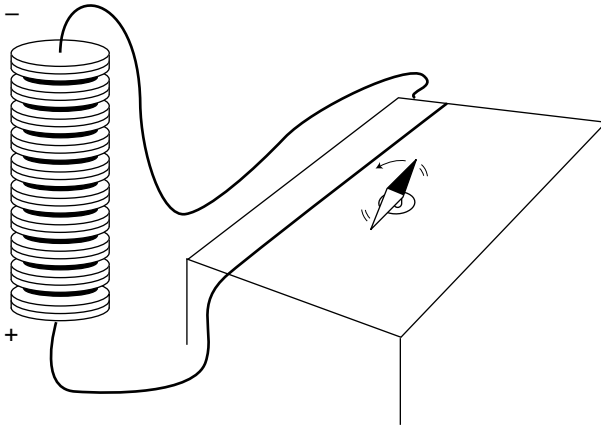
Faraday werd op dertienjarige leeftijd loopjongen in een boekwinkel en een jaar later leerling-boekbinder. Door het lezen van wetenschappelijke boeken die hij in moest binden, kreeg hij spoedig grote belangstelling voor de natuurwetenschappen. In 1813 werd deze autodidact laboratoriumassistent van de toen beroemde chemicus Sir Humphry Davy. Hij volgde deze in 1825 op als directeur van het laboratorium van de Royal Institution in Londen, waar hij in 1833 Fullerian professor in de chemie werd. (De leerstoel was genoemd naar de excentrieke parlementariër en filantroop John Fuller, die de lezingen van Faraday had bijgewoond.)

Faraday was een chemicus wiens werk een omwenteling teweegbracht in de fysica – een omwenteling die direct leidde tot de klassieke veldtheorie en later tot de relativiteitstheorie. Vanaf september 1820 hield hij een dagboek bij. Het bevat al zijn onderzoeken, zonder onderscheid tussen fysische onderzoeken en chemische analyses en syntheses. Hij wist chloorgas vloeibaar te maken (1823), verkreeg benzeen en buteen bij de destillatie van vette olie (1824) en hield zich bezig met de fabricage van roestvrije staalsoorten (1820-1822) en van glas met bepaalde optische eigenschappen (1829). Overdag deed Faraday zijn proeven; 's avonds schreef hij de resultaten ervan op in zijn dagboek. Vanaf november 1831 publiceerde hij in de *Philosophical Transactions* van de Royal Society een serie artikelen die later werd gepubliceerd als de *Experimental Researches in Electricity*. Faraday overleed in Londen op 25 augustus 1867, bijna 76 jaar oud.

4.2 Op zoek naar elektrodynamische inductie

Oersted had jarenlang doelbewust gezocht naar het verband tussen elektriciteit en magnetisme. Zijn zoektocht had te maken met het feit dat hij, onder invloed van de Duitse *Naturphilosophie*, op wijsgerige gronden overtuigd was geraakt van de eenheid van alle natuurkrachten. Hij constateerde dat er rond een geleidende draad die was aangesloten op een zuil van Volta (een kolom van plaatjes koper of zilver en plaatjes zink, gescheiden door in zoutoplossing gedrenkte stukjes karton of vilt) ‘wervels’ ontstonden: een magneetnaald had de neiging zich te richten langs de raaklijn van een cirkel rond de draad (zie afbeelding 4.1).

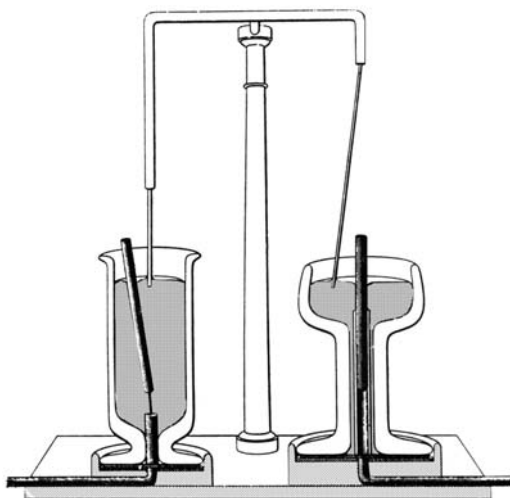
Nadat de ontdekking van Oersted bekend was geworden, herhaalden Davy en Faraday de proeven in hun laboratorium. In september 1821 toonde Faraday met elektromagnetische rotatieproeven aan dat de werking van de stroom in gesloten cirkels om de draad verloopt. Hij nam twee vaten gevuld met kwik, met in het ene vat een onbeweeglijke draad en een beweeglijke magneet en in het andere vat een onbeweeglijke magneet en een beweeg-



Afbeelding 4.1: Oersted ontdekte magnetische ‘wervels’ rond een draad waar stroom doorheen ging.

lijke draad. Als de stroom van een galvanische batterij door de draad liep, raakte de magneet in het ene vat in een blijvende rotatie, terwijl in het andere vat de draad blijvend om de magneet roteerde (zie afbeelding 4.2). Het experiment met de bewegende draad (het omgekeerde Oersted-effect) was niet wezenlijk nieuw, maar het bevatte wel het principe van de elektromotor (de omzetting van elektrische in mechanische energie), alsmede het eerste idee van krachtlijnen. Faraday dacht, net als Oersted, in termen van cirkelvormige krachten rond stroomvoerende draden.

Vervolgens ging Faraday op zoek naar de elektrodynamische analogie van de in de achttiende eeuw ontdekte elektrostatische *inductie*. Daarbij veroorzaakt een geladen lichaam een elektri-



Afbeelding 4.2: Faradays experimenten waarmee hij naast het Oersted-effect ook het omgekeerde Oersted-effect aantoonde.

Links: Een bak met kwik met een onbeweeglijke draad en een beweeglijke magneet. Zolang er een stroom door de draad loopt, blijft de magneet ronddraaien.

Rechts: Een bak met kwik met een beweeglijke (stijve) draad en een onbeweeglijke magneet. Zolang er een stroom door de draad loopt, blijft deze rond de magneet draaien.

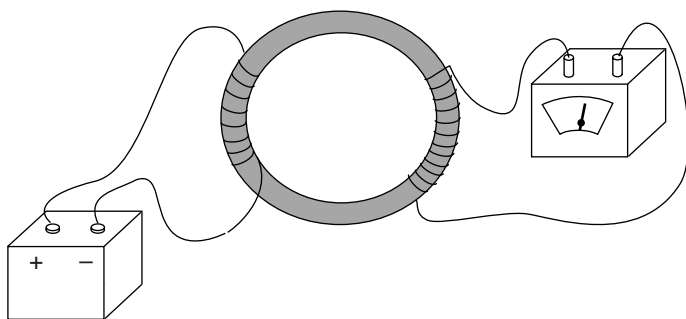
sche lading in een geleidend object waar het dichtbij is maar niet mee in aanraking. Faraday ging uit van een reciprociteitsbeginsel: als een elektrische stroom een magnetische naald deed bewegen (Oersted), kon dan niet ook een bewegende magneet een elektrische stroom opwekken? Hij hanteerde daarbij verder een analogiebeginsel: een elektrisch geladen lichaam kan in een ander, niet geladen lichaam een (statische) elektrische lading oproepen. Een magneet is in staat een stuk weekijzer tijdelijk magnetisch te maken. Men mocht verwachten dat een elektrische stroom in staat is om in een naburige keten van geleiders, waarin geen stroomelement is opgenomen, door inductie een stroom op te wekken. Faraday zag elektriciteit niet als een substantie die door een draad vloeit, maar als een toestand van de materie. Voor hem was inductie dan ook iedere beïnvloeding van de toestand van een lichaam door een naburig lichaam. Als een draad verbonden wordt met de uiteinden van een galvanische batterij, dan worden de deeltjes ervan, in Faradays visie, in een bijzondere toestand gebracht. Vanaf 1822 deed hij talrijke experimenten om te bewijzen dat een elektrische stroom een stroom kan induceren in een naburige geleider. Het lukte hem pas in 1831 dit aan te tonen.

Omdat voor Faraday de magnetische werking van elektrische stroom een inductieverschijnsel was, verwachtte hij dat in een geleider die geplaatst is in de werkingsfeer van een stroomvoerende geleider zonder ermee verbonden te zijn, door magnetisme van de eerste stroom een nieuwe stroom zal worden geïnduceerd. En als consequentie hiervan verwachtte hij dat elektriciteit kan worden opgewekt met behulp van gewone magneten, die immers eenzelfde magnetisch veld om zich hebben als een stroomvoerende solenoïde (een schroefvormige draadklos).

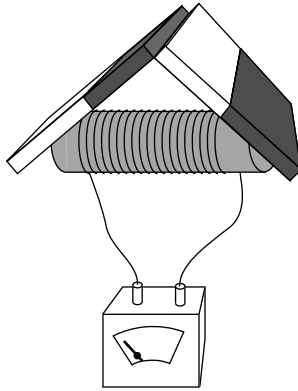
Bij zijn eerste proeven lette Faraday aanvankelijk alleen op het eindresultaat. Als een sterke magneetpool in de buurt werd gebracht van een stroomvoerende draadklos, zag hij geen verandering in de stroomsterkte, en ook niet als de magneet in de klos werd gebracht (28 december 1824). Als bij twee evenwijdige koperdraden door de ene een stroom liep, gaf dat in de andere geen uitslag van een stroommeter (galvanometer) (november 1825). Pas

op 29 augustus 1831 ontdekte Faraday het elektromagnetisch inductieverschijnsel. Hij omwikkelde de helften van een weekijzeren ring ieder met een lang stuk draad: respectievelijk 7,3 en 9,1 meter koperdraad, geïsoleerd met was. De ene draadklos werd verbonden met een batterij (primaire keten); in de andere (secundaire keten) werd een galvanometer geplaatst, zoals in afbeelding 4.3. Faraday verwachtte dat de elektrische stroom in de primaire keten een stroom zou opwekken in de secundaire. Hij vond echter dat de stroom alleen ontstond op het moment van het sluiten of het verbreken van de stroom, dus bij het veranderen van de sterkte van de stroom. Omdat het effect gering was en bovendien onverwacht, ontdekte Faraday het pas toen hij zulke lange einden koperdraad gebruikte.

Het verkregen effect werd door Faraday in de komende maanden op allerlei manieren onderzocht. Op 24 september 1831 plaatste hij twee staafmagneten met hun ongelijke polen tegen elkaar. Tussen de andere uiteinden van de staafmagneten, die op het tafelblad rustten, plaatste hij een weekijzeren kern met een spoel eromheen (zie afbeelding 4.4). Bij het verbreken of aanbrengen van het magnetische contact tussen de twee staafmagneten liep er een stroom door de spoel. Op 17 oktober 1831 deed Faraday een proef waarbij een koperdraad gewonden was in de vorm van een



Afbeelding 4.3: De opstelling waarmee Faraday elektromagnetische inductie ontdekte in 1831.



Afbeelding 4.4: Een van de proeven waarmee Faraday het inductiever- schijnsel onderzocht. Als het contact tussen de twee magneten bovenaan wordt verbroken of aangebracht, loopt er een stroom door de draad.

spoel en de uiteinden verbonden met een galvanometer. Door de spoel werd een staafmagneet gestoken en er weer uit getrokken. De galvanometernaald gaf geen uitslag wanneer de magneet in de spoel in rust was. Maar op het moment dat de magneet uit de spoel werd getrokken, gaf de galvanometer een uitslag en bij het insteken eveneens, alleen dan in tegengestelde richting. Wordt een magneet dus in de nabijheid van een stroomkring bewogen, dan ontstaat er een stroomstoot waarvan de richting afhangt van de bewegingsrichting van de magneet. Op 24 oktober 1831 herhaalde Faraday een experiment van de Franse natuurkundige Dominique Jean François Arago uit 1824. Hij liet een koperen schijf draaien tussen de polen van twee staafmagneten. Aan de zijkant van de schijf werden koperdraden bevestigd waarvan de uiteinden verbonden waren met een galvanometer. Gedurende de rotatie van de koperen schijf bleef er een continue stroom lopen. Faraday had dus een dynamo gebouwd; hij noemde zijn apparaat een ‘magneto-elektrische machine’.

Met zijn proeven had Faraday aangetoond dat een verandering in het magnetische veld (als gevolg van de beweging van een magneet en een geleider ten opzichte van elkaar – zie ook

par. 6.3) de oorzaak is van de geïnduceerde elektrische stromen. Op 24 november 1831 kon Faraday aan de Royal Society zijn beroemde verhandeling *On the Induction of Electric Currents* voorleggen.

Faraday had dus gevonden dat een magneet een elektrische stroom kan opwekken (induceren) en dat een stroom die door een draad loopt in een andere draad een stroom kan induceren. Een merkwaardige ontdekking. Faraday verwachtte namelijk een inducerende werking van stromen en magneten die – zoals we achteraf weten – in de natuur niet voorkomt: hij zocht naar een blijvende inductiestroom. Hij kreeg iets geheel anders: hij vond dat de inductiestroom alleen ontstaat bij verandering van de stroomsterkte of de plaats van de magneet. Kennelijk was dit bij alle eerdere proeven aan zijn aandacht ontsnapt, hetzij door onvoldoende gevoeligheid van de galvanometer, hetzij door de kortstondigheid van het verschijnsel.

De elektrodynamische wet van Ampère, die de krachtwerking tussen twee stroomelementjes aangaf als functie van de stroomsterktes en de onderlinge afstand van de elementjes, was net als de gravitatiewet van Newton een wiskundige formulering van de waargenomen werkingen. Ampère gaf geen mechanisch model om de verschijnselen te verklaren, maar paste *actio in distans* toe – de werking op afstand, uitgeoefend door krachtcentra, die was ontleend aan de gravitatieleer (zie par. 3.5). Dit begrip, dat pas na veel aarzeling in de achttiende eeuw in het heersende mechanistische wereldbeeld was opgenomen maar inmiddels als enig denkbare gold, was van de gravitatiekracht uitgebreid tot de elektromagnetische werking.

Faraday had een geheel andere benaderingswijze. Hij was als autodidact te weinig wiskundig geschoold en hij begreep de wiskundige benadering van de Franse fysicus niet. Hij verwierp afstandswerking, gebruikte juist wel contactkrachten en wilde een concrete voorstelling hebben van wat er gebeurt. Zo kwam hij tot zijn veldtheorie als aanschouwelijke voorstelling van de elektromagnetische werking.

4.3 **Krachtlijnen als verklaring voor elektromagnetische inductie**

Faraday bleef geloven dat wanneer een geleidende keten wordt opgesteld in de nabijheid van een elektrische stroom of een magneet, er een door inductie opgewekte stroom moet ontstaan. Deze treedt echter niet op. Nemen we de inducerende oorzaak weg, dan verwachten we geen inductiestroom, maar dan treedt ze juist wel op.

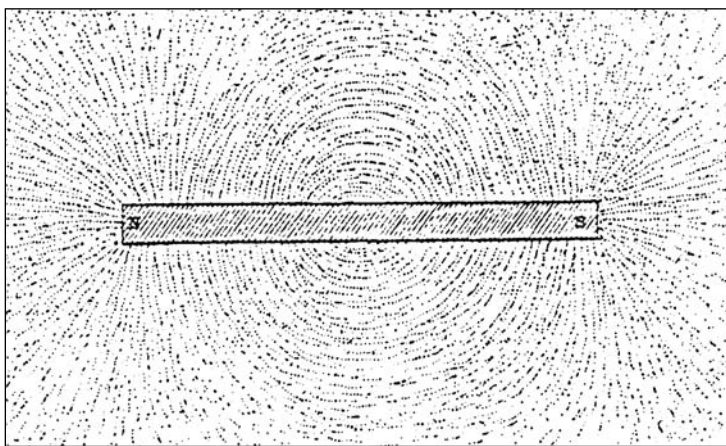
Faraday nam nu aan dat er in de geïnduceerde draad onder invloed van de inducerende stroom of magneet een bijzondere toestand van de materie van de geïnduceerde geleider ontstaat, de zogenaamde *elektrotonische* toestand. Deze openbaart zich in het uitblijven van de inductiestroom als ze verwacht wordt en omgekeerd. Faraday hield dus vast aan zijn oorspronkelijke denkbeeld: een stroom of een magneet kan inductie veroorzaken in een gesloten draadkring, en men mag een voortdurend geïnduceerde stroom verwachten. Dat deze niet optreedt, verklaart hij met de bijzondere toestand die de geïnduceerde geleider aanneemt. Alleen in de korte tijden dat de elektrotonische toestand bezig is te ontstaan of te verdwijnen, is het eigenlijk permanent bestaande inductieverschijnsel waarneembaar.

Faraday deed vergeefse pogingen om de elektrotonische toestand aan te tonen. Toch bleek zijn foutieve hypothese vruchtbaar: hij voorspelde er een nieuw natuurverschijnsel mee. Wanneer de stroom in een gesloten keten naburige geleiders elektrotonisch kan maken, dan moet hij die ook in zijn eigen kring teweeg kunnen brengen. Verbreken we de stroom, dan moet dat een inductiewerking tot gevolg hebben. Hiermee voorspelde Faraday in 1834 het merkwaardige verschijnsel van de zelfinductie (inductie door een geleider op zichzelf uitgeoefend bij verandering van stroomsterkte), die overigens al in 1829 door de Amerikaanse fysicus Joseph Henry was waargenomen.

Spoedig kwam Faraday met zijn verklaring van de inductieverschijnselen: de ruimte rond een magneet en rond een stroomvoerende draad bevat magnetische *kraftlijnen*, waarvan de raaklijn in ieder punt de richting van de magnetische veldsterkte

aangeeft (1832). Als een geleider in de nabijheid van een magneet beweegt, dan 'snijdt' hij een zekere hoeveelheid van deze krachtlijnen en er gaat een elektrische stroom in de geleider lopen. Oorspronkelijk waren de magnetische krachtlijnen voor Faraday een aanschouwelijk hulpmiddel voor de beschrijving van zijn experimentele resultaten. Maar al gauw was hij overtuigd van de fysische realiteit ervan. Hij beriep zich op proeven met ijzervijsel rond een magneet (zie afbeelding 4.5). In feite identificeerde Faraday de elektrotonische toestand van een geleider met het omvatten van een magnetische krachtstroom door die geleider.

Faraday vond dat de elektrische en magnetische werkingen zich voortplanten langs gebogen elektrische en magnetische krachtlijnen. Het feit dat krachtlijnen gebogen kunnen zijn, was voor hem een aanwijzing van de onjuistheid van de theorie van de afstandswerking (*actio in distans*), die immers rechtlijnig zou



Afbeelding 4.5: Het krachtlijnenpatroon rond een magneet kan zichtbaar worden gemaakt met ijzervijsel.

moeten verlopen, zoals dat bij de gravitatiekracht het geval is. Volgens hem ondergaat de ruimte rondom een elektrisch of magnetisch geladen lichaam een fysische verandering door de lading. De ruimte is geheel gevuld met krachtlijnen. (In feite deed Faraday hiermee een poging de ether uit te schakelen of althans te vervangen door krachtlijnen.) Ook onderzoek naar de invloed van dielektrica (niet-geleiders) bood aanwijzingen voor zijn visie.

4.4 De eenheid der natuurkrachten

Bij zijn onderzoekingen werd Faraday geleid door een metafysisch en zelfs theologisch geloof in de eenheid van alle natuurkrachten en in de omzetting van de ene natuurkracht in de andere. Voor hem waren elektriciteit, magnetisme, warmte, licht en ook gravitatie ‘verschillende uitingen van één en dezelfde fundamentele kracht’. In 1833 had Faraday met zijn elektrolysewetten het verband tussen elektriciteit en chemie aangetoond. Al in 1822 vermoedde hij dat er een verband tussen licht en elektriciteit en magnetisme moest zijn. Pas in 1845 kon hij aantonen dat bij doorgang van gepolariseerd licht door ‘zwaar glas’ (loodsilicaatglas), geplaatst tussen de polen van een elektromagneet, het polarisatievlak gedraaid werd met een maximum als de lichtstraal in de richting van de magnetische krachtlijnen liep (het zogeheten Faraday-effect). De elektrische stroom staat dus in verband met licht, warmte, mechanische en chemische effecten.

Het was reeds gelukt om voor het geluid, de warmte en het licht een mechanistische verklaring te geven (voor het laatste met moeite – zie par. 2.2 tot 2.4). Dit moest men nu proberen voor de elektriciteit. In 1860, na de ontdekking van de spectraalanalyse door de Duitse fysicus Gustav Robert Kirchhoff en de chemicus Robert Wilhelm Bunsen, zou Faraday proberen de beïnvloeding van spectraallijnen door een magneetveld aan te tonen. Door het te geringe oplossend vermogen van de gebruikte spectrometer mislukte zijn poging. Het zou tot 1896 duren eer de latere Amsterdamse hoogleraar Pieter Zeeman erin zou slagen het verband tussen spectraallijnen en het magnetisme aan te tonen.

Faraday probeerde zelfs de omzetting van gravitatie in elektriciteit of warmte en omgekeerd aan te tonen. Pogingen die vanaf 1850 werden uitgevoerd mislukten, net zoals de latere poging van Albert Einstein om de gravitatie en de elektrodynamica in één systeem samen te vatten (zie hoofdstuk 7). Nog steeds is de unificatie van deze gebieden niet gelukt. Op 28 november 1850 hield Faraday een voordracht voor de Royal Society: 'On the possible relation of Gravity to Electricity'. Daarin begon hij met vast te stellen:

De lange en voortdurende overtuiging dat alle natuurkrachten wederzijds afhankelijk zijn, een gemeenschappelijke oorsprong hebben, of liever verschillende uitingen zijn van één enkele fundamentele kracht, heeft mij dikwijls aan de mogelijkheid doen denken om door het experiment een verband tussen zwaartekracht en elektriciteit vast te stellen, en aldus de eerstgenoemde in de groep onder te brengen waarvan de reeks, die ook magnetisme, chemische kracht [= energie] en warmte bevat, zoveel en zulke gevarieerde uitingen van kracht [= energie] door gemeenschappelijke betrekkingen tezamen bindt.

Maar aan het eind van zijn artikel moest hij vaststellen:

Hier eindigen voor het ogenblik mijn proeven. De resultaten zijn negatief. Ze schokken mijn sterke gevoel van het bestaan van een verband tussen zwaartekracht en elektriciteit niet, hoewel ze geen bewijs geven dat zo'n verband bestaat.

Faraday was geen wiskundige. Hij bezat een instinctieve speurzinn voor het wezenlijke en voor de samenhang van de verschijnselen, die de grote onderzoeker kenmerkt. Zijn ontdekking van de elektromagnetische inductie was een van de grootste doorbraken in de vorige eeuw op het gebied van de zuivere wetenschap en op het gebied van de elektromagnetische theorie. Ze werd de basis waarop Maxwell zijn elektromagnetische theorie bouwde, de allesomvattende theorie van het elektromagnetische veld. In het

voorwoord van zijn *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873) schreef Maxwell:

Misschien moet men het als een voor de wetenschap gunstige omstandigheid aanmerken dat Faraday, hoewel volkomen vertrouwd met de begrippen ruimte, tijd en kracht, toch geen eigenlijke wiskundige was. Zodoende kon hij niet aan de verleiding ten prooi vallen zich door allerlei belangwekkende, maar zuiver mathematische onderzoeken te laten meeslepen. Ook lag het hem verre zijn resultaten in wiskundige formules in te kleden, noch in zulke als door de wiskundigen van zijn tijd goedgekeurd werden, noch in zulke die hun kritiek zouden hebben opgeroepen.

Maxwell zelf had zijn werk

juist ondernomen in de hoop dat het mij zou gelukken aan de ideeën en methoden van Faraday hun wiskundige uitdrukking te verschaffen.

In 1845 deed William Thomson (de latere Lord Kelvin, zie par. 5.3 en hoofdstuk 6) een eerste poging de ideeën van Faraday in een wiskundige vorm te gieten. Hij ontwikkelde mechanische modellen voor Faradays krachtlijnen met behulp van een elastisch medium (ether) dat de gehele ruimte vult. Thomson zag in dat zijn modellen de fysische werkelijkheid niet volledig konden uitdrukken, maar meende dat er een belangrijk element van fysische waarheid in school. Thomsons werk vormde een wiskundige inspiratie voor Maxwell. Ook deze maakte gebruik van een reeks mechanische modellen als hulpvoorstellingen, die hij stap voor stap liet varen totdat de theorie in zuivere wiskundige vorm gereed was.

James Clerk Maxwell (1831-1879)

James Clerk Maxwell werd op 13 juni 1831 geboren in Edin-

burgh. Hij studeerde wiskunde en natuurkunde aan de universiteit van Edinburgh en sloot zijn studie in 1854 in Cambridge af. In 1856 werd hij hoogleraar natuurkunde aan het Marishal College in Aberdeen en van 1860-1865 was hij verbonden aan King's College in Londen. Hier formuleerde hij zijn theorie van het elektromagnetische veld. Wegens gezondheidsredenen legde hij zijn ambt neer en schreef als privégeleerde op zijn landgoed Glenlair in Schotland zijn beroemde boek *A Treatise on Electricity and Magnetism*, dat werd gepubliceerd in 1873. Vanaf 1871 was Maxwell hoogleraar natuurkunde in Cambridge. Hij stierf op 8 november 1879 in Cambridge aan maagkanker, slechts 48 jaar oud.

Was Faraday de grootste experimentele fysicus van de negentiende eeuw, Maxwell was de grootste theoreticus. Hij was de grondlegger van de moderne theorie van de elektriciteit en bovendien een van de grondleggers van de thermodynamica en de statistische mechanica (zie par. 5.5).

4.5 Een fysisch model voor Faradays krachtlijnen

Hierboven werd al aangegeven dat Faraday zijn krachtlijnen beschouwde als realiteiten met fysische eigenschappen. Deze veronderstelling was het uitgangspunt voor Maxwell. Ook hij geloofde in de fysische realiteit van de krachtlijnen, in tegenstelling tot veel van zijn tijdgenoten die de lijnen slechts beschouwden als wiskundige hulpmiddelen. Zij namen *actio in distans* aan, waardoor elektriciteit te vergelijken was met gravitatie (zie par. 3.5), en konden dan ook geen mechanische analogieredeningen op elektrische verschijnselen toepassen. Voor contactkrachten daarentegen zijn krachtlijnen nodig en bestaat er wel de mogelijkheid van mechanische analogiemodellen.

Op 10 december 1855 en 11 februari 1856 sprak Maxwell voor de Cambridge Philosophical Society 'On Faraday's Lines of Force', waarin hij een fysisch model voor de krachtlijnen beschreef.

Teneinde fysische ideeën te krijgen zonder een fysische theorie aan te nemen, moeten we ons vertrouwd maken met het bestaan van fysische analogieën. Onder een fysische analogie versta ik die gedeeltelijke overeenkomst tussen de wetten van de ene wetenschap en die van een andere, waardoor de een de ander opheldert.

Het gedrag van het krachtlijnenmodel moest teruggebracht worden tot formules en getallen. Maxwell nam niet aan dat het model de werkelijkheid vertegenwoordigde, maar hij had ook geen vertrouwen in alleen wiskundige bewerkingen.

We moeten daarom de een of andere methode van onderzoek ontdekken die de geest bij iedere stap toestaat een duidelijk fysische voorstelling vast te leggen, zonder gebonden te zijn aan enige natuurwetenschappelijke theorie waaraan die voorstelling is ontleend.

Met zo'n methode zou men niet een doodlopende weg van abstractie inslaan, en ook niet een favoriete theorie hoeven loslaten.

Als analogiemodel stelde Maxwell een hydrodynamisch model (model met stromende vloeistof) voor omdat

ik door het gebruik van analogieën van deze soort geprobeerd heb op een gemakkelijke en hanteerbare wijze die wiskundige ideeën voor de geest te brengen die noodzakelijk zijn voor de studie van de verschijnselen van de elektriciteit.

In Maxwells model werden de krachtlijnen van Faraday buizen ('tubes of flow') die een niet-samendrukbare gewichtsloze vloeistof vervoeren door een substantie die een weerstand biedt die evenredig is aan de snelheid van de vloeistof. Maxwell toonde aan dat een gelijkmatige stroom van deze vloeistofdeeltjes in het model spanningen en drukken veroorzaakt die overeenkomen met elektrische effecten. De vloeistof die door een systeem van zulke buizen stroomt, vertegenwoordigt elektriciteit in beweging. De vorm en de diameter van de buizen geven informatie over de

sterkte en de richting van de vloeistofstroom, oftewel de elektriciteitsstroom. De snelheid van de vloeistof komt overeen met de elektrische kracht. Verschillen in vloeistofdruk zijn analoog aan verschillen in elektrische druk of potentiaal, terwijl zijdelingse druk overeenkomt met inductieverschijnselen. Omdat de buizen flexibel en elastisch zijn en oppervlakken vormen (zodat iedere buis in contact komt met zijn burens), verschaft de druk die van buis tot buis wordt overgedragen een analogon voor de elektrische inductie.

Het probleem was de invloed van de ruimte: een draad in een gewone ruimte blijft inert, maar als er in die ruimte krachtlijnen zijn, dan loopt er een stroom door die draad. Faraday had dit verklaard met zijn elektrotonische toestand, maar dit begrip kon niet worden ingepast in het hydrodynamische model. Maxwell loste de kwestie op door Faradays vermoeden wiskundig te vertalen: hij definieerde de elektrotonische toestand in ieder punt van de ruimte als 'een hoeveelheid bepaald in grootte en richting'. De voorstelling houdt geen fysische theorie in, maar 'is slechts een soort van kunstmatige notatie'.

4.6 Cilinders en kogeltjes

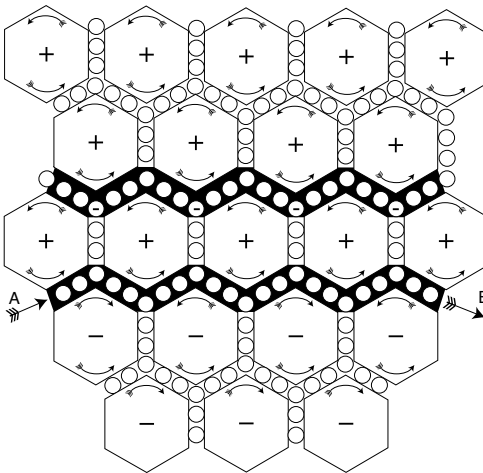
In 1861-1862 werkte Maxwell in een lang artikel 'On the Physical Lines of Force' het elektrodynamische model uit. Hij had nu een mechanisch model nodig voor het magnetisme. Hij bedacht het volgende: een magnetisch effect wordt veroorzaakt door rotatie in de ruimte van zogenaamde moleculaire wervels (vgl. par. 3.5). Deze etherwervels worden voorgesteld door smalle cilinders die rond de magnetische krachtlijnen roteren. De rotatie-as geeft de richting van de magnetische krachtlijnen aan (zie afbeelding 4.6). We krijgen nu twee mechanische effecten: een samentrekkende spanning in de richting van de draai-as en een druk uitgeoefend in de richting loodrecht erop tengevolge van de centrifugale kracht die door de roterende cilinders wordt veroorzaakt.

Dit was Maxwells nieuwe mechanische model voor het magnetisme: het magnetisme is een kracht uitgeoefend langs de as

en buiten de as. Maar hoe is hiermee te verklaren dat een elektrische stroom een magnetisch veld veroorzaakt en veranderende magnetische krachten een elektrische stroom?

Een probleem was dat in het model de cilinders (die met elkaar in contact staan) in tegengestelde richting zouden draaien. Daarom werden tussen de wervels kleine beweeglijke kogeltjes ('idle wheels') aangenomen. De kogeltjes roteren in een tegengestelde richting als ieder van de cilinders waarmee ze in contact staan, zodat alle cilinders in dezelfde richting draaien. Maxwell ging een stap verder: de kogeltjes zijn elektriciteitsdeeltjes.

Met dit model zijn nu de elektrische verschijnselen te verklaren: in een constant magnetisch veld roteren alle cilinders met eenzelfde constante snelheid. De kogeltjes blijven op hun plaats



Afbeelding 4.6: Nadat hij buizen met vloeistof had genomen als mechanisch model voor elektriciteit, zocht Maxwell een model voor magnetisme. Hij gebruikte roterende cilinders die de etherwervels rond de magnetische krachtlijnen verbeeldden. Kleine kogeltjes tussen de cilinders zorgden dat de cilinders allemaal dezelfde kant op konden draaien. Deze kogeltjes stelden de elektriciteit voor.

en er loopt geen elektrische stroom. Treedt er een verandering op in het magnetisch veld, dan is er een verandering in de rotatiesnelheid van de cilinders. Een cilinder die sneller roteert, doet zijn buur ook sneller roteren. Het gevolg is dat de kogeltjes gaan bewegen en we krijgen een elektrische stroom. Het model kan dus de grote ontdekking van Faraday verklaren dat een magnetische verandering een elektrische stroom levert.

De volgende stap is de aanname dat de kogeltjes en de cilinders in rust zijn. Als we een kracht uitoefenen op de elektriciteitskogeltjes, gaan deze roteren en de cilinders waarmee ze in contact staan gaan in tegengestelde richting draaien. Deze rotatie wijst op een magnetisch veld, enzovoort. Uit het model volgt ook dat er een magnetische kracht loodrecht op de stroomrichting werkt: immers de cilinders draaien in een richting loodrecht op de beweging van de deeltjes. De onderlinge afstoting van evenwijdige draden waarin een stroom in tegengestelde richting loopt, is te verklaren uit de centrifugale drukken van de draaiende cilinders die op de elektrische deeltjes ertussen werken en de inductiestromen die ontstaan door het overdragen van de rotatiesnelheid van de cilinders van het ene deel van het veld naar een ander.

Maxwell zegt nadrukkelijk:

De voorstelling van een deeltje dat zijn beweging heeft verbonden met die van een vortex door volmaakt rollend contact, mag wat onbevredigend lijken. Ik geef hem niet als een mogelijk verband dat in de natuur bestaat, of als een hypothese over de aard van de elektriciteit. Het is een mogelijk verband dat mechanisch denkbaar en gemakkelijk te onderzoeken is en het dient om de werkelijke mechanische verbanden tussen de bekende elektromagnetische verschijnselen aan de dag te brengen.

Vervolgens paste Maxwell het model toe op de oorsprong van elektromagnetische golven (1862). Eerst verklaarde hij het verschil tussen geleiders en niet-geleiders. Er gaat een stroom door een geleider als de elektriciteitsdeeltjes erin beïnvloed worden door

een elektrische kracht. De deeltjes bewegen dan min of meer vrij van cilinder naar cilinder en er vloeit een stroom zolang de kracht blijft werken. In een diëlektrische (niet-geleidende) stof is een beweging van deeltjes van cilinder naar cilinder onmogelijk, ten gevolge van de fysische structuur van het diëlektricum.

Maxwell wist dat er 'plaatselijke elektrische verschijnselen' voorkomen in diëlektrische stoffen. Dit zijn ook stromen, maar van een bijzondere soort. Als er een elektrische kracht op een diëlektricum werkt, worden de elektriciteitsdeeltjes 'verplaatst', maar ze kunnen niet vrij bewegen (polarisatie van het diëlektricum). Hij verklaarde dit aldus: de magnetische cilinders zijn elastisch. De elektriciteitsdeeltjes bewegen onder druk over een beperkte afstand tot er evenwicht is met de elasticiteit van de cilinders. Het begin van verplaatsing van de elektriciteitsdeeltjes veroorzaakt een verplaatsingsstroom door het diëlektricum. Als de oorzaak van de verplaatsing van de deeltjes ophoudt, oscilleren deze om vaste plaatsen. De trilling plant zich als een golf voort door het magnetische medium. De snelheid van de golf is afhankelijk van de elektrische eigenschappen van het medium waarin ze beweegt, maar is van de orde van de lichtsnelheid.

Hoe kwam Maxwell aan deze snelheid? In 1856 hadden de Duitse natuurkundigen Wilhelm Eduard Weber en Friedrich Wilhelm Georg Kohlrausch de verhouding van elektrostatische en elektrodynamische lading bepaald. Ze onderzochten hoe veel positieve eenheden van lading er per seconde door een draad moesten stromen en hoe veel negatieve door een andere draad, om dezelfde afstoting te veroorzaken als tussen twee statische eenheden van lading. De lengte van de draden lag vast; het aantal eenheden elektriciteit dat een bepaald punt in een bepaalde tijd passeerde, werd gemeten. Het verkregen verhoudingsgetal had daardoor de dimensie lengte/tijd ofwel snelheid. De snelheid van de voortplanting van de elektrische storing bleek $3 \cdot 10^{10}$ cm/s te zijn, de waarde die de Franse fysisch Armand Fizeau in 1849 gevonden had voor de snelheid van het licht.

4.7 Licht als elektromagnetisch golfverschijnsel

Maxwell werkte zijn bevindingen verder uit. Hij leidde af dat in een medium waarin elektromagnetische golven konden optreden, de voortplantingssnelheid daarvan gelijk was aan die van het licht. Blijkbaar zijn de media die dragers zijn van respectievelijk de lichtgolven en de elektromagnetische golven, identiek.

We kunnen nauwelijks de gevolgtrekking [...] vermijden dat licht bestaat uit transversale trillingen van hetzelfde medium dat de oorzaak is van de elektrische en magnetische verschijnselen.

Hiermee was de grondgedachte van de elektromagnetische lichttheorie uitgesproken: licht is een zich voortplantende evenwichtsverstoring in de elektrische en de magnetische veldsterkte. De golfbeweging was transversaal – dat wil zeggen, loodrecht op de voortplantingsrichting (zie par. 6.1) – omdat de voortplantingsrichting juist niet in het vlak van het elektromagnetische veld ligt.

Al vroeg in de negentiende eeuw had de golftheorie van het licht terrein gewonnen. Vooral de Franse fysicus Augustin Jean Fresnel had in de jaren 1815-1824 met experimenten en theoretische beschouwingen de golftheorie van het licht van onze landgenoot Christiaan Huygens (zie par. 2.2 – 2.5) de overwinning bezorgd ten opzichte van de toen heersende deeltjestheorie van Isaac Newton. De golftheorie van het licht was eenvoudiger dan de emissietheorie (deeltjestheorie) en daardoor ook waarschijnlijker. Met één hypothese kon ze namelijk een groot aantal verschijnselen verklaren en voorspellen, terwijl de emissietheorie steeds nieuwe hypothesen betreffende de vorm van de lichtdeeltjes nodig had.

Huygens' golftheorie had echter een groot probleem. De theorie ging uit van een regelmatige voortplanting van longitudinale trillingen (trillingen in de richting van de voortplanting) in de ether en kon de polarisatie van het licht niet verklaren. Toen Fresnel en zijn landgenoot François Arago in 1816 ontdekten dat loodrecht op elkaar gepolariseerde lichtstralen niet met elkaar in-

terfereerden, nam de Engelsman Thomas Young daarom transversale trillingen van het licht aan. Fresnel vond dit een mechanische absurditeit, omdat de golftheorie van het licht berustte op de analogie met de longitudinale geluidsgolven in elastische vloeistoffen en lucht.

Desondanks nam ook Fresnel in 1821 aan dat lichtgolven transversale trillingen in de ether zijn. Maar daardoor moest de ether zowel de elastische eigenschappen bezitten van een vaste stof (deformeerbaarheid) als van een gas of een ijle vloeistof (verandering van volume, kleine weerstand tegen erin bewegende voorwerpen) (vgl. par. 6.1). Dit theoretische bezwaar tegen de transversale trillingen werd in de jaren zestig opgelost door Maxwell met zijn elektromagnetische lichttheorie – en daarmee was de unificatie tussen elektriciteit, magnetisme en licht bereikt.

Het uiteindelijke bewijs van de transversaliteit van elektromagnetische golven werd in 1887 gegeven door de Duitse natuurkundige Heinrich Hertz, hoogleraar aan het Polytechnikum te Karlsruhe. Hij toonde experimenteel aan dat elektromagnetische trillingen in de ether soortgelijke golven moesten geven als die van het licht, alleen met een veel lagere frequentie. Hij vond dat elektromagnetische golven transversaal zijn en dat ze zich gedragen als lichtgolven: ze vertonen breking, reflectie, interferentie en polarisatie. Lichtstralen zijn elektromagnetische golven van zeer korte golflengte.

Na zijn publicatie ‘On the Physical Lines of Force’ (1861–1862) waarin hij het mechanische model van deeltjes en cilinders presenteerde, vatte Maxwell zijn opvattingen samen in een 54 bladzijden lang artikel in de *Philosophical Transactions* en later in zijn beroemde *Treatise on Electricity and Magnetism* van 1873. In 1864 bood hij de Royal Society of London zijn ‘A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field’ aan, waarin hij zijn eerdere mechanische model verliet en het verving door zijn hypothese van het magnetische veld en de ether. Het elektromagnetische veld bestaat uit etherwervels van veel kleinere afmeting dan de weegbare moleculen. Het elektromagnetische veld is ‘de ruimte in de nabijheid van elektrische en magnetische lichamen’. In die ruimte bevindt zich

de ether, 'materie in beweging waardoor de waargenomen elektromagnetische verschijnselen worden veroorzaakt' (vgl. par. 6.1). De rotatie-as van de wervels geeft de richting van de magnetische krachtlijnen aan.

De theorie is een dynamische theorie, omdat ervan uitgegaan wordt dat er in de ruimte materie in beweging is. Met dit – eveneens mechanische – model leidde Maxwell de fundamentele elektromagnetische vergelijkingen af. Hij wist door middel van een stelsel van zes vergelijkingen de elektrische en magnetische velden tot één elektromagnetisch veld te verenigen. Drie vergelijkingen beschrijven van punt tot punt de ruimtelijke veranderingen van het elektrisch veld in verband met de veranderingen in de tijd van het magnetische veld. De andere drie beschrijven de ruimtelijke veranderingen van het magnetische veld in verband met de veranderingen in de tijd van het elektrische veld.

4.8 Conclusie

Bij Maxwell vinden we het gebruik van fysische analogieën of fysische illustraties. Deze dienen alleen om mechanische wetten af te leiden uitgaande van een concreet beeld, hetgeen meer aanspreekt dan abstract redeneren. Naast deze fysische modelbeschouwingen is er de zuiver wiskundige beschouwing van de verschijnselen zonder enige concrete voorstelling (vgl. par. 5.6). Deze was voor Maxwell niet voldoende omdat we dan 'de te verklaren verschijnselen uit het oog verliezen'. Toch zijn het de abstracte formules die Maxwell op zijn modellen had gebaseerd, die hun belangrijke plaats in de moderne fysica hebben behouden.

Maxwell gaf aan de voorstelling van Faraday van het elektromagnetische veld dat zich om een magneet of stroomdraad uitstrekt, een exacte wiskundige vorm. In het voorwoord van zijn *Treatise on Electricity and Magnetism* merkte hij op:

Faraday zag met zijn geestes oog krachtlijnen de gehele ruimte doordringen, terwijl de wiskundigen aantrekkingscentra van afstandskrachten zagen. Faraday zag een medium waar zij niets

zagen dan afstand. Faraday zocht de zetel van de verschijnselen in werkelijke werkingen in deze middenstof, zij namen er genoeg mee de machtwet te vinden van de krachten die op de elektrische vloeistoffen werken. Toen ik de ideeën van Faraday, zoals ik ze begreep, in een wiskundige vorm overbracht, vond ik dat beide methoden in het algemeen tot dezelfde resultaten voerden [...], echter dat veel door de wiskundigen ontdekte methoden beter op de manier van Faraday kunnen worden uitgedrukt.

Maxwell toonde wiskundig – niet experimenteel – aan dat elke storing die in de ether door elektrische of magnetische veranderingen teweeggebracht wordt, zich daarin in de vorm van transversale golven moet uitbreiden, en hij gaf de wiskundig geformuleerde wetten voor deze uitbreiding (1861, 1862). Hij bewees dat zulke transversale golven zich in vacuüm met de lichtsnelheid moeten voortbewegen, verklaarde licht als een elektromagnetisch verschijnsel en voorspelde het bestaan van elektromagnetische golven.

Deze snelheid [namelijk van de transversale elektromagnetische golven] is zo dichtbij die van het licht, dat het schijnt dat we goede redenen hebben om te concluderen dat licht zelf (inclusief de stralingswarmte en andere stralingen) een elektromagnetische verstoring is in de vorm van golven voortgeplant door het elektromagnetische veld volgens elektromagnetische wetten.

Het zou nog een kwart eeuw duren eer de veldvergelijkingen van Maxwell en zijn opvatting van licht als elektromagnetisch verschijnsel in continentaal Europa aanvaard zouden worden. In 1887 gaven de proeven van Hertz een schitterende bevestiging van de theorie van Maxwell. Hiermee was Maxwells unificatie of theoretische synthese van het elektromagnetisme en de optica door het experiment bevestigd.

Aanbevolen literatuur

De artikelen van Faraday zijn te vinden in: M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity* (Londen, 1839-1855; herdruk New York, 1965). Die van Maxwell in: J.C. Maxwell, *The Scientific Papers* (Cambridge, 1890; herdruk New York, 1965).

Er is veel secundaire literatuur over leven en werk van Faraday en Maxwell. Aan te bevelen zijn de artikelen in de *Dictionary of Scientific Biography* (New York) van L. Pearce Williams over Faraday (in vol. 1v, 1971, pp. 527-540) en van C.W.F. Everitt over Maxwell (in vol. 1x, 1974, pp. 198-230).

Zie verder: G. Cantor, *Michael Faraday. Sandemanian and Scientist* (Houndsmills en Londen, 1991) en P.M. Harman, *The natural philosophy of James Clerk Maxwell* (Cambridge, 1998). Een algemeen overzicht geeft: R.A.R. Tricker, *The Contributions of Faraday and Maxwell to Electrical Science* (Oxford, 1966).



5

*Warmteleer:
van Carnot tot Boltzmann*

Jos Uffink

Wat is warmte? Wat is kou? En hoe beïnvloeden zij het gedrag van fysische systemen? Deze vragen hebben al van oudsher de aandacht getrokken van filosofen, wetenschappers en ingenieurs. Immers, warmte en kou zijn onmiddellijk voelbaar – althans binnen zekere grenzen. Bovendien is de beheersing ervan essentieel bij vele toepassingen: van het koken van een ei tot de exploitatie van een kerncentrale. Kennis van warmte en kou is al sinds de vroege prehistorie een bepalende factor geweest in de ontwikkeling van de beschaving.

Het is in dit licht misschien merkwaardig dat men in moderne leerboeken de geboorte van onze huidige inzichten over bovengenoemde vragen steevast in de negentiende eeuw plaatst. Dat kan gemakkelijk de indruk wekken dat er voordien niet over deze vragen is nagedacht. Natuurlijk is daar geen sprake van. Desondanks zal ik ook in deze bijdrage voornamelijk de ontwikkeling van de warmteleer vanaf de negentiende eeuw schetsen. Maar eerst wil ik wel iets zeggen over de vraag waarom de warmteleer zo lang op een bevredigende theorie heeft moeten wachten.

5.1 Een lastig onderwerp

Bij Aristoteles nam het wamtebegrip al een centrale plaats in het wereldbeeld in. De beroemde vier elementen waaruit hij alle lichamen opgebouwd achtte – vuur, lucht, water en aarde (zie ook par. 1.2) – waren zelf terug te brengen tot de vier mogelijke combinaties van de zogeheten ‘primaire kwaliteiten’ warm/koud en droog/vochtig. Aarde was droog en koud; water koud en vochtig; lucht vochtig en warm; en vuur warm en droog. Deze primaire kwaliteiten werden gezien als intrinsieke hoedanigheden die stoffen van nature hadden. De tegenwerping ligt voor de hand dat bijvoorbeeld kokend water moeilijk als koud te betitelen is. Dit probleem werd opgelost door de aanname dat warm water over ‘vreemde’ warmte beschikte. Dat water, in tegenstelling tot bijvoorbeeld vuur, van nature wel degelijk koud is, blijkt uit het feit dat warm water vanzelf afkoelt, terwijl vuur heet blijft.

De Aristotelische visie kon een aantal verschijnselen op een kwalitatieve manier beschrijven en begrijpelijk maken. Maar ze verschilt in vele opzichten van de huidige. In de eerste plaats werd de indeling in warm en koud gemaakt op grond van onmiddellijke zintuiglijke sensaties, ook wanneer deze vanuit modern oogpunt weinig met warmte te maken hebben. Zo was peper van nature heet en opium koud. In de tweede plaats had men grote moeite om uit te maken of een lichaam warmer was dan een ander. Aristoteles wees erop dat er vele intuïtieve criteria bestonden volgens welke een voorwerp als warmer dan een ander kan worden gezien, maar die wezen niet altijd dezelfde kant op. Kokend water voelt warmer dan een kaarsvlam, maar men kan er geen brand mee stichten. In dat laatste opzicht is een vlammetje dus warmer. Bloed lijkt warmer dan water, maar het stolt eerder.

De moeilijkheid is dat de relatie tussen de zintuiglijke sensatie van warmte of kou en de achterliggende fenomenen in feite heel complex is. (Denk maar aan het begrip ‘gevoelstemperatuur’ dat men tegenwoordig bij weersvoorspellingen hanteert.) Ook de effecten die warmte op lichamen kan hebben zijn zeer uiteenlopend. Sommige effecten, zoals uitzetting, smelten en verdampen, worden ook nu nog als fysisch beschouwd. Andere, zoals verbran-

ding, zijn chemisch van aard, en weer andere, zoals rotting en vergisting, hebben een microbiologische achtergrond. Voor een warmteleer die uitsluitend afgaat op de zintuigen en intuïties is het moeilijk om succes te behalen. Maar juist omdat de leer van Aristoteles zo weinig concrete voorspellingen leverde, was hij niet gemakkelijk te weerleggen, en mede daarom heeft deze visie het lang uitgehouden.

Vooruitgang in de warmteleer werd pas mogelijk na de introductie van de eerste thermometers in de zeventiende eeuw. Hoewel deze vroege instrumenten tamelijk onnauwkeurig waren, boden ze toch een groot voordeel: een methode om warmte te meten die onafhankelijk was van het menselijk lichaam. Daarmee kon het warmtebegrip scherper worden afgebakend. Ook het onderscheid tussen *warmte* en *temperatuur* stamt uit deze tijd: de temperatuur geeft aan hoe warm een voorwerp is, terwijl warmte iets is dat kan worden doorgegeven van het ene voorwerp aan het andere. (Bij een groot voorwerp moet men meer warmte toevoeren om dezelfde temperatuur te bereiken, dan bij een klein.) Dat de Aristotelische visie ook toen nog gemeengoed was, blijkt uit het feit dat Boyle rond 1660 een proef deed om vast te stellen dat voor de thermometer opium niet kouder was dan de omgeving.

Er waren echter ook problemen die niet eenvoudig met experimenten beslist konden worden. In de eerste plaats was er de vraag of warmte een substantie is of een of andere vorm van beweging van de materiedeeltjes. Beide opvattingen werden door verschillende geleerden in de zeventiende en achttiende eeuw verdedigd, zonder dat er een duidelijke winnaar aan te wijzen is. Weliswaar werd aangetoond dat als warmte zelf een substantie was, deze gewichtsloos moest zijn, omdat bij verhitting of afkoeling geen gewichtsverandering optreedt. Maar dit werd niet als een bezwaar gezien, aangezien het licht sinds Newton ook als een gewichtsloze substantie werd opgevat.

Een andere moeilijke vraag is of men warmte en kou als gelijkwaardige tegenpolen moest zien, of dat koude niets anders is dan het ontbreken van warmte. Ook hierover is tot diep in de achttiende eeuw strijd gevoerd. Met name het feit dat water bij

bevriezing uitzet – wat eerder suggereert dat het kou opneemt dan dat het warmte afstaat – zorgde voor hoofdbrekens.

Eén van de belangrijkste ontwikkelingen is ongetwijfeld het werk van de Schotse arts Joseph Black rond 1750. In zijn handen werd de kunst van de warmtemeting vrijwel geperfectioneerd. Hij introduceerde het fijnmazige onderscheid tussen de begrippen *warmte*, *warmtecapaciteit*, *soortelijke warmte* en *latente warmte*, die samen nodig en voldoende zijn om de invloed van warmte op de toestand van vloeistoffen en gassen te beschrijven, alsmede begrippen als *smeltwarmte* en *verdampingswarmte* die bij faseovergangen een rol spelen.

Hoewel Black zelf een neutrale positie innam ten opzichte van de vraag naar de aard van warmte, gaf zijn werk een belangrijke impuls aan de opvatting dat warmte een substantie was. Zijn aanpak, waarbij warmte in of uit reservoirs met een zekere capaciteit kon stromen, nodigde haast vanzelf uit om warmte te zien als een soort vloeistof. Vanaf deze tijd tot het midden van de negentiende eeuw is de opvatting dat warmte een speciale substantie is, door Lavoisier *calorique* genoemd, de meest gangbare.

De uiteindelijke teloorgang van deze visie was het resultaat van een studie van de mogelijkheden om met behulp van warmte arbeid te verrichten. Deze tak van onderzoek, waarvoor Kelvin in 1851 de naam *thermodynamica* voorstelde, begint bij Carnot.

5.2 Sadi Carnot

De oorsprong van de thermodynamica is gelegen in het werk van Sadi Carnot. Deze jonge officier in het Franse leger schreef in 1824 een verhandeling over het rendement van warmtemachines. De historische achtergrond van Carnots belangstelling voor dit onderwerp wordt gevormd door de Napoleontische oorlogen, die in 1824 nog maar kort geleden zijn. Het was een tijd waarin Frankrijk in grote economische ellende verkeerde, terwijl Engeland zich tot 's werelds grootste en enige supermacht ontpopte. Carnot begon zijn verhandeling dan ook niet met een natuur-

kundige vraagstelling, maar met de vraag: Waarom is Engeland zo machtig? Hij betoogde dat zijn meeste tijdgenoten zouden wijzen naar de formidabele Engelse vloot. Maar Carnot was met zo'n antwoord niet tevreden. Als een marxist avant la lettre zocht hij de reden van Engeland's macht in de aard van de productiewijze, in het bijzonder de verregaande inzet van de stoommachine in allerlei takken van bedrijvigheid.

Hij besprak het voorbeeld van de mijnbouw. Een grote belemmering bij de exploitatie van kolenmijnen was het feit dat diepe mijngangen en schachten vaak binnen de kortste keren onder water liepen. Het succes van de mijnbouw werd bepaald door het al dan niet aanwezige vermogen om zulke gangen droog te pompen. Hierbij bewees de stoommachine haar nut. Carnot schatte dat dankzij de inzet van stoommachines de steenkoolproductie in Engeland vertienvoudigd was. Dit voorbeeld is extra overtuigend omdat er een soort sneeuwbaaleffect optreedt: met behulp van de extra gedolven steenkool konden nog meer stoommachines aan het werk gezet worden, waardoor er nog meer mijnen geëxploiteerd konden worden, et cetera. Wilde Frankrijk zijn malaise ontvluchten, zo betoogde Carnot, dan moest het van Engeland leren en eveneens zijn toevlucht nemen tot de stoommachine. Daarvoor was het nodig om zich in de theorie van deze machine te verdiepen.

Carnot bestudeerde machines die arbeid produceren door warmte op te nemen uit een reservoir met een hoge temperatuur en af te staan aan een reservoir met lagere temperatuur. Hij nam aan dat zo'n machine opereert in een kringloop: na een reeks van stappen keert de machine steeds weer naar haar begintoestand terug. Daarnaast nam Carnot het in zijn tijd gangbare standpunt aan dat warmte een substantie is die niet vernietigd of gecreëerd kan worden. Hij veronderstelde dat de beide warmtereservoirs zo groot zijn dat hun toestand niet verandert door de operatie van de machine. De cyclus kan dus onbepaald worden herhaald. De werking van zo'n machine kan worden vergeleken met die van een watermolen: zoals een molen arbeid levert door water van een hoger naar een lager niveau te transporteren, komt hier het vermogen om arbeid te leveren voort uit het transport van warmte

van een plek met een hoge naar een plek met een lage temperatuur. Net als bij de molen de hoeveelheid water gelijk blijft tijdens het werk, wordt er volgens Carnot geen warmtestof geconsumeerd door de warmtemachine. Er zijn daarom steeds minstens twee warmereservoirs van verschillende temperatuur nodig: één waaruit de motor warmte kan putten en een ander waarin diezelfde hoeveelheid warmte weer wordt afgestaan. In principe is het in alle situaties waar twee reservoirs van verschillende temperatuur beschikbaar zijn, mogelijk hiermee arbeid op te wekken.

Het belangrijkste resultaat in Carnots werk is het volgende. Hij beschouwde machines die warmte opnemen uit een reservoir met een bepaalde temperatuur en deze weer afstaan aan een reservoir met een lagere temperatuur. Verder nam hij aan dat deze machines in een omkeerbare kringloop opereren – dat wil zeggen: de reeks van stappen die de machines uitvoeren, kan ook in omgekeerde volgorde doorlopen worden. Dan, aldus Carnot, hebben zulke machines allemaal hetzelfde rendement: zij verrichten allemaal even veel arbeid per getransporteerde hoeveelheid warmtestof. Bovendien is voor alle machines die gebruik maken van reservoirs met de gegeven temperaturen, het rendement van omkeerbare machines het hoogst bereikbare. Dit maximale rendement is een universele uitdrukking die alleen afhangt van de twee gekozen temperaturen.

Carnot leidde zijn stelling af uit een principe dat zegt dat het niet mogelijk is een apparaat te bouwen dat een onbepaalde hoeveelheid arbeid produceert zonder warmtestof of andere hulpbronnen te verbruiken. Men noemt dit de onmogelijkheid van het perpetuum mobile (van de eerste soort). Zijn argument is een ‘bewijs uit het ongerijmde’: stel dat er een machine A zou bestaan die een omkeerbare kringloop uitvoert met behulp van de reservoirs P en Q , en stel dat deze machine een lager rendement heeft dan een kringloop in apparaat B tussen dezelfde twee reservoirs. Dan zouden we een gecombineerde cyclus uit kunnen voeren waarbij machine A omgekeerd gebruikt wordt. B gebruikt warmte uit het reservoir met de hoge temperatuur P om arbeid te leveren en geeft deze warmte af aan het reservoir met de lage

temperatuur Q , en A pompt evenveel warmte van Q terug naar P . Omdat B meer arbeid levert dan A nodig heeft, is er bij deze cyclus netto een arbeidsoverschot. Omdat de machines en de warmtereservoirs aan het eind weer in dezelfde toestand zijn als in het begin, kan de cyclus bovendien onbeperkt herhaald worden. We zouden dus een perpetuum mobile hebben geconstrueerd. Omdat dit niet kan, kunnen er geen machines A en B bestaan die met behulp van dezelfde reservoirs een verschillend rendement bereiken in een omkeerbare kringloop.

De redenering van Carnot is, ook nu nog, indrukwekkend vanwege haar verbluffende eenvoud en verreikende consequenties. Ze maakt nergens gebruik van aannames over de aard van het medium (zoals stoom of lucht) dat voor de kringloop wordt gebruikt, en leidt toch tot allerlei nieuwe betrekkingen tussen de eigenschappen ervan. Die betrekkingen zijn dus blijikbaar universeel.

Hoe verreikend de inzichten van Carnot eigenlijk waren, blijkt uit het volgende. Er waren natuurlijk onophoudelijk pogingen van ingenieurs om het rendement van de stoommachine te verbeteren. Sommigen hoopten dat machines waarin stoom werd vervangen door gassen of dampen die bij verhitting sterker uitzetten, zoals ether of alcohol, meer arbeid zouden opleveren dan de gewone stoommachines. De Britse ingenieur Rankine beschreef in zijn *Manual of the Steam Engine* (1859) hoe enkele jaren eerder in Parijs acht schepen gebouwd waren die met etherdampmachines waren toegerust. De onderneming was geen succes: ze gingen in vlammen op. De theorie van Carnot liet nu zien, zonder een enkele proefneming, dat de hoop om op deze wijze het rendement te verhogen ijdel was.

5.3 Carnots werk voortgezet: Kelvin en Clausius

Het werk van Carnot is tijdens zijn leven nauwelijks opgemerkt. Hiervoor stond hij toch te ver af van de kringen van ingenieurs en gevestigde wetenschappers. Hij stierf in 1832 aan cholera tijdens een epidemie, en slechts een bespreking van zijn werk door de

mijnbouwkundige Clapeyron in 1834 behoedde hem voor de vergetelheid.

In 1848, tijdens een verblijf in Parijs, maakte William Thomson (de latere Lord Kelvin, zie ook par. 6.1) via deze bespreking kennis met het werk van Carnot. Hij zag het belang ervan voor de natuurkunde. Als duidelijk is dat er een universele functie bestaat voor het maximaal haalbare rendement van een machine zoals Carnot die beschreef, is een logische volgende vraag hoe deze functie luidt. Carnot zelf was er niet uit gekomen.

In feite is deze vraag ook niet eenduidig te beantwoorden, omdat de keuze van de temperatuurschaal tamelijk willekeurig is. Kelvin beseftte dat het probleem ook omgedraaid kon worden: we kunnen een temperatuurschaal zó uitkiezen dat de functie van Carnot de eenvoudigste vorm krijgt. Ook bij het bepalen van de eenvoudigste vorm moesten echter keuzes gemaakt worden. Kelvin koos uiteindelijk voor een schaal waarbij de temperatuursverschillen samenvallen met die van Celsius, maar waarbij het nulpunt verlegd werd naar -273°C . Deze zogenaamde absolute temperatuurschaal is tegenwoordig naar Kelvin genoemd. De functie van Carnot kon hiermee in een simpele vorm genoteerd worden.

Er was echter een probleem. Zoals gezegd, baseerde Carnot zijn analyse op de voorstelling van warmte als een onvernietigbare substantie. Ook Kelvin nam dit standpunt in, al vermeldde hij in een voetnoot proeven van ene ‘Mr. Joule of Manchester’ die een andere kant op wezen. Vrij snel hierna bleek inderdaad dat warmte niet kon worden opgevat als een behouden grootheid: warmte was nu juist *equivalent* met arbeid. Dat houdt in dat warmte in een vaste verhouding in arbeid kan worden omgezet, en vice versa. Hierdoor kwamen de conclusies van Carnot en Kelvin weer geheel op losse schroeven te staan.

De doorbraak kwam in 1850 van de hand van de Duitse natuurkundige Rudolf Clausius, op dat moment werkzaam in Zürich. Hij merkte op dat de equivalentie van arbeid en warmte – later de eerste hoofdwet van de thermodynamica genoemd – helemaal niet zo’n groot obstakel hoefde te vormen voor de stelling van Carnot. Als de uitgangspunten van de redenering werden aange-

past, konden de twee heel goed verenigd worden. In plaats van uit te gaan van de onmogelijkheid van een perpetuum mobile van de eerste soort baseerde Clausius zijn redenering op de onmogelijkheid van een perpetuum mobile van de tweede soort. Deze regel zegt dat het niet mogelijk is om in een kringproces het transport van warmte van een plek met lage naar een plek met een hoge temperatuur te bewerkstelligen, zonder dat er nog andere veranderingen optreden. Dit vormde een tweede basisprincipe voor de thermodynamica, naast de equivalentie van arbeid en warmte. Het uitgangspunt van Clausius kwam bekend te staan als de tweede hoofdwet van de thermodynamica.

Korte tijd later bereikte Kelvin hetzelfde inzicht. In de ontwikkelingen die volgden, speelden Clausius en Kelvin een soort haasje-over: nu eens nam de een het voortouw, dan weer de ander.

5.4 Entropie en dissipatie

Kelvin zag de tweede hoofdwet als de uiting van een universeel beginsel dat aan alle natuurprocessen een richting geeft. In een artikel uit 1852 noemde hij dit 'de universele neiging tot dissipatie van energie'. De gedachte was dat het omkeerbare kringproces, dat volgens Carnot het maximale rendement behaalt, slechts een geïdealiseerde fictie is die zich in werkelijkheid nooit voor doet. Alle werkelijke kringprocessen (processen waarbij een constructie telkens weer in haar uitgangssituatie terugkeert) zijn onomkeerbaar; ze hebben dus een lager rendement dan het berekende maximum. Het vermogen om arbeid te verrichten wordt dan niet ten volle benut, net als bij een watermolen die lekt. Er treedt bij dergelijke processen weliswaar geen verlies aan energie op, maar wel een verlies aan het vermogen om met deze energie arbeid te verrichten. De energie raakt gedissipeerd: ze gaat bijvoorbeeld verloren door warmtelekken en wrijving. De aanvangstoestand van het systeem kan dan nooit meer volledig worden hersteld.

Volgens Kelvin komt dissipatie van energie voor bij alle processen waarin warmteuitwisseling optreedt, in het bijzonder

ook bij het leven op aarde, dat immers afhankelijk is van de zonnestraling. Zijn conclusie luidde:

[...] within a finite time to come the earth must [...] be unfit for the habitation of man as presently constituted, unless operations have been, or are to be, performed, which are impossible under the laws to which the known operations going on at present in the material world are subject.

Met andere woorden: het zonnestelsel stevent af op wat later wel de ‘warmtedood’ is genoemd; de zon zal op den duur afkoelen en in evenwicht komen met de omgeving. Dan zal het onmogelijk zijn om leven op aarde in stand te houden.

Opmerkelijk is dat hoewel Kelvin de eenzijdige gerichtheid (onomkeerbaarheid) van natuurprocessen zag als een noodzakelijk gevolg van de tweede hoofdwet, hij hiervoor geen overtuigende argumenten naar voren bracht. De formuleringen van de tweede hoofdwet hadden tot dan toe alleen maar betrekking op kringprocessen. Hoe kwam Kelvin ertoe om deze wet ook op processen toe te passen waar de begin en eindtoestand verschillen? Recent historisch onderzoek, met name van een kladversie van zijn artikel, heeft laten zien dat zijn religieuze ideeën hierbij een grote rol speelden. Kelvin was een gelovig man. Zijn religieuze opvattingen zijn wel gekarakteriseerd als ‘theïstisch’. Dat wil zeggen dat hij niet alleen geloofde dat er een god was die de wereld had geschapen, maar ook dat deze op ieder moment nodig was om haar in stand te houden. De materiële wereld was uit zichzelf niet bij machte te blijven bestaan, ze was voortdurend geneigd tot verval en bederf. Vanuit deze gedachte was de stap naar Kelvins interpretatie van de tweede hoofdwet niet zo groot.

Ook Clausius ontwikkelde vanaf 1854 zijn denkbeelden rond de tweede hoofdwet. Hij herschreef de stelling van Carnot in termen van de verhouding tussen de hoeveelheid overgedragen warmte en de temperatuur van het betreffende reservoir. Zo bezien had elke warmteuitwisseling (transformatie) een eigen ‘equivalentiewaarde’. Als een systeem in een omkeerbare kringloop een be-

paalde hoeveelheid warmte opneemt uit het warme reservoir en vervolgens een andere hoeveelheid warmte afstaat aan het koude reservoir, moeten de equivalentiewaarden van die beide transformaties even groot zijn – de warmteuitwisselingen compenseren elkaar. Clausius kon dit resultaat generaliseren voor omkeerbare kringlopen die gebruik maken van meer dan twee warmtereservoirs. Bij *onomkeerbare* kringprocessen golden zijn formules echter niet: er stroomde dan meer warmte van een heet naar een koud reservoir dan strikt nodig was voor de opgewekte arbeid.

In de periode 1863–1865 verliet Clausius de kringprocessen en richtte hij zijn aandacht op processen waarbij de begin- en de eindtoestand verschillen. Hij kende aan de toestand van het systeem een grootte ‘ S ’ toe. Bij een omkeerbaar proces kwam de verandering in S overeen met de opgetelde equivalentiewaarden van alle transformaties. (In het speciale geval van een kringproces zijn de begin- en eindtoestand gelijk, zodat de som nul is.) In 1865 stelde Clausius voor om deze grootte de *entropie* te noemen.

Voor een *onomkeerbaar* proces met verschillende begin- en eindtoestand vond hij nu dat de entropieverandering altijd groter was dan de totale equivalentiewaarde van alle transformaties. In het bijzondere geval dat het systeem tijdens zo’n proces geïsoleerd is, zodat er geen warmte-uitwisseling plaatsvindt, komt de optelling van de equivalentiewaarden uit op nul. De entropieverandering, die altijd groter is, is dus positief. Met andere woorden: aan het einde van een *onomkeerbaar* proces is de entropie altijd hoger dan aan het begin.

Clausius vatte dit op als de algemene uitdrukking van de tweede hoofdwet. Hij sloot zich aan bij de opvatting van Kelvin dat deze wet een universele tendentie in de natuur weergeeft. Het idee dat de totale entropie bij alle natuurprocessen alleen maar kan toenemen, vatte hij samen in een beroemd geworden formulering van de tweede hoofdwet: de entropie van het heelal streeft naar een maximum.

Dat de tweede hoofdwet op een dergelijke manier richting geeft aan natuurprocessen, is een kwestie die in de negentiende eeuw veel ophef en discussie losmaakte – een debat dat overigens

nog steeds niet geluwd is. Velen vonden dat de wet een pessimistische visie op de toekomst impliceerde, die ze moeilijk konden accepteren. De Oostenrijkse fysicus Loschmidt bijvoorbeeld noemde de tweede hoofdwet een ‘terroristische bedreiging’. Maar ook inhoudelijk was er veel kritiek op de formulering van Clausius. Immers, hij had entropieverandering alleen gedefinieerd voor systemen in evenwicht en bij eenvoudige transformaties als warmte-uitwisseling en arbeid. De toepassing van dezelfde redeneringen op het universum was dan ook niet goed te rechtvaardigen.

Waarschijnlijk heeft Clausius zich deze kritiek ook wel aangetrokken. In ieder geval is het opmerkelijk dat in het leerboek dat hij in 1876 uit zijn eerdere artikelen samenstelde, iedere verwijzing naar de entropie van het heelal, of zelfs maar naar het idee dat entropie toeneemt bij onomkeerbare processen, is geschrapt!

Toch hebben latere fysici voornamelijk Clausius’ formulering van de tweede hoofdwet van de thermodynamica uit 1865 overgenomen: de uitspraak dat de entropie van een geïsoleerd systeem nooit kan dalen. Hiermee was de tweede hoofdwet echter een curieuze uitzondering onder de natuurwetten geworden: het is de enige algemene wet die een asymmetrische richting aan processen geeft. Alle andere fundamentele natuurkundige wetten, in het bijzonder die van de mechanica, zijn juist symmetrisch onder tijdsomkeer. Voor een botsing tussen harde bollen (zoals biljartballen) geldt bijvoorbeeld dat als alle snelheden worden omgekeerd – het filmpje wordt als het ware achteruit afgedraaid – de botsing evengoed mogelijk is: ze voldoet dan ook aan de botsingswetten. Vanaf nu trad de vraag op de voorgrond hoe men de relatie tussen de tweede hoofdwet van de thermodynamica en de wetten van de mechanica moest begrijpen.

5.5 Maxwell en Boltzmann: de kinetische opvatting van warmte

De thermodynamica die Clausius en Kelvin hadden geschapen, is een theorie die – met opzet – geen uitspraken doet over de aard

en samenstelling van de lichamen waarop ze betrekking heeft. In het bijzonder vermeden de beide onderzoekers het gebruik van de hypothese dat lichamen uit atomen zijn opgebouwd. Dat is niet, zoals later wel eens is beweerd, uit een soort koudwatervrees voor het idee. Integendeel, zowel Clausius als Kelvin bleek in ander werk hartstochtelijk voorstander van de atoomhypothese. Hun drijfveer om in de thermodynamica geen gebruik te maken van deze hypothese was dat ze speculatief was. Aangezien de thermodynamica de atoomhypothese niet nodig had, was het beter zulke speculatieve elementen te vermijden. Bovendien was er het probleem dat er zo veel totaal verschillende opvattingen over de aard van de atomen waren ontwikkeld, onder andere door Boscovitsch, Berzelius, Rankine en Kelvin zelf. Het was dus ook in dit opzicht voordelig om een keuze op dit probleemgebied te vermijden.

In de loop van de negentiende eeuw won de opvatting dat de materie uit kleine deeltjes bestond echter steeds meer terrein. Daaraan gekoppeld kwam ook het idee in zwang dat warmte niets anders is dan de beweging van die deeltjes. Hoewel dit idee al in 1738 door Daniel Bernoulli naar voren was gebracht, en sindsdien ook wel door anderen gebruikt was, had het tot 1850 niet veel aanhang gekregen. Clausius was in 1857 de eerste vooraanstaande fysicus die zich uitsprak voor het *kinetische* standpunt: het standpunt van bewegende deeltjes.

Clausius nam aan dat de deeltjes in een gas kriskras door elkaar bewegen en dat er voortdurend botsingen en daarmee snelheidsveranderingen optreden. Wel week zijn visie op een belangrijk punt af van de huidige opvatting: hij werkte bij alle toepassingen met de veronderstelling dat alle deeltjes een even grote snelheid hebben. De voortdurende variatie en fluctuatie die er in feite volgens zijn opvatting wel waren, negeerde en verwaarloosde hij in al zijn berekeningen.

De eerste die hierin verandering bracht, was James Clerk Maxwell (zie de inleiding voorafgaand aan par. 4.5). Hij zag de fluctuaties in snelheid niet als een te verwaarlozen complicatie, maar juist als wezenlijk aspect van de kinetische opvatting. Maxwell leidde in

1860 een statistische functie af die beschreef hoe de grootte van de fluctuaties was verdeeld in een gas dat in evenwicht was (waarin de temperatuur en druk niet veranderden). Het bestaan van deze fluctuaties gebruikte hij echter ook als argument tégen de tweede hoofdwet, in een gedachte-experiment dat later bekend is geworden onder de naam ‘het duiveltje van Maxwell’.

Stel je een vat voor dat gevuld is met gas, en dat uit twee compartimenten bestaat. In de tussenwand bevat zich een minuscule gaatje, dat door een (wrijvingsloos) beweegbaar schuifje is afgesloten. Aanvankelijk is de temperatuur van het gas aan beide zijden gelijk. Het luikje wordt bediend door een ‘neat-fingered and very observant’ wezentje, dat de moleculen afzonderlijk kan waarnemen. Vanwege de onvermijdelijke fluctuaties zullen er nu aan beide zijden van de scheidingswand zowel snelle als langzame deeltjes voorkomen. Het wezentje opent en sluit het schuifje zodanig dat hij alleen snelle moleculen doorlaat van compartiment A naar compartiment B, en langzame van B naar A. Hierdoor zal op den duur het gas in compartiment A heter worden dan dat in B. De moleculen worden als het ware gesorteerd op snelheid; de ordening in het systeem neemt dus toe.

Maxwell plaagde zijn vriend Kelvin dat diens ‘dizzipation’, zoals hij de dissipatie schertsend noemde, helemaal niet zo universeel en onvermijdelijk hoefde te zijn als hij wel dacht. Hij concludeerde dat de tweede hoofdwet slechts een statistische betekenis had en dat die alleen geldig was voor degenen die, zoals wij, beschikken over beperkte informatie over de moleculen. Voor het duiveltje, met zijn scherpe zintuigen, is de tweede hoofdwet niet geldig. Bovendien bereikt het duiveltje deze schending dankzij een slim gebruik van de mechanische wetten. Maxwell concludeerde daarom dat de tweede hoofdwet nooit uit de mechanica afleidbaar kon zijn.

De Oostenrijkse natuurkundige Ludwig Boltzmann was aanvankelijk niet op de hoogte van deze inzichten. Hij probeerde in 1866 te doen wat volgens Maxwell onmogelijk was: de tweede hoofdwet reduceren tot stellingen uit de mechanica. In feite is dit zijn levenswerk geworden, want tot zijn dood in 1906 werd hij er-

door in beslag genomen. In 1872 meende hij op puur mechanische veronderstellingen te kunnen bewijzen dat een bepaalde grootheid, die hij ' H ' noemde, noodzakelijk moest toenemen. Dit werd korte tijd later door Loschmidt bekritiseerd: de mechanica was immers symmetrisch in de tijd. Voor ieder mechanisch proces waarbij H stijgt, moet er een ander proces te vinden zijn dat mechanisch evengoed mogelijk is, waarbij H daalt.

Boltzmann gaf later toe dat zijn bewering dat H altijd stijgt, niet op grond van de mechanica alleen te bewijzen is. In 1877 formuleerde hij een andere strategie. Hij liet zien dat voor een ideaal gas (dat wil zeggen, een gas waarvan de deeltjes geen krachten op elkaar uitoefenen) de entropie geïnterpreteerd kan worden in termen van het totale aantal manieren waarop een toestand microscopisch gerealiseerd kan worden. Het idee was dat de toestand met hoogste entropie – de evenwichtstoestand – op zo overweldigend veel manieren gerealiseerd kan worden dat zelfs wanneer het systeem niet in evenwicht begint, het er vrijwel zeker in moet eindigen. Ook nu kon Boltzmann geen bewijs geven voor zijn bewering. Daarbij was een bezwaar dat het argument alleen voor een ideaal gas gold. In de jaren 1890 liet de Duitse wiskundige Ernst Zermelo bovendien zien dat voor ieder systeem met een eindig aantal deeltjes het verblijf in de evenwichtstoestand niet permanent kan zijn.

Het belang van het werk van Boltzmann is dan ook niet dat het een bevredigende verklaring van de tweede hoofdwet bood. Wel heeft zijn omvangrijke werk vele ideeën en methoden opgeleverd die nog steeds met vrucht gebruikt worden. Zo geeft de vergelijking waarmee hij in 1872 de voortdurende toename van entropie beschreef, tegenwoordig de Boltzmannvergelijking geheten, een veel gedetailleerdere beschrijving van niet-evenwichtsprocessen dan de thermodynamica alleen. Tegelijk staat buiten kijf dat ze slechts een benadering biedt met een beperkte reikwijdte.

5.6 De huidige situatie

Door de opkomst van de quantummechanica in het eerste kwart van de twintigste eeuw (zie hoofdstuk 7) stonden de problemen rond de tweede hoofdwet enige tijd minder in de belangstelling. Niet alleen waren de problemen die de quantummechanica opriep veel dieper en opwindender, ongetwijfeld speelde ook de hoop mee dat deze nieuwe theorie van de materie de oude problemen in een nieuw daglicht zou stellen. Nu aan het begin van een nieuwe eeuw de rookwolken wat zijn opgetrokken, kunnen we echter constateren dat dat niet het geval is.

De thermodynamica is in zekere zin zonder kleerscheuren door de tumultueuze ontwikkelingen heen gekomen. Hoewel zeker duidelijk is geworden dat deze theorie op het microscopische niveau niet adequaat is, blijft zij in het macroscopische domein zonder aanpassingen geldig. Einstein heeft nog aan het eind van leven zijn onwankelbare geloof uitgesproken dat in dit domein de thermodynamica nooit omvergeworpen zal worden. Daarnaast is gebleken dat de problemen waar Boltzmann tegenaan liep toen hij de tweede hoofdwet in een klassieke microscopische theorie probeerde in te bedden, zich in de quantumtheorie even hard doen gelden. Verschillende scholen proberen nu de hiaten in Boltzmanns redeneringen op te vullen en tot exacte bewijzen te komen. De gedachten gaan hierbij verschillende kanten op.

Sommigen zoeken het in een limietbeschouwing, waarbij ze het aantal deeltjes naar oneindig laten gaan. Ze geven toe dat de aannames die Boltzmann maakte om tot zijn vergelijking te komen voor een eindig aantal deeltjes niet gerechtvaardigd zijn – maar in een geschikt gekozen hypothetische situatie zijn ze dat wel. Problemen bij deze aanpak zijn ten eerste dat de werkelijke systemen waarop de theorie wordt toegepast natuurlijk toch uit een eindig aantal deeltjes bestaan, zodat de relevantie van de limiet nog moet worden aangetoond, en ten tweede dat exacte resultaten zeer moeilijk te verkrijgen zijn.

Een andere school van fysici zoekt de rechtvaardiging voor de ideeën van Boltzmann in de veronderstelling dat het bewegingsgedrag van moleculen uiterst grillig is. Door een hypothese

van Boltzmann uit 1868 te volgen kwam men tot de zogenaamde ergodentheorie. Binnen deze wiskundig zeer geavanceerde aanpak wordt een reeks van steeds stringenter grilligheidseisen geformuleerd voor de bewegingen van de moleculen. Naarmate meer van deze eisen vervuld zijn, kan men beter afleiden dat het gedrag van het systeem naar evenwicht leidt. Een van de grote problemen in deze aanpak is dat voor realistische gasmodellen slechts met grote moeite bewezen kan worden of aan dergelijke eisen voldaan is.

Een derde groepering zoekt de verklaring van thermodynamisch gedrag in de wisselwerking met de omgeving. In de gebruikelijke aanpak, zowel in Boltzmanns oorspronkelijke werk als in de ergodentheorie, beschouwt men systemen die volledig geïsoleerd zijn van de buitenwereld. Zo'n aanname is uiteraard niet realistisch. Een vat met gas staat juist altijd bloot aan invloeden vanuit de omgeving. Bovendien kan worden aangetoond dat in realistische gevallen de mechanische ontwikkeling in een gassysteem juist extreem gevoelig is voor dergelijke verstoringen. Een beroemde berekening van de Franse wiskundige Emile Borel laat zien dat als een atoom op Sirius één centimeter wordt verplaatst, daardoor al genoeg verandering kan optreden in de zwaartekracht die werkt op een gassysteem op aarde om de tijdsevolutie van het gas na een microseconde wezenlijk te doen afwijken. In deze derde aanpak tracht men dus thermodynamische systemen te karakteriseren als open systemen die, door hun omgeving beïnvloed worden. Maar ook hier blijkt de gewenste gang naar evenwicht vooralsnog alleen aan te tonen onder zeer speciale aannames over de begintoestand van en de interactie tussen het systeem en zijn omgeving.

Weer anderen laten het idee los dat de mechanische ontwikkeling in de tijd van te voren vastligt, of zelfs de tijdsymmetrie ervan. Een algemeen aanvaarde oplossing voor de vraag hoe de tweede hoofdwet van de thermodynamica in een statistisch-mechanische theorie ondergebracht kan worden, is voorlopig niet voorhanden.

Aanbevolen literatuur

De geschiedenis van het temperatuurbegrip tot de negentiende eeuw wordt besproken in: K. Meyer, *Entwicklung des Temperaturbegriffs* (Braunschweig, 1913). Een algemene inleiding in de thermodynamica is: P.W. Atkins, *The Second Law* (New York, 1984), Nederlandse vertaling: *Energie en entropie: de tweede hoofdwet van de thermodynamica* (Maastricht, 1988).

Informatie over het leven van Kelvin is te vinden in: C. Smith en M.N. Wise, *Energy and Empire: a Biographical Study of Lord Kelvin* (Cambridge, 1989).

Oorspronkelijke artikelen van Carnot, Clapeyron en Clausius zijn gebundeld in: E. Mendoza, 'Reflections on the Motive Power of Fire' by Sadi Carnot and other Papers on the Second Law of Thermodynamics by É. Clapeyron and R. Clausius (New York, 1960).



6

*Einstein en de
relativiteitstheorie*

Maarten Franssen

Revoluties komen altijd onverwacht voor degenen die ze meemaken. Pas achteraf worden de talloze aanwijzingen in kaart gebracht die de omwenteling aankondigden en zelfs onvermijdelijk leken te maken. Voor de veranderingen die in het eerste kwart van de twintigste eeuw de natuurkunde op haar grondvesten deden schudden is dit niet anders. Ze betekenden het einde van de zogenaamde ‘klassieke’ natuurkunde, die zich juist op dat moment oppermachtig had gevoeld, ervan overtuigd de hele wereld aan te kunnen.

Gedurende de negentiende eeuw had de natuurkunde een enorme sprong vooruit gemaakt. In de voorgaande hoofdstukken van Dijksterhuis, Snelders en Uffink zijn de belangrijkste resultaten behandeld: de golftheorie van het licht, de theorie van Maxwell die alle elektrische en magnetische verschijnselen kon beschrijven en de theorie dat warmte eigenlijk de beweging is van de deeltjes waaruit alle materie is opgebouwd – stuk voor stuk theorieën die nog steeds tot de leerstof van elke natuurkundestudent behoren. Sommigen meenden zelfs dat de natuurkunde eigenlijk wel af was. Tekenend is de volgende uitspraak van de Amerikaan A.A. Michelson uit 1903:

Alle belangrijke wetten en waarheden van de natuurkunde zijn inmiddels ontdekt en ze zijn zo goed bevestigd dat de kans dat ze ooit ten gevolge van nieuwe ontdekkingen door andere vervangen zullen worden te verwaarlozen is. [...] Onze toekomstige ontdekkingen zullen zich afspelen rond het zesde cijfer achter de komma.

Michelsons uitspraak is des te opmerkelijker omdat hijzelf juist verantwoordelijk was voor een experiment – dat hieronder uitgebreid aan bod zal komen – waarvan de uitslag duidelijk maakte dat het laatste woord in de natuurkunde nog niet gezegd kon zijn. De natuur had zich nog lang niet volledig blootgegeven.

De uitslag van Michelsons experiment was voor de Engelse fysicus William Thomson (zie ook par. 5.3), die zich vanwege zijn bijdragen aan de ontwikkeling van het Engelse telegraafstelsel inmiddels Lord Kelvin of Largs mocht noemen, juist reden zich iets minder naïef op te stellen. In 1900 hield hij een voordracht waarin hij opmerkte dat boven de theorieën over de aard van licht en warmte twee wolken hingen. De eerste wolk was het raadsel hoe de gewone materie, waaruit zowel aardse voorwerpen als zon en planeten waren gemaakt, bewoog door de ether, het medium dat de ‘drager’ van lichtstralen was. De tweede wolk was het probleem dat voor allerlei stoffen de experimenteel vastgestelde waarden van de soortelijke warmte (de hoeveelheid warmte die nodig is om één gram van die stof één graad Celsius in temperatuur te laten stijgen) niet te rijmen waren met de moleculaire warmtetheorie van Maxwell en Boltzmann (zie par. 5.5).

Men moet Kelvin nageven dat zijn diagnose accuraat was. Hij identificeerde precies de twee wolken waaruit zich de orkaan ontwikkelde die door de twintigste-eeuwse fysica zou gaan razen. Immers, het was de relativiteitstheorie die definitief het probleem van de wisselwerking tussen materie en ether de wereld uit hielp, terwijl de discrepantie tussen theoretische en experimentele waarden van de soortelijke warmte door de quantummechanica werd opgelost. Relativiteitstheorie en quantummechanica vormen samen de grote vernieuwing die de natuurkunde in de twintigste eeuw ondergaan heeft, en in het kielzog daarvan heeft de

mens zijn hele beeld van de materiële werkelijkheid drastisch moeten wijzigen.

Bij de ontwikkeling van beide theorieën speelde de Duits-Zwitserse fysicus Albert Einstein een hoofdrol. Alleen al dat feit maakt hem tot een van de belangrijkste natuurkundigen uit de geschiedenis. Bij de quantummechanica kan men niettemin zeggen dat hij een van de velen was. Daar volgden de ontwikkelingen elkaar in hoog tempo op en doken steeds nieuwe spelers uit de coulissen op om de plot een andere wending te geven, totdat het sommigen, waaronder ook Einstein, zelfs te veel werd. Maar daarover gaat het volgende hoofdstuk. Met de relativiteitstheorie daarentegen, het onderwerp van dit hoofdstuk, is uitsluitend de naam van Einstein verbonden. Deze theorie laat zich alleen vergelijken met de mechanica van Newton als een geval waarin de bijdrage van één man het werk van zijn voorgangers en wegbereiders – hoe wezenlijk ook – zozeer in de schaduw stelt dat de theorie het hoogstpersoonlijke visioen van haar schepper lijkt te zijn.

6.1 De ether als drager van de elektromagnetische verschijnselen

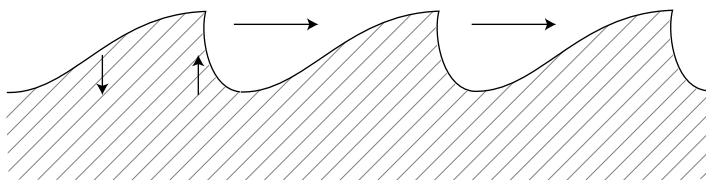
Precies in het jaar dat Kelvin zijn voordracht hield, studeerde Albert Einstein, eenentwintig jaar oud, af in de natuurkunde aan de Eidgenössische Technische Hochschule in Zürich. Einstein was als Duitser geboren in Ulm, maar zijn vader had na een faillissement besloten zijn zaken naar Noord-Italië te verplaatsen toen Albert vijftien was. Het was de bedoeling dat Einstein zijn middelbare-schoolopleiding in München zou voltooien, maar het drillkarakter van het Duitse gymnasium en het vooruitzicht van de onvermijdelijke dienstplicht stonden hem dermate tegen dat hij zich enige jaren later bij zijn ouders voegde. Hij besloot zijn Duitse staatsburgerschap op te geven en een universitaire opleiding in Zwitserland te volgen. In 1901 werd hij Zwitsers onderdaan, iets wat hij zijn hele leven is gebleven, ook al werd hij opnieuw Duitser toen hij in 1913 tot hoogleraar in Berlijn werd benoemd en verkreeg hij in 1940 het Amerikaans staatsburgerschap.

Met de donkere wolken waar Kelvin zijn voordracht aan wijdde zou Einstein, als hij er aanwezig was geweest, zeker ingestemd hebben. Ondanks zijn jeugdige leeftijd, en meer door zelfstudie dan dankzij de Züricher colleges, had hij zich er al intensief mee beziggehouden. Tijdens zijn studententijd, in talloze gesprekken met studiegenoten Marcel Grossmann en Michele Besso, en later in Bern – waar hij een baan kreeg bij het Zwitserse patentbureau, nadat enkele pogingen om een academische positie te verkrijgen op niets waren uitgelopen – in bijna dagelijkse ontmoetingen met zijn vrienden Maurice Solovine en Konrad Habicht, probeerde Einstein zijn grote belangstelling voor de grondslagenproblemen van de toenmalige natuurkunde te bevredigen.

Kelvin wordt vaak onnauwkeurig aangehaald als zag hij ‘slechts’ twee wolken voor de grote theorieën van de negentiende eeuw. Maar met name de problemen rond de ether werden in feite door velen als zeer ernstig beoordeeld. Deze problemen betroffen eigenlijk twee kernproblemen. Enerzijds was de specifieke aard van de ether een raadsel, anderzijds bleek het onmogelijk de beweging van de aarde door de ether eenduidig vast te stellen. Wat beide zaken betreft waren de diverse waarnemingsgegevens radicaal met elkaar in tegenspraak.

Hoewel een of andere stof die het gehele universum doordringt als sinds de Griekse oudheid een onderdeel van de natuurbeschouwing was – met inbegrip van die van Newton – (vgl. par. 1.2, 2.2, 2.3 en 3.6), kreeg de ether voor het eerst een serieuze rol in de natuurkunde te spelen met de komst van de golftheorie van het licht rond 1820. Tot op dat moment kende men golfverschijnselen alleen als trillingstoestanden van een of ander materieel medium. In analogie daarmee ging men ervan uit dat ook lichtgolven trillingstoestanden van een medium waren, een medium bovendien dat in de gehele kosmos aanwezig was, getuige het licht dat ons van verre sterren bereikt.

Een probleem met deze veronderstelling was echter dat al lang duidelijk was (zie par. 4.7) dat licht geen longitudinale trilling is – zoals geluidsgolven in lucht of andere media – waar de deeltjes van het medium op en neer trillen in dezelfde richting waarin de golf zich voortbeweegt, maar een transversale golf, waarbij de



Afbeelding 6.1: In een watergolf bewegen de waterdeeltjes omhoog en omlaag, terwijl de golf als geheel zich horizontaal voortbeweegt. Dit is een voorbeeld van een transversale golf.

deeltjes van het medium op en neer bewegen in een richting die dwars op de voortbewegingsrichting van de golf staat – zoals bij een watergolf het geval is (zie afbeelding 6.1). Nu bepaalt de aard van het medium welke trillingsvorm erin mogelijk is: longitudinale golven treden op in gassen en vloeistoffen, terwijl voor een transversale trilling een vast medium of een grensvlak vereist is. Bovendien beïnvloedt het medium de voortbeweging van de golf. In elk aardse medium dooft een golf vroeg of laat uit, doordat er bij het doorgeven van de trilling demping optreedt. Door de zichtbaarheid van de sterren weten we echter dat het licht op zijn reis door de ruimte niet noemenswaardig wordt gedempt. Dit betekende dat de ether een vast medium moest zijn dat onvervormbaar of, zoals dat in de natuurkunde heet, volmaakt elastisch was. Maar tegelijkertijd wist men dat de planeten en andere hemellichamen met reusachtige snelheden voortsuizen door de geheel met deze ether gevulde ruimte, zonder dat ze daarbij ook maar enigszins gehinderd lijken te worden. De snelheid van de aarde in haar baan om de zon is bijvoorbeeld 30 km/s, en deze is in ieder geval gedurende de afgelopen vijfduizend jaar niet merkbaar kleiner geworden. Deze twee eigenschappen van de ether lieten zich moeilijk met elkaar verenigen.

Dit probleem van de tegenstrijdige eigenschappen van de ether, die werd opgevat als materieel medium, won nog aan scherpte met de komst van de theorie van het elektromagnetisme. Met name de talrijke experimenten van Faraday hadden duidelijk

gemaakt dat elektrische en magnetische krachten niet konden worden opgevat als krachten die onmiddellijk van een punt naar een ander punt werden overgebracht en gericht waren langs de verbindingslijn tussen de punten, zoals het geval is bij de zwaarte-krachtstheorie van Newton. In plaats daarvan werden ze in de theorie van Maxwell, die alle elektrische en magnetische verschijnselen in zich verenigde, voorgesteld als gevolgen van de spannings- en bewegingstoestand van een omringend medium (zie par. 4.7). Nu had Faraday in 1845 aangetoond dat de trillingsrichting van een gepolariseerde lichtstraal – een lichtstraal die in precies één transversale richting trilt – door een sterk magnetisch veld verdraaid wordt: een eerste vaststelling dat er een verband bestond tussen licht en elektromagnetische verschijnselen. Daarom lag het voor de hand dat het medium dat verantwoordelijk is voor van elektrische en magnetische verschijnselen, hetzelfde is als de ether waarin het licht zich voortplant. Inderdaad volgde uit de theorie van Maxwell dat de snelheid waarmee verstoringen zich in het elektromagnetische medium voortplanten precies de grootte heeft van de lichtsnelheid. Dit suggereerde dat licht niets anders is dan zo'n verstoring, een veronderstelling die op een indrukwekkende manier bevestigd werd toen Heinrich Hertz in 1887 dergelijke elektromagnetische golven wist op te wekken.

6.2 Experimentele problemen voor de ethertheorie

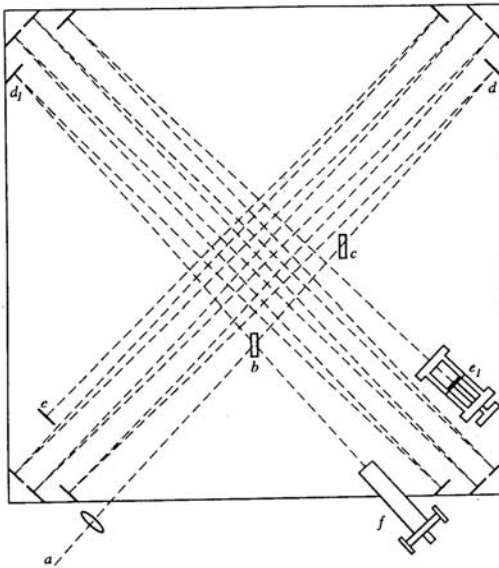
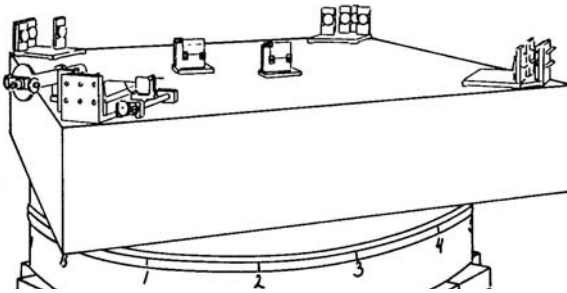
De verzoening van de tegenstrijdige eigenschappen van de ether was wellicht geen urgent probleem zolang de optische en elektromagnetische verschijnselen correct voorspeld werden door de theorie. Maar in de jaren 1880 was daar niet langer sprake van. Als licht een trillingsverschijnsel is in een ether die het hele universum doordringt, terwijl de aarde met grote snelheid door datzelfde universum beweegt, dan moet er een meetbaar effect zijn van de snelheid van een aardse waarnemer op de grootte van de voortplantingssnelheid van het licht. Bij de analoge situatie van geluidsgolven kan een waarnemer die snel door de lucht beweegt immers ook het effect meten van zijn eigen snelheid op de ge-

luidssnelheid zoals hij deze vaststelt. Het is zelfs mogelijk het geluid 'in te halen' en vervolgens definitief achter je te laten – dit is wat er gebeurt als een vliegtuig door de geluidsbarrière gaat. Voor licht zou dat effect vanwege de enorme snelheid van het licht (300.000 km/s) veel moeilijker na te gaan zijn, maar het was niet onmogelijk.

In 1728 was het verschijnsel van de 'stellaire aberratie' ontdekt, dat erop neerkwam dat zich in de loop van het jaar systematische verschuivingen voordoen in de hoek waaronder een ster aan de hemel staat. Dit kon niet anders uitgelegd worden dan als een gevolg van de snelheid van de aarde ten opzichte van de voortbeweging van het sterlicht door de ether. Dat betekende dat de aarde de ether niet of nauwelijks verstoort: de aardse snelheid van 30 km/s door de ruimte was ook haar snelheid ten opzichte van de ether. Dat betekende weer dat er een effect meetbaar zou moeten zijn van de snelheid van de aarde op de grootte van de lichtsnelheid, afhankelijk van de richting die het licht ten opzichte van de voortbewegingsrichting van de aarde heeft.

Men had al bedacht dat dit effect kon worden aangetoond door een lichtstraal over een zekere afstand heen en weer te laten kaatsen, parallel aan de bewegingsrichting van de aarde door de ruimte – en dus door de ether – terwijl een andere lichtstraal dezelfde afstand heen en weer aflegde dwars op de voortbewegingsrichting. Men kon berekenen dat het licht dat parallel aan de bewegingsrichting van de aarde bewoog er iets langer over zou doen (net als een zwemmer in een rivier iets langer zal doen over tien baantjes van vijftig meter beurtelings tegen de stroom in en met de stroom mee, dan over tien zulke baantjes dwars op de stroomrichting van het water). Maar doordat de lichtsnelheid zo reusachtig groot is, zou het tijdsverschil zeer klein zijn: het verschil tussen de twee tijden was pas te verwachten in het achtste cijfer achter de komma!

Toch meende de eerdergenoemde Amerikaanse fysicus Michelson het effect te kunnen aantonen. Een eerste poging in 1881 bleek niet de vereiste nauwkeurigheid te halen, maar in 1887 was een tweede experiment, waarbij de afstand die de lichtstralen moesten afleggen handig werd verlengd door ze enige keren heen



Afbeelding 6.2: Het Michelson-Morley-experiment, zij- en bovenaanzicht. De lichtstraal uit *a* wordt door middel van een halfdoorlatende spiegel *b* gesplitst. Het ene deel gaat rechtdoor en kaatst heen en terug tussen de spiegels bij *d* en *e*, en wordt vervolgens bij *b* voor een deel naar de loep *f* gekaatst. Het andere deel kaatst vanaf *b* tussen *d*₁ en *e*₁ heen en weer om dan eveneens via *b* in *f* terecht te komen, alwaar de twee stralen interfereren. Men verwachtte een klein verschil te vinden in de tijd waarin beide stralen dezelfde afstand aflegden, afhankelijk van de positie van het apparaat ten opzichte van de bewegingsrichting van de aarde, wat tot uiting zou komen in een verandering in het interferentiepatroon in *f*. Dit verschil werd niet gevonden.

en weer te laten kaatsen tussen spiegels, wel gevoelig genoeg. Het resultaat kwam echter als een grote verrassing: er was geen enkel verschil tussen de twee tijden (zie afbeelding 6.2). Deze uitkomst, die als het Michelson-Morley-experiment de geschiedenis in is gegaan, kon slechts in overeenstemming worden gebracht met het beeld van licht als een trillingsverschijnsel in de ether, als verondersteld werd dat de ether rond de aarde meebewoog met precies dezelfde snelheid als de aarde – in directe tegenspraak met wat uit het bestaan van de stellaire aberratie was geconcludeerd.

Deze situatie was moeilijker te negeren dan de raadsels rond de aard van de ether. De ether kon niet zowel bewegingloos de ruimte vullen als door de aarde met haar eigen snelheid worden meegesleept. Uit dit dilemma zag men slechts één uitweg, een suggestie die onafhankelijk door de Ier Fitzgerald en de Nederlander Lorentz was gedaan en die even boud als ad hoc was: de ether was in rust, maar de elektrische krachten die worden uitgeoefend op door de ether bewegende ladingen zorgen ervoor dat bewegende voorwerpen enigszins samentrekken in de bewegingsrichting. De afstand die het licht in het Michelson-Morley-experiment in de richting van de aardbeweging aflegt, wordt daardoor iets verkort, precies genoeg om de tijd die daarvoor nodig is exact gelijk te laten zijn aan de tijd die nodig is om de (onverkorte) afstand dwars op de bewegingsrichting van de aarde af te leggen.

Hoewel Kelvin deze zet in zijn voordracht 'briljant' noemde, meende hij niet dat de kwestie hiermee was afgedaan. 'Ik ben bang dat we deze wolk nog altijd als zeer donker moeten beschouwen', zo besloot hij zijn behandeling van de beweging van de materie ten opzichte van de ether.

Het was deze probleemsituatie, en speculaties zoals die van Fitzgerald en Lorentz, die niet onzinnig waren maar toch evenmin geworteld in een adequate theorie over de opbouw van de materie, waaraan Einstein in zijn wereldberoemde artikel uit 1905 in één klap een einde maakte. In dit artikel legde hij het fundament voor de relativiteitstheorie, hoewel die naam pas enkele jaren later werd ingevoerd. De belangrijkste boodschap van de theorie was dat een toestand van absolute rust of absolute beweging een fy-

sich onzinnige notie was – en dus ook de notie van een ether die in absolute rust is, zodat de aarde ten opzichte van deze ether in absolute zin beweegt, met de eventuele meetbare effecten van deze beweging van dien. Wanneer de consequenties van dit opgeven van de notie van absolute rust of beweging in ogenschouw worden genomen, blijkt dat geen enkel conflict met de waarnemingen overblijft.

De bovenstaande schets van de situatie rond het jaar 1900 suggereert dat Einstein een van de velen was die een verklaring probeerden te geven voor de onverwachte uitkomst van het Michelson-Morley-experiment en dat de relativiteitstheorie slechts zijn voorstel in dezen was, een voorstel dat uiteindelijk het beste bleek te voldoen. Deze zienswijze zou geen recht doen aan de radicaliteit van Einsteins aanpak, die veel meer een compleet andere kijk op de bestaande fysische theorieën inhield dan een slimme toevoeging daaraan. Bovendien weten we ook dat het Michelson-Morley-experiment nauwelijks een rol heeft gespeeld bij de formulering van de relativiteitstheorie. Weliswaar is bekend dat Einstein als student een verzoek heeft ingediend om een experiment te mogen uitvoeren om de beweging van de aarde ten opzichte van de ether te meten – een verzoek overigens dat werd afgewezen – maar wat juist kenmerkend is voor Einsteins benadering is dat hij inzag dat het probleem veel breder moest worden gezien.

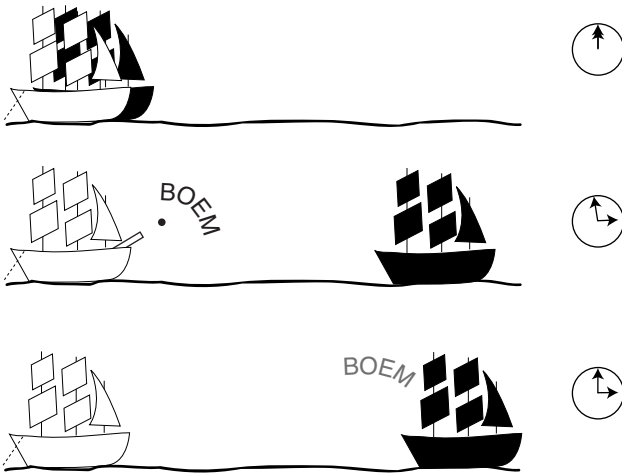
6.3 Het relativiteitsprincipe

Toen de negentiende eeuw begon, was er één fundamentele fysische theorie: de mechanica van Newton. De meeste natuurkundigen probeerden ook de nog niet goed onderzochte verschijnselen op de een of andere manier in deze mechanica onder te brengen. Aan het einde van die eeuw bestonden er twee fundamentele theorieën: de elektrodynamica van Maxwell, met daarin ondergebracht de golftheorie van het licht, was erbij gekomen. Hoewel sommigen ervan hadden gedroomd de mechanica in de elektrodynamica op te nemen, waren de verschillen tussen de beide

theorieën daarvoor te groot, met name waar het de behandeling van ruimte, tijd en beweging betrof.

De mechanica van Newton was gebouwd op het inzicht, voor het eerst door Galileo Galilei geformuleerd, dat de mechanische verschijnselen zich in een met constante snelheid bewegend systeem – bijvoorbeeld aan boord van een zeilend schip – in niets onderscheiden van de verschijnselen in een rustend stelsel – bijvoorbeeld een schip dat voor anker ligt (zie par. 1.7). Dit wordt *Galilei-invariantie* genoemd. Wilde de mechanica aan dit inzicht recht doen, dan moesten de wetten van de mechanica hetzelfde blijven, of deze nu werden uitgedrukt in de tijd- en ruimtecoördinaten die voor het ene stelsel gelden of de coördinaten voor het andere. Hoe kwam men aan die coördinaten? Als er twee stelsels gegeven waren – bijvoorbeeld een varende en een stilliggend schip – en de positie van een gebeurtenis – bijvoorbeeld een kanon-schot – was gegeven ten opzichte van een van de twee schepen, dan kon de positie ten opzichte van het andere schip gemakkelijk worden afgeleid door de afstand tussen de schepen op het moment van de gebeurtenis te verrekenen (zie afbeelding 6.3 – ook voor het feit dat het geluid een zekere tijd nodig had om de afstand tot het schip af te leggen kon men corrigeren). Deze afstand was eenvoudigweg de snelheid van het ene schip ten opzichte van het andere, vermenigvuldigd met de tijd die was verstreken vanaf het moment dat beide schepen langs elkaar voeren tot het moment van de gebeurtenis.

Galilei en Newton veronderstelden dat er slechts één tijd in het universum is, die voor alles en iedereen geldt. De omrekenregels van de tijd- en ruimtecoördinaten in het ene stelsel naar die in een ander stelsel, dat beweegt ten opzichte van het eerste, worden de *Galilei-transformaties* genoemd. Galilei-invariantie houdt in dat de wetten van de mechanica invariant zijn – dat wil zeggen: hetzelfde blijven – onder Galilei-transformaties. Dit is in overeenstemming met de observatie dat de mechanische verschijnselen zich er niets van aantrekken of we ons in een stilstaand of een met constante snelheid bewegend stelsel bevinden. Wat dat betreft is de kwestie welk stelsel beweegt en welk in rust is, een zinloze vraag: relevant is slechts dat ze ten opzichte van elkaar bewegen.



Afbeelding 6.3: Natuurkunde in stelsels die ten opzichte van elkaar bewegen, vóór Einstein. Het donkere schip heeft precies drie uur gevaren als men daar het kanonschot hoort. Het witte schip, waar het schot is afgevuurd, ligt dan simpelweg op een afstand van drie uur maal de vaarsnelheid van het donkere schip. Galilei-invariantie houdt in dat een waarnemer aan boord van een schip niet uit de gebeurtenissen op het schip (zodanig als de baan van een vanaf het schip afgevuurde kanonskogel) kan opmaken of het schip stilligt of in beweging is.

De elektrodynamica daarentegen was niet Galilei-invariant. In ieder geval was de waarde van de lichtsnelheid een integraal bestanddeel van de definitieve vorm van de theorie, die Maxwell eraan gegeven had. Als de tijd- en ruimtecoördinaten van een rustend stelsel op dezelfde manier werden omgerekend naar die van een bewegend stelsel als bij de mechanica, zouden in een bewegend stelsel elektrodynamische verschijnselen zich niet hetzelfde moeten voordoen. In het bijzonder zou men in een bewegend stelsel een andere waarde voor de lichtsnelheid moeten meten.

Deze situatie vond Einstein erg onbevredigend. Hij achtte het niet plausibel dat sommige natuurverschijnselen ongevoelig zouden zijn voor de (niet versnelde) bewegingstoestand van het stelsel waarin de waarnemer zich bevond ten opzichte van een

ander stelsel, en dat andere verschijnselen daar juist wel gevoelig voor zouden zijn. Einstein nam simpelweg als uitgangspunt dat alle fysische verschijnselen zich in stelsels die ten opzichte van elkaar met constante snelheid bewegen – samen ‘inertiaalstelsels’ genoemd – op precies dezelfde manier voordoen. Dit noemde hij het *relativiteitsprincipe*. Hieraan voegde hij het uitgangspunt toe dat de lichtsnelheid in alle inertiaalstelsels dezelfde waarde heeft. Dat was inmiddels wel duidelijk op grond van de waarnemingen, waaronder het Michelson–Morley-experiment. Maar voor Einstein was een belangrijkere overweging dat dit eigenlijk al in het relativiteitsprincipe begrepen ligt, omdat licht één van de fysische verschijnselen is die er in alle inertiaalstelsels hetzelfde uit moeten zien.

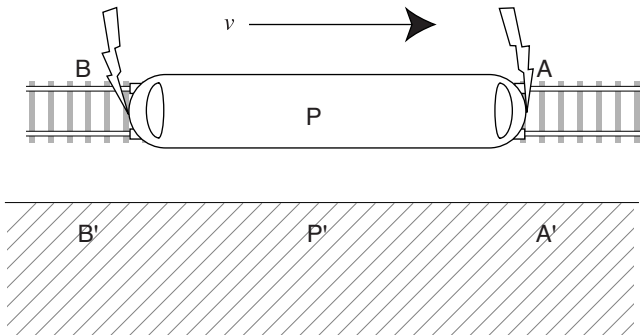
Er was nu slechts één conclusie mogelijk: de natuurwetten kunnen niet Galilei-invariant zijn. Kennelijk is Galilei-invariantie geen adequate vertaling van het inzicht dat de natuurwetten hetzelfde zijn voor alle waarnemers die ten opzichte van elkaar met constante snelheid bewegen. Of, wat op hetzelfde neerkomt, kennelijk zijn de Galilei-transformaties niet de juiste manier om de coördinaten in het ene inertiaalstelsel om te rekenen naar de coördinaten van een ander inertiaalstelsel. In zijn artikel uit 1905 wist Einstein op basis van zijn twee uitgangspunten – dat de natuurverschijnselen in alle inertiaalstelsels hetzelfde zijn en dat de lichtsnelheid in alle inertiaalstelsels dezelfde is – af te leiden wat dan wel de juiste omrekenregels voor coördinaten tussen inertiaalstelsels waren. Dit zijn de zogenaamde Lorentz-transformaties. Deze regels maakten een eind aan de illusie dat er één absolute tijd is die voor alle waarnemers hetzelfde is.

6.4 Consequenties van de relativiteitstheorie

De mechanica van Newton was gegrondvest op de veronderstelling van één absolute tijd (de klok in afbeelding 6.3). In deze veronderstelling ligt besloten dat ook gelijktijdigheid absoluut is, in die zin dat twee gebeurtenissen die voor één waarnemer gelijktijdig plaatsvinden, voor alle waarnemers gelijktijdig zijn. Einstein

liet nu zien dat uit zijn twee uitgangspunten – het relativiteitsprincipe en de constantheid van de lichtsnelheid – volgde dat gelijktijdigheid niet langer absoluut is. Wanneer van twee waarnemers die ten opzichte van elkaar met constante snelheid bewegen, er één vaststelt dat twee gebeurtenissen op hetzelfde tijdstip plaatsvinden, zal de andere waarnemer menen dat een van beide gebeurtenissen eerder kwam dan de tweede.

Einsteins redenering begon met erop te wijzen dat al onze plaats- en tijdbepalingen uiteindelijk teruggaan op het afpassen met meetlatten en het aflezen van klokken. Wanneer het om plaatsen en tijden van gebeurtenissen op enige afstand van ons gaat, hanteren we nog steeds definities die intuïtief plausibel zijn op grond van ons inzicht in de aard van plaats- en tijdbepalingen. Zo ligt het voor de hand te stellen dat voor iemand die zich precies halverwege tussen twee spiegels bevindt – vastgesteld met een meetlat – en die een lichtflits naar beide spiegels uitzendt en vervolgens de weerkaatste lichtstralen tegelijkertijd bij zich ziet terugkeren – vastgesteld met een klok voor zijn neus – de weerkaatsing van het licht tegen de linkerspiegel gelijktijdig plaatsvond met de weerkaatsing van het licht tegen de rechterspiegel.



Afbeelding 6.4.

Maar in deze definitie ligt de relativiteit van gelijktijdigheid al besloten. Neem bijvoorbeeld de situatie in afbeelding 6.4, waarin een trein met een snelheid v een perron passeert. Precies in het midden van de trein bevindt zich conducteur P, terwijl op het perron perronchef P' staat. Net op het moment dat de trein langs het perron rijdt, slaat de bliksem in de trein, zowel in de neus A als in de staart B. De perronchef ziet de inslagen precies op hetzelfde moment – dat wil zeggen, het licht van beide inslagen bereikt haar oog op hetzelfde moment. Nadat de trein voorbij is, loopt ze langs het perron en ze merkt dat de inslagen schroeiplekken A' en B' op de grond hebben achtergelaten. Toevallig blijkt dat de plaats waar ze stond toen ze de inslagen zag, zich precies halverwege A' en B' bevond. Dan zal ze concluderen dat de bliksem gelijktijdig in de neus en in de staart van de trein insloeg.

Conducteur P denkt er echter heel anders over. Hij beweegt zich met een snelheid v weg van de plaats A' waar de inslag in de staart gebeurde. Het licht van deze blikseminslag moet voor P dus een afstand afleggen die gelijk is aan de helft van AB *plus* de afstand die P in de tussentijd is opgeschoven. Die wordt berekend door de snelheid van de trein te vermenigvuldigen met de tijd die het licht nodig heeft om de afstand af te leggen: vt . Net zo beweegt P zich met snelheid v naar de plaats B' toe waar de inslag in de neus plaatsvond. Dat licht moet voor hem een afstand $\frac{1}{2}AB - vt'$ afleggen, waarbij t' de daarvoor benodigde tijd is. Ook voor conducteur P legt het licht de beide afstanden af met de constante lichtsnelheid c , *onafhankelijk van het feit dat de trein beweegt* – en dat is het grote verschil met de ‘klassieke’ analyse van deze situatie. De tijd t die het licht van de staartinslag nodig heeft om P te bereiken is hierdoor langer dan de tijd t' die het licht van de neusinslag nodig heeft. P ziet de neusinslag vóór de staartinslag gebeuren: de twee gebeurtenissen zijn voor hem *niet* gelijktijdig.

Via soortgelijke voorbeelden kon Einstein laten zien dat perronchef P voor de lengte van de voorbijrazende trein een kleiner getal zal vinden dan conducteur P' vindt, als beiden de vloer van de trein met een meetlat afpassen – de zogenaamde lengtecontractie – en dat zij voor de tijd die een tas in de rijdende trein nodig heeft om uit het bagagerek naar de vloer te vallen een gro-

ter getal zal vinden dan hij vindt – de zogenaamde tijddilatatie. En deze effecten worden groter naarmate de snelheid van de trein ten opzichte van het perron groter is. Ook de massa neemt toe met de snelheid, zodanig dat het onmogelijk is een voorwerp een snelheid te geven die groter is dan de lichtsnelheid, omdat de kracht die nodig is voor verdere versnelling ook steeds groter wordt. Dat met het toenemen van de snelheid en dus de kinetische energie van een deeltje ook de massa toeneemt, bracht Einstein ten slotte op het spoor van de algemene equivalentie van massa en energie, uitgedrukt in de beroemdste formule van de relativiteitstheorie: $E=mc^2$.

Dat de omrekenregels voor coördinaten de Lorentz-transformaties heten, en niet de Einstein-transformaties, wijst erop dat Einstein kennelijk niet als dé ontdekker ervan kan gelden. Inderdaad waren deze regels al gevonden door Lorentz in 1899, en overigens ook door de Engelse fysicus Larmor in 1900 en door de Fransman Poincaré in 1905 (onafhankelijk van Einstein), als de rekenregels die de elektrodynamische vergelijkingen van Maxwell onveranderd lieten wanneer men voor plaats- en tijdbepaling op een ander coördinatenstelsel overging. Ook herinnert de ruimtecontractie, die een direct gevolg is van de transformatieregels, onmiddellijk aan de door Lorentz gesuggereerde verkorting van voorwerpen in de bewegingsrichting door de ether.

Er is daarom wel gezegd dat de relativiteitstheorie er zonder Einstein ook wel binnen enkele jaren zou zijn gekomen, of dat de theorie eigenlijk een gezamenlijk product is. Deze interpretatie gaat echter voorbij aan het feit dat de relativiteitstheorie vooral een nieuwe manier van kijken naar de fysische wereld was. Voor zover de bovengenoemde ‘voorlopers’ enkele van de onverwachte effecten van de relativiteitstheorie al hadden ontdekt, zagen zij die als dynamische effecten: effecten van krachten die de ether in voorwerpen veroorzaakt en waarvan men zinvol kan zeggen dat ze werkelijk zijn in een voorwerp dat beweegt ten opzichte van de ether en dat ze niet optreden in voorwerpen die rusten in de ether. Volgens de relativiteitstheorie gaat het hier echter om kinematische effecten, een soort perspectiefkwestie. Of een meetlat werkelijk korter wordt of een klok werkelijk langza-

mer gaat lopen wanneer de snelheid ervan zeer groot wordt, is op zich geen zinvolle vraag. De meetlat is 'slechts' korter en de klok loopt 'slechts' langzamer voor een waarnemer die ten opzichte ervan beweegt, maar dat feit is zo reëel als het maar zijn kan – zoals blijkt uit het in de jaren zestig voor het eerst uitgevoerde experiment waarbij twee identieke klokken eerst in een laboratorium gelijkgezet werden, waarna er een in een vliegtuig met hoge snelheid een reis om de aarde maakte. Na terugkomst bleek deze klok zeer reëel achter te lopen bij de klok die thuis was gebleven.

6.5 Ontvangst van de relativiteitstheorie

Hiermee lopen we echter vooruit op de geschiedenis: de ontvangst van de theorie en de bevestiging van de empirische consequenties ervan. Anders dan Einstein had verwacht, gaf zijn artikel niet onmiddellijk aanleiding tot afwijzende reacties. Het bleef aanvankelijk zelfs opmerkelijk stil. Een van de eersten die het belang van de nieuwe theorie inzagen, was de grote Duitse fysicus Max Planck. De steun van iemand van zijn formaat deed de acceptatie van de theorie natuurlijk geen kwaad. Doorslaggevender was echter het enthousiasme waarmee de Duitse wiskundige Hermann Minkowski de relativiteitstheorie propageerde. (De aanschouwelijke vorm van de vierdimensionale ruimte-tijd aan de hand waarvan de theorie tegenwoordig wordt onderwezen, is van hem afkomstig.)

Toen Minkowski in 1908 bij een lezing in Keulen aankondigde dat 'vanaf dit moment ruimte op zich en tijd op zich gedoemd zijn om tot schaduwen te vervagen en alleen een soort vereniging van de twee een onafhankelijke realiteit zal behouden' was het kostje van de relativiteitstheorie gekocht. In 1909 ontving Einstein zijn eerste eredoctoraat, toegekend door de universiteit van Genève. Daarbij moet bedacht worden dat de instemming op dat moment nog louter op theoretische gronden geschiedde. De empirische consequenties van de theorie waren, voor zover ze niet al lang bekend waren – zoals de stellaire aberratie en de nuluitkomst van het Michelson-Morley-experiment – dermate klei-

ne effecten dat het grote moeite zou kosten om deze te controleren. Een eerste onomstreden bevestiging van de correctheid van een nieuwe voorspelling van de relativiteitstheorie kwam er pas na bijna tien jaar. En toetsing van bijvoorbeeld de relatie $E=mc^2$ bleek niet eerder dan in de jaren dertig mogelijk.

De alerte universiteit van Genève wist niet beter of zij kende haar eredoctoraat toe aan de heer Einstein, deskundige bij het Zwitsers patentbureau in Bern. Toevallig had Einstein juist twee dagen eerder zijn eerste academische positie gekregen, als docent aan de universiteit van Zürich. Dat Einstein zijn baanbrekende artikelen schreef als medewerker met een volledige dienstbetrekking bij het patentbureau heeft bij mensen wel het beeld opgeroepen alsof hij zijn werk in bij elkaar gesprokkelde vrije uren moest doen. In werkelijkheid was Einstein erg ingenomen met zijn baan; hij vond het werk leuk en vond er voldoende tijd om na te denken over de problemen die hem intrigeerden. Hij kreeg het wat dat betreft zelfs moeilijker toen hij hoogleraar werd, eerst in Zürich, daarna in Praag en vervolgens weer in Zürich, ditmaal aan de technische hogeschool.

De verplichting college te moeten geven over onderwerpen die hem van zijn eigenlijke onderzoek afhielden, stond hem al gauw zozeer tegen dat hij in 1913 bereid was naar Duitsland terug te keren voor een hoogleraarschap zonder onderwijsverplichting aan de universiteit van Berlijn. Niet alleen leidde dit tot een breuk met zijn eerste vrouw Mileva, Einstein werd ook meegezogen in de rampzalige stroom van gebeurtenissen waarin Duitsland terecht zou komen na het uitbreken van de eerste wereldoorlog, enkele maanden na zijn aankomst in Berlijn. Zijn pacifisme, in combinatie met zijn joodse afkomst, maakte dat hij voortaan door grote groepen met wantrouwen werd bekeken. Nog voor de machts-overname door de nazi's in januari 1933 een feit was, aarzelde hij geen ogenblik om zijn positie in Berlijn op te geven voor een positie in Princeton in de Verenigde Staten. De relativiteitstheorie deelde in het lot van haar schepper. In de chaos van de eerste jaren van de Weimarrepubliek werd zij door een kleine groep fanatici bestreden als betrof het een poging om de hele natuurkunde te corrumperen. Later deden de nazi's de theorie in de ban als verte-

genwoordiger bij uitstek van on-Duitse, joodse fysica. Toen na de oorlog de omvang van de jodenvernietiging duidelijk werd, oordeelde Einstein ongemeen hard over de Duitsers, een oordeel dat hij nooit meer heeft gematigd.

Eén van de genen die onder Hitler de taak op zich namen de Duitse fysica te zuiveren van joodse smetten was Johannes Stark. Vreemd genoeg hoorde Stark tot de eersten die de waarde van de relativiteitstheorie begrepen. In 1907 vroeg hij Einstein een overzichtsartikel over de theorie te schrijven voor het *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*. In dit stuk zette Einstein de eerste stappen naar de *algemene* relativiteitstheorie, de theorie die mag gelden als een van de grootste prestaties in de geschiedenis van de natuurkunde.

6.6 Uitbreiding naar de zwaartekracht: de algemene relativiteitstheorie

Van het begin af aan was duidelijk dat de zwaartekrachttheorie van Newton niet met de relativiteitstheorie verenigbaar was. Immers, de zwaartekracht werkt onmiddellijk over willekeurig grote afstand, terwijl volgens de relativiteitstheorie geen enkel fysisch verschijnsel zich met een snelheid groter dan de lichtsnelheid kan voortplanten. Daarnaast maakte de beperking van het relativiteitsprincipe tot stelsels die met constante snelheid ten opzichte van elkaar bewegen een geforceerde indruk. Als de noties absolute rust en absolute snelheid betekenisloos waren, dan was er evenmin ruimte voor de notie van absolute versnelling.

In het artikel in het jaarboek verscheen voor het eerst Einsteins oplossing voor dit probleem, gebaseerd op wat hij later ‘de gelukkigste gedachte van mijn leven’ zou noemen. Wanneer iemand van het dak van een huis valt, komt het hem voor, zolang hij valt en zolang hij slechts naar zijn directe omgeving kijkt, alsof hij in volmaakte rust is. Immers, elk voorwerp dat tegelijk met hem van het dak valt, blijft gedurende de val op dezelfde afstand van hem. Alleen als er een voorwerp zou bestaan dat op een speciale manier op de zwaartekracht zou reageren, zou de onfortuinlijke

dakdekker, wanneer hij dit voorwerp toevallig bij zich had, kunnen afleiden dat hij niet in rust verkeerde maar bezig was te vallen. Zo'n voorwerp bestaat echter niet; dat ligt besloten in de door Galilei beroemd geworden waarneming dat alle voorwerpen in een zwaartekrachtveld met dezelfde constante versnelling vallen (zie par. 1.8). Dit ervaringsfeit heeft voor de algemene relativiteitstheorie dezelfde betekenis als de constantheid van de lichtsnelheid in alle inertiaalstelsels voor de speciale relativiteitstheorie: op grond van de empirische constatering dat er geen uitzonderingen bekend zijn, verhief Einstein het tot een algemeen geldend principe waarvan hij vervolgens de verre gaande consequenties aan het licht bracht.

Een waarnemer die zich in een gesloten liftcabine bevindt en die plotseling zijn gewicht voelt wegvallen, kan op geen enkele manier vaststellen of dit komt doordat de liftkabel is gebroken en de cabine in een vrije val is terechtgekomen, of doordat het vertrouwde zwaartekrachtveld plotseling buiten werking is gesteld. Evenmin kan hij in de 'normale' situatie, waarin hij voelt dat hij door zijn gewicht op de cabinebodem wordt gedrukt, vaststellen of dit komt door de voortgaande aanwezigheid van de zwaartekracht of doordat de lift door iets of iemand versneld naar boven wordt getrokken terwijl alle zwaartekracht is opgeheven.

Op grond van dit inzicht kon Einstein een meer algemene vorm van zijn relativiteitsprincipe formuleren, die was uitgebreid naar situaties waar sprake is van versnelde beweging: alle fysische verschijnselen doen zich op precies dezelfde manier voor in een eenparig versneld stelsel als in een stelsel waarin een constante zwaartekracht heerst. Dit noemde Einstein het *equivalentieprincipe*.

Anders dan bij de speciale relativiteitstheorie bleek de weg naar de formulering van de theorie zelf, op basis van het equivalentieprincipe, nog allesbehalve duidelijk. Vooral de wiskundige vorm die de nieuwe theorie moest krijgen bezorgde Einstein veel hoofdbrekens. Ten einde raad zocht hij hulp bij zijn oude vriend Marcel Grossmann, die hoogleraar in de meetkunde was geworden aan de technische hogeschool in Zürich en die hem gewijds maakte in de differentiaalmeetkunde van Riemann. Na een worsteling van jaren kwam de doorbraak in november 1915.

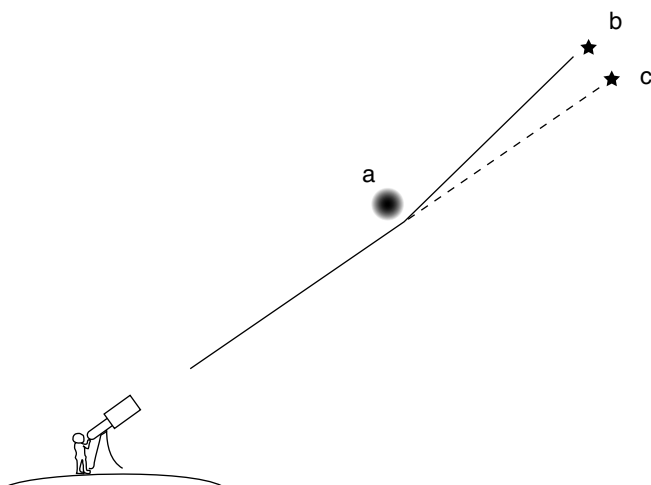
De test die Einstein voor zijn theorie in petto had, was een berekening van het effect dat eruit zou volgen voor de zogenaamde periheliumbeweging van de planeet Mercurius. Volgens de zwaartekrachttheorie van Newton beschrijft een enkele planeet een ellipsvormige baan om de zon (zie par. 3.2). Doordat de planeten in het zonnestelsel in werkelijkheid niet voldoen aan alle vereenvoudigingen die bij deze berekening worden gemaakt – ze ondergaan niet alleen de aantrekkingskracht van de zon maar ook die van de naburige planeten – zijn hun banen geen volmaakte ellipsen. Na één omwenteling is de planeet niet precies terug op zijn vertrekpunt, en het effect hiervan na zeer veel omwentelingen is dat de as van de ellips en dus ook het punt van de baan dat het dichtst bij de zon ligt, het zogenaamde perihelium, langzaam om de zon lijken te draaien. In het midden van de negentiende eeuw was duidelijk dat de storende invloeden van alle andere planeten in het geval van de baan van Mercurius niet de volledige periheliumbeweging konden verklaren. Er bleef een restant over van 43 boogseconden per eeuw. Alle pogingen om binnen het raamwerk van de zwaartekrachtwet van Newton een oorzaak voor deze bijdrage te vinden – een extra planeet tussen de zon en Mercurius (die alvast Vulcanus werd genoemd), een maan bij Mercurius of een afwijking in de bolvorm van de zon – hadden gefaald. Einsteins nieuwe theorie over de zwaartekracht had bij relatief kleine massa's – en dat is de massa van de zon op kosmische schaal – net niet helemaal dezelfde vorm als de theorie van Newton. Het verschil bleek exact verantwoordelijk voor een extra term in de periheliumbeweging van Mercurius ter grootte van $45 (\pm 5)$ boogseconden per eeuw. Toen deze uitkomst op papier stond, sloeg Einsteins hart letterlijk een keer over. Hij had de juiste theorie gevonden.

De publieke triomf van de algemene relativiteitstheorie werd een paar jaar later gevierd rond een andere voorspelling van de theorie. Uit het equivalentieprincipe is direct af te leiden dat licht in een zwaartekrachtveld wordt afgebogen. De grootte van dit effect kon ook pas in 1915 worden berekend. Welke mate van afbuiging de theorie precies voorspelde was belangrijk, want het effect op

zich is niet uniek voor de relativiteitstheorie. De Duitser Soldner had in 1801 berekend dat, gegeven dat licht wordt opgevat als een stroom deeltjes, sterlicht dat vlak langs de zon reist merkbaar wordt afgebogen door de zwaartekracht van de zon. De afbuiging die volgens de algemene relativiteitstheorie in zo'n geval zou moeten optreden, was echter twee keer zo groot als de waarde van Soldner. Om na te gaan of een van beide theorieën het bij het rechte eind had, en zo ja welke, moest er worden gewacht op een totale zonsverduistering. Alleen dan konden sterren waarvan het licht rakelings langs de zon reisde, gefotografeerd worden om hun positie te bepalen in vergelijking met de situatie waarin de zon in een ander deel van de hemel stond (zie afbeelding 6.5).

In 1919 was het zover. Onder leiding van de Engelsman Arthur Eddington vertrokken er expedities naar Sobral in Brazilië en naar Principe in Spaans Afrika. Tijdens een speciale zitting van de Royal Society en de Royal Astronomical Society maakte Eddington de uitslag bekend: de gemeten afbuiging kwam overeen met de voorspelling van de zwaartekrachttheorie van Einstein. Op Eddingtons interpretatie van de meetresultaten is weliswaar het een en ander af te dingen, maar voor het verloop van de gebeurtenissen doet dat niet ter zake. Voorzitter J.J. Thomson (zie ook par. 7.3) noemde de uitkomst 'het belangrijkste resultaat in verband met de theorie van de zwaartekracht sinds Newton' en 'een van de grootste successen van de menselijke geest'. De Engelse *Times* nam het nieuws over, en van de ene dag op de andere was Einstein, tot zijn eigen verbazing, wereldberoemd.

Het was een beroemdheid die niet meer zou overgaan en waarvan niet gemakkelijk is aan te geven waarop ze gebaseerd was. Steeds opnieuw werd de onbegrijpelijkheid van de theorie benadrukt. Iemand die aanwezig was bij een lezing die Einstein in 1921 gaf in een grote concertzaal in Wenen, voelde dat het publiek 'in een vreemd soort opwindung verkeerde waarin het niet meer uitmaakt wat je ervan begrijpt maar slechts dat je in de onmiddellijke nabijheid verkeert van een plek waar wonderen gebeuren'. Het lijkt moeilijk de quasi-religieuze geur die soms om de relativiteitstheorie hing, te rijmen met Einsteins nadruk op niet-formele, intuïtieve inzichten als basis voor zijn theorieën.



Afbeelding 6.5: Sterk overdreven voorstelling van het zwaartekrachteffect op sterlicht, waargenomen door de expeditie van Eddington. a. Verduisterde zon. b. Positie waar het sterlicht vandaan komt, dus waar de ster gewoonlijk waargenomen wordt. c. Positie waar het sterlicht vandaan lijkt te komen door de afbuiging.

Daar staat tegenover dat Einstein er sterker dan de meeste andere fysici van overtuigd was dat de aan de fysische wereld een werkelijke, ‘intelligente’ structuur ten grondslag ligt en dat deze structuur door de mens achterhaald en blootgelegd kan worden. En met zijn algemene relativiteitstheorie meende hij zeer dicht bij die structuur in de buurt te zijn gekomen.

6.7 Triomf en ondergang van de klassieke natuurkunde

In de inleiding van dit hoofdstuk werden de relativiteitstheorie en de quantummechanica in één adem genoemd als de twee theorieën die de negentiende-eeuwse natuurkunde op haar kop hebben gezet. Toch moet het revolutionaire karakter van de relativiteitstheorie niet overdreven worden. De theorie maakte duidelijk

dat de voorstelling van ruimte en tijd die vanaf het ontstaan van de moderne natuurwetenschap in de zeventiende eeuw gehanteerd werd, ondeugdelijk was. Voor het publiek leek het verlaten van de klassieke opvatting van absolute ruimte en beweging onherroepelijk uit te monden in een afscheid van het idee dat de natuurwetenschap de wereld begrijpelijk maakte. Toch waren alledaagse intuïties al eerder bedrieglijk gebleken in het licht van de wetenschappelijke vooruitgang – denk aan de discussie over de beweging van de aarde en de zon in de zestiende en zeventiende eeuw (zie hoofdstuk 1). Voor het eerst werden nu echter de inherente tegenintuïtieveit en daarmee de (vermeende) onbegrijpelijkheid van een natuurkundige theorie bij het grote publiek benadrukt als haar belangrijkste kenmerk.

Binnen de natuurkundige gemeenschap daarentegen werd de theorie, nadat men van de eerste verrassing was bekomen, herkend als de culminatie van de natuurkunde zoals deze in de voorafgaande twee tot drie eeuwen vorm had gekregen. Zij verzoende de mechanica en de zwaartekrachtstheorie van Newton met de nieuwere golfoptica en de elektrodynamica. De revolutie van de relativiteitstheorie was eerder een vervolmaking van het oude dan een verwerping ervan. Tot een verwerping van het oude zou het niettemin komen, nauwelijks later dan de viering van het hoogtepunt van de klassieke fysica. De belofte van een geünificeerde beschrijving van alle natuurverschijnselen werd namelijk niet ingelost op het niveau van de allerkleinste bestanddelen van de materie. Hierover gaat het volgende hoofdstuk.

Aanbevolen literatuur

De standaardbiografie van Einstein is het boek van Abraham Pais, *'Subtle is the Lord...'* *The science and the life of Albert Einstein* (Oxford, 1982). Een populairdere biografie, waarvan ook een Nederlandse uitgave bestaat, is: B. Hoffmann, *Albert Einstein, creator and rebel* (New York, 1972), Nederlandse vertaling: *Albert Einstein* (Amsterdam, 1975, 1985²) Voor een uitgebreid overzicht van de betekenis van Einstein voor de natuurkunde, is behulpzaam: P.A. Schilpp

(red.), *Albert Einstein: philosopher-scientist*, Library of living philosophers, deel 7; 2 delen (Evanston, 1949).

Een werk over de geschiedenis van de natuurkunde waaraan Einstein belangrijke bijdragen heeft geleverd, is: A. Einstein en L. Infeld, *The evolution of physics. The growth of ideas from the early concepts to relativity and quanta*. (Cambridge, 1938).

Over de relativiteitstheorie schrijft Einstein onder andere in:

A. Einstein, *The theory of relativity (and other essays)* (New York, 1950). Nederlandse vertaling: *Over de relativiteitstheorie en andere essays: $E=mc^2$* (Rijswijk, 1997).

A. Einstein, *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie* (Braunschweig, 1917). Nederlandse vertaling: *Mijn theorie. Over de speciale en de algemene relativiteitstheorie* (Utrecht, 1997⁴).

Ook meer beschouwelijke geschriften van Einstein zijn in het Nederlands vertaald:

A. Einstein, *Mein Weltbild* (Amsterdam, 1934). Engelse vertaling: *The world as I see it* (1935) en *Ideas and opinions* (1954). Nederlandse vertaling: *Mijn kijk op het leven* (Amsterdam, 1934; nieuwe editie: Amsterdam, 1990).

A. Einstein, *Out of my later years* (New York, 1950). Nederlandse vertaling: *Zoals ik het zie. Beschouwingen over maatschappelijke en wetenschappelijke onderwerpen* (Leiden, 1951).



7

*Bohr en de
quantummechanica*

Maarten Franssen

Veel meer dan de relativiteitstheorie is het de quantummechanica die de ontwikkeling van de twintigste-eeuwse natuurkunde heeft gedomineerd. Met de komst van de quantummechanica werd een domein van de natuur toegankelijk dat tot dan had gegolden als voor eeuwig afgesloten. De quantummechanica is zeer belangrijk gebleken als unificerende theorie voor de hele natuurwetenschap. Als theorie over de structuur en het gedrag van de atomaire deeltjes kon zij immers ook een verklaring geven voor talloze verschijnselen die in de scheikunde onderzocht waren: de valenties van de elementen, de aard van de chemische binding, het periodiek systeem, de structuur van moleculen en zo meer. Aangezien later de biologie aan de scheikunde gelieerd raakte (denk aan de stofwisseling, enzymen, DNA) heeft via de quantummechanica het hele terrein van de natuurwetenschappen een gemeenschappelijke theoretische basis gekregen. Deze ontwikkeling naar unificatie is bij uitstek kenmerkend voor de twintigste eeuw, nadat de negentiende eeuw juist de ontwikkeling kende van de talrijke wetenschappelijke disciplines die zichzelf als autonoom zagen en die ook nu nog op onze curricula hun stempel drukken.

Daartegenover staat dat met de quantummechanica het mysterie zijn intrede heeft gedaan in de natuurwetenschap. De

theorie maakte duidelijk dat het doel dat de klassieke natuurkunde altijd voor ogen had gestaan niet haalbaar was: er bleken ernstige beperkingen te zijn aan onze mogelijkheid om de natuurlijke verschijnselen te beschrijven als causale, nauwkeurig in ruimte en tijd gelokaliseerde processen. Het door de klassieke fysica ondersteunde ideaal dat de wetenschap langzaam maar zeker de structuur van de materiële werkelijkheid zou blootleggen en dat die werkelijkheid ook geheel begrijpelijk is voor ons mensen, leek plotseling een roemloze dood te sterven.

Meer dan enige andere onderzoeker heeft de Deense fysicus Niels Bohr zijn stempel gedrukt op de ontwikkeling van deze in alle opzichten revolutionaire theorie. In het bijzonder heeft Bohr zich intensief bemoeid met het doorgronden van de betekenis van de quantummechanica voor onze pogingen de natuur te begrijpen. Dat in de quantummechanica een fundamentele beperking van onze mogelijkheden besloten lag, werd vooral door hem benadrukt. Maar Bohr stond niet aan de basis van de quantummechanica, en de notie van het quantum is niet van hem afkomstig. De twee belangrijkste stappen waren gezet door Max Planck en Albert Einstein, rond de tijd dat Bohr zich inschreef als natuurkundestudent aan de universiteit van Kopenhagen.

7.1 Het ontstaan van de quantumtheorie

De wortels van het quantumbegrip liggen in het probleem van de zogenaamde zwartlichaamstraling. Onder een zwart lichaam verstond men een voorwerp dat als er (licht)straling op valt, alles opneemt en niets weerkaatst. Het beste voorbeeld ervan is een klein gaatje dat in een gesloten doos wordt geprikt. Zo'n lichaam kan wel zelf straling uitzenden, en des te meer naarmate het warmer is. De straling is niet in alle frequenties (kleuren) even intens, en bovendien is de intensiteitsverdeling over de frequenties bij elke temperatuur weer anders. Wilhelm Wien had in 1893 een formule opgesteld die goed 'paste' op de gemeten intensiteitsverdeling bij experimenteel gecreëerde zwarte lichamen, maar deze leek niet goed te rijmen met de theorieën van de klassieke natuurkunde.

De Duitse fysicus Max Planck stelde zich ten doel de juiste formule op theoretische gronden af te leiden – een opgave waarop al menig fysicus was vastgelopen. Planck kwam uiteindelijk uit bij de thermodynamica (zie hoofdstuk 5). Eigenlijk was hij afkerig van Boltzmanns interpretatie van de tweede hoofdwet van de thermodynamica: als een ‘statistische generalisatie’ die voortkomt uit het chaotische gedrag van de moleculen waaruit alle stoffen zijn opgebouwd. Toch besloot Planck na te gaan of de methoden die Boltzmann had gebruikt hem niet verder konden helpen. Het energiespectrum werd in diens berekening opgedeeld in stukjes, waarna voor ieder stukje apart de entropie (zie par. 5.4) werd berekend, en vervolgens werden alle entropietjes opgeteld. Door steeds kleinere stapjes te gebruiken ging Boltzmann langzaam terug naar een continu energiespectrum, totdat hij de ‘limiet’ kon berekenen (waarbij er als het ware oneindig veel oneindig kleine stapjes waren) en de juiste entropie vond. Planck deed nu hetzelfde voor de straling van een zwart lichaam. Tot zijn verbazing merkte hij dat de gezochte formule er al stond *voordat* hij de limiet nam. Kennelijk konden de trillende deeltjes (oscillatoren) in een zwart lichaam werkelijk niet elke willekeurige energiewaarde hebben, maar alleen ‘discrete’ waarden. Het bleek dat de energie van een oscillator de waarde heeft van de frequentie ν vermenigvuldigd met een constant getal, h , later de ‘constante van Planck’ genoemd.

Planck verkreeg zijn stralingsformule, die werd gepubliceerd in 1900, dus geheel per ongeluk. Hij had dan ook grote moeite om de consequentie ervan, het verschijnsel dat energie niet elke willekeurige waarde kan aannemen maar – zoals dat genoemd wordt – *gequantiseerd* is, te aanvaarden. In dat opzicht was Einsteins bijdrage aan de ontwikkeling van de quantumtheorie beter doordacht en radicaler.

De ontwikkeling van de natuurkunde in de negentiende eeuw was uitgelopen op een scherp contrast tussen enerzijds de mechanica, waarin (punt)deeltjes met massa centraal stonden, en anderzijds de elektrodynamica, waarin de centrale grootheden in de ruimte uitgestrekte velden waren. Nogal wat negentiende-eeuwse fysici droomden ervan deeltjes ‘weg te verklaren’ als een

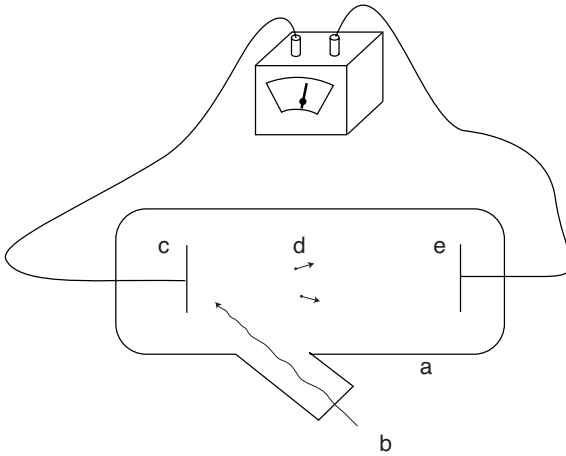
speciale vorm van veldverstoringen, maar Einsteins werk leek eerder in de tegenoverliggende richting te wijzen. Zo vroeg hij zich in 1902 af wat de uitdrukking voor de entropie zou zijn als een hoeveelheid straling met een zekere frequentieverdeling zou worden opgesloten in een bepaald volume. Door gebruik te maken van de empirische wet van Wien – en niet de raadselachtige nieuwe formule van Planck – vond hij een uitdrukking die hetzelfde was als die voor de entropie van een verdund gas. Kennelijk kon men licht opvatten als een ‘lichtgas’! Of zoals Einstein het omschreef:

Monochromatische straling van lage intensiteit (dus binnen het geldigheidsbereik van de wet van Wien) gedraagt zich met betrekking tot thermische verschijnselen alsof ze bestaat uit onafhankelijke energiequanta van grootte $h\nu$.

7.2 Einsteins bijdrage aan de quantumrevolutie: lichtquanta

In 1905 verscheen Einsteins beroemde artikel waarin de eigenschappen van het *foto-elektrisch effect* werden verklaard aan de hand van de lichtquantumhypothese. Het foto-elektrisch effect houdt in dat uit metaal elektronen vrijkomen zodra er licht op valt (zie afbeelding 7.1). Raadselachtig, gezien vanuit de klassieke natuurkunde, was het feit dat de hoeveelheid vrijkomende elektronen wel evenredig was met de intensiteit van het licht, maar de energie van elk elektron niet. Die bleek toe te nemen wanneer licht met een hogere frequentie werd gebruikt, terwijl licht met een frequentie onder een zekere grenswaarde (afhankelijk van de soort metaal) in het geheel geen effect veroorzaakte.

De veronderstelling dat het licht uit een stroom *quanta* bestaat – ‘pakketjes’ die elk een energie hebben die evenredig is met de frequentie van het licht – bleek precies deze raadselachtige aspecten van het foto-elektrisch effect te kunnen verklaren. De elektronen in het metaal zitten immers gebonden in het rooster dat wordt gevormd door de metaalatomen, zodat er een zekere



Afbeelding 7.1: Opstelling om het foto-elektrisch effect te meten. In een vacuümbuis (a) valt licht van een bepaalde golflengte (b) op een stukje metaal, de kathode (c). Als de frequentie van het licht hoog genoeg is, zendt de kathode elektronen uit (d). Wanneer er genoeg elektronen aankomen bij de anode (e), gaat er een stroom lopen. Door een spanningsbron toe te voegen in de stroomkring, kan men de spanning tussen c en e variëren, waardoor bijvoorbeeld alleen elektronen die met een bepaalde minimumsnelheid uit c vertrekken, bij e aankomen. Zo kan de energie van de elektronen worden bepaald.

energie nodig is om ze daaruit los te maken (de ‘bindingsenergie’). Is er meer energie beschikbaar, dan krijgt het losgemaakte elektron het restant mee in de vorm van snelheid. De grenswaarde waaronder het foto-elektrisch effect niet optreedt, is precies die frequentie waarbij de energie van een lichtpakketje gelijk is aan de bindingsenergie van het elektron in het atoomrooster. Hoe hoger de frequentie van het licht is, hoe groter de energie van de lichtquanta en hoe meer snelheid ze aan de losgemaakte elektronen kunnen meegeven. Einstein was zelfs in staat aan te geven wat de relatie tussen lichtfrequentie en elektronsnelheid moest zijn: de snelheid zou recht evenredig met de frequentie moeten toenemen en de evenredigheidsconstante zou een natuurconstante zijn, die onafhankelijk was van het metaal waaraan het effect werd geme-

ten. Dit was een echte voorspelling, want experimenteel was deze relatie nog niet nauwkeurig onderzocht. De bevestiging van deze voorspelling zou de reden worden op grond waarvan Einstein jaren later, in 1921, de Nobelprijs toegekend kreeg.

Einsteins lichtquantumhypothese wordt vaak gezien als een schoolvoorbeeld van een *ad hoc*-hypothese – een veronderstelling die uit de lucht gegrepen is, enkel om een bepaald empirisch verschijnsel te kunnen verklaren – maar dat oordeel doet geen recht aan Einsteins aanpak. Dat licht zich in sommige omstandigheden voordoet als een verzameling lichtquanta of lichtdeeltjes was een conclusie die hij al enkele jaren eerder op grond van andere overwegingen had getrokken. Bovendien was de reikwijdte ervan breder dan alleen het foto-elektrisch effect. Zo kon Einstein er ook mee verklaren waarom bij luminescentie – het door een aantal stoffen vertoonde verschijnsel dat zij wanneer er licht op valt, zelf licht van een specifieke kleur gaan uitzenden – de frequentie van het uitgestraalde licht nooit hoger is dan die van het opvallende licht. Ook kon hij de hypothese enkele jaren later toepassen bij de verklaring van het al even hardnekkige probleem van de soortelijke warmte van vaste stoffen.

Einstein zag zelf wel in dat zijn artikel ‘zeer revolutionair’ was. Voor de meeste van zijn collega’s was het onaanvaardbaar. In 1913 zei Planck (dezelfde!) bij het voordragen van Einstein als lid van de Pruisische Academie van Wetenschappen:

Dat hij de plank af en toe mis heeft geslagen bij zijn speculaties, zoals bijvoorbeeld bij zijn hypothese van lichtquanta, mag hem niet kwalijk worden genomen.

En de Amerikaanse fysicus Millikan schreef veel later:

Ik heb tien jaar van mijn leven besteed aan het toetsen van de vergelijking van Einstein uit 1905 en in 1915 zag ik me gedwongen, in strijd met al mijn verwachtingen, uit te spreken dat ze ondubbelzinnig experimenteel bevestigd was, hoewel ze in conflict leek te zijn met alles dat we over de interferentie van licht wisten.

De lichtquantumhypothese zou een cruciale rol spelen in de ontwikkeling van de quantummechanica.

7.3 De quantumtheorie van het atoom – Niels Bohr

Deze eerste theoretische schreden in de quantumwereld bleven voorlopig weliswaar revolutionaire, maar ook geïsoleerde bijdragen, die pontificaal in strijd waren met de gevestigde natuurkunde en daarom niet direct als stappen vooruit werden gezien. In het centrum van de belangstelling stonden eerder de talrijke nieuwe empirische ontdekkingen die langzamerhand de sluiers wegtrokken waarachter de kleinste deeltjes van de materie, de atomen, altijd verborgen waren geweest. Ook de jonge student Niels Bohr – die net als zijn broer Harald door zijn vader, een hoogleraar fysiologie aan de universiteit van Kopenhagen, voor de exacte wetenschappen was gewonnen – werd gefascineerd door de ontluikende mogelijkheid om een blik te werpen in de wereld van de atomen.

Nadat in 1895 de röntgenstraling was ontdekt en in 1896 de radioactieve straling, wisten in het daaropvolgende jaar de Engelsman J.J. Thomson (geen familie van William Thomson) en de Duitser Philipp Lenard aan te tonen dat de al langer bekende, in gloeibuizen opgewekte, kanaalstralen uit elektrisch geladen deeltjes bestonden, die de naam ‘elektronen’ kregen. Het begon erop te lijken dat de sinds lang ondeelbaar gedachte atomen toch zelf weer uit verschillende ingrediënten waren samengesteld. Welke rol elektronen precies speelden in atomen was nog onduidelijk. Thomson zelf dacht dat atomen uitsluitend uit elektronen bestonden: enkele duizenden per atoom. Ook verwachtte men dat die elektronen op de een of andere manier verantwoordelijk waren voor het chemische gedrag van stoffen en voor de andere pas ontdekte vormen van straling. Het was zonneklaar dat de bouw van atomen een belangrijk nieuw onderzoeksgebied zou gaan vormen.

Hoe snel deze belofte werd ingelost bleek in 1909, het jaar waarin Bohr afstudeerde. In Manchester ontdekten Hans Geiger

en Ernest Marsden dat alfadeeltjes (een recent ontdekte vorm van radioactieve straling) die werden afgeschoten op goudfolie, daar meestal dwars doorheen schoten maar heel af en toe volkomen werden teruggekaatst. Het atoom bleek geen min of meer homogene klont van enkele duizenden elektronen te zijn. Voor dit beeld in de plaats kwam het atoommodel van Ernest Rutherford. Hierin was het atoom net zo opgebouwd als het zonnestelsel: bijna alle massa bevindt zich in een relatief zeer kleine kern, waaromheen de veel lichtere elektronen cirkelen.

Het was deze opwindende speurtocht naar het inwendige van de atomen waaraan Bohr zijn steentje wilde bijdragen, nadat hij in 1911 in Kopenhagen was gepromoveerd op een dissertatie over de toepassing van de klassieke elektrodynamica op het gedrag van geladen deeltjes in metalen. De Carlsbergstichting verleende hem een beurs om een jaar in Engeland postdoctoraal werk te doen. Hij ging naar het Cavendish-laboratorium in Cambridge, waar hij met de door hem bewonderde ontdekker Thomson hoopte te werken. Deze bleek echter weinig tijd voor hem te hebben en zijn verblijf dreigde op een teleurstelling uit te lopen. Zijn leven nam echter een gelukkige wending toen hij Rutherford ontmoette, die zijn enthousiasme en zijn scherpte wist te waarderen en hem uitnodigde naar Manchester te komen. Daar schreef Bohr het beroemde *Rutherford memorandum* waarin hij uitgebreid inging op de theoretische problemen rond Rutherfords kernmodel van het atoom. De grootste moeilijkheid was de stabiliteit van zo'n atoom, of liever gezegd de instabiliteit. Zowel om mechanische als om elektromagnetische redenen kon de om de kern draaiende wolk elektronen onmogelijk intact blijven: de elektronen zouden al snel in de kern terechtkomen. Toch werd dit scenario gelogenstraft door de feiten.

De oplossing die Bohr koos, straalde het zelfvertrouwen uit van het genie dat weet dat de toekomst hem gelijk zal geven: hij stapte af van een continu verloop van de atoomstructuur door eenvoudigweg te stellen dat de bewegingsenergie van elk elektron in zijn baan om de kern alleen bepaalde waarden kon hebben. (Namelijk een geheel aantal malen de frequentie waarmee het

elektron rond de kern cirkelde, vermenigvuldigd met een constante die precies de helft was van de constante van Planck.) Hij erkende volmondig dat hij van deze hypothese ‘geen mechanische fundering zal geven, omdat dit een hopeloze opgave lijkt’, maar in een noot motiveerde hij dat als volgt: ‘Dit was te verwachten, want het lijkt inmiddels onomstotelijk bewezen dat de mechanica de feiten in de problemen rond enkele atomen niet kan verklaren.’ Dat het te verwachten was dat de toekomstige theorie van atomaire processen niet in overeenstemming zou zijn met de klassieke mechanica, kon echter nauwelijks worden aangemerkt als rechtvaardiging van Bohrs specifieke hypothese.

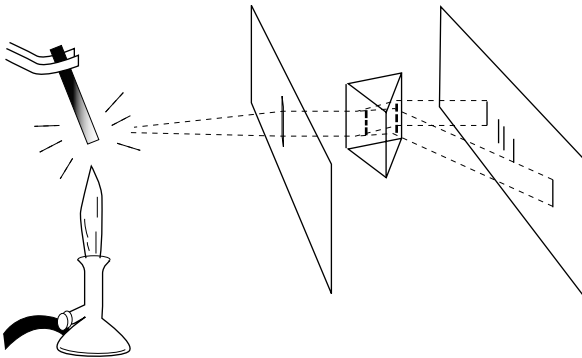
Bohrs hypothese vertoonde een oppervlakkige gelijkenis met de door Planck en Einstein (in heel verschillende contexten) gevonden relatie $E=lv$, maar dit was niet meer dan een analogie. Een soort van rechtvaardiging zou pas jaren later gegeven worden. De hypothese bleek echter buitengewoon vruchtbaar te zijn. In drie achtereenvolgende artikelen in de jaargang 1913 van het *Philosophical Magazine* publiceerde Bohr de gevolgtrekkingen die hij kon afleiden uit zijn veronderstelling van een gequantiseerde kinetische energie van de atomaire elektronen. De hoofdprijs was een vrijwel uitputtende verklaring van de structuur van het stralingsspectrum van de elementen, in het bijzonder van waterstof.

7.4 Bohrs theorie gestaafd: spectraallijnen en het periodiek systeem

In de loop van de negentiende eeuw was duidelijk geworden dat elk element, wanneer het aan het gloeien wordt gebracht, geen licht uitzendt waarin alle frequenties (kleuren) vertegenwoordigd zijn – zoals het licht van een kaarsvlam, de zon of, in het ideale geval, een zwart lichaam – maar licht waarin slechts een beperkt aantal frequenties aanwezig zijn. Welke frequenties dat precies zijn, verschilt van element tot element. Elk element heeft een eigen patroon van frequenties en bijbehorende intensiteiten dat kenmerkend is voor dat element, het zogenaamde *stralingsspectrum* van het element. Men bestudeerde zo’n stralingsspectrum door

het uitgezonden licht, via een dunne spleet in een scherm, op een prisma of een tralie te laten vallen. Het prisma of tralie breekt het licht: de hoek waaronder het licht uittreedt, varieert met de frequentie. Wanneer het uittreedende licht op een fotografische plaat of film wordt opgevangen, is na het ontwikkelen een reeks smalle strepen te zien: elke streep is het beeld van de dunne spleet waardoor het licht op het prisma of tralie is gevallen, en correspondeert met een frequentie die in het uitgezonden licht aanwezig is (zie afbeelding 7.2). Vanwege dit karakteristieke patroon van strepen of lijnen, één per frequentiewaarde, spreekt men in plaats van over lichtfrequenties meestal over spectraallijnen.

Van bijna alle elementen waren de stralingsspectra nauwkeurig opgenomen en bestudeerd. Met name had men geprobeerd er patronen in te ontdekken. Dat bleek niet mee te vallen. De enige persoon die hierin succes boekte was een wat obscure fysicus en leraar aan een meisjesschool in Basel, Johann Balmer. In 1885 liet Balmer zien dat de frequenties van het licht dat wordt uitgezonden door atomaire waterstof precies pasten in de formule



Afbeelding 7.2: Een gloeiend materiaal van één element, een verhit stuk metaal bijvoorbeeld, zendt straling uit van heel specifieke frequenties. Het frequentiespectrum kan zichtbaar worden gemaakt door de straling door een nauwe spleet te laten vallen en vervolgens te splitsen met een prisma. Het resultaat is een projectie van spectraallijnen.

$$\nu_{ab} = R \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right)$$

wanneer men voor b de waarde 2 invulde en voor a de waarden 3, 4, enzovoort. (De grootste waarde voor a waarmee een meetbare frequentie correspondeerde was 16. R was een evenredigheidsconstante waarvan de waarde empirisch moest worden vastgesteld.) De grote triomf van Bohrs atoomtheorie was dat hij ermee kon afleiden dat het licht dat wordt uitgezonden door een stof waarvan de atomen bestaan uit een kern waaromheen één elektron cirkelt – en dat is waterstof – inderdaad moest voldoen aan de formule van Balmer.

Die afleiding ging als volgt. Volgens de hypothese van Bohr kon de bewegingsenergie van elektronen slechts bepaalde waarden aannemen: ze konden alleen in bepaalde banen om de kern draaien. Het uitzenden van licht door een atoom kon worden verklaard door aan te nemen dat een elektron met een bepaalde energie in één klap kon overgaan naar een nieuwe toestand met een lagere energie, waarbij het energieverschil werd uitgestraald als een lichtpakketje. De frequentie van het licht werd dan bepaald door het energieverschil tussen de twee elektrontoestanden, volgens de eerdergenoemde formule $E=hf$. Een elektron waarvan de kinetische energie een bepaald veelvoud van $\frac{1}{2}hf$ is (waarbij f weer staat voor de baanfrequentie van het elektron), kan overspringen naar elke toestand waarvan de kinetische energie een lager geheel aantal keren $\frac{1}{2}hf$ was.

De verschillende frequenties uit de formule van Balmer correspondeerden nu met de overgangen van de elektronbanen met een kinetische energie van drie en meer maal $\frac{1}{2}hf$ naar een baan met een energie van tweemaal $\frac{1}{2}hf$. Volgens Bohrs theorie konden er ook overgangen plaatsvinden van banen met een energie van twee of meer maal $\frac{1}{2}hf$ naar de baan met de laagste energie $\frac{1}{2}hf$, maar daarbij werd geen zichtbaar maar ultraviolet licht uitgezonden. Behalve het patroon van het lijnenspectrum van waterstof kon Bohr ook de waarde van de evenredigheidsconstante R correct voorspellen, doordat hij deze wist uit te drukken in de massa en de lading van het elektron, de constante van Planck en het *atoomgetal* van het element. Het atoomgetal was het getal dat

de positie van het element in het periodiek systeem aangaf. Later werd het herkend als het aantal positieve ladingen of protonen in de kern, bij een compleet atoom gelijk aan het aantal elektronen dat eromheen draait.

En nog was Bohrs atoommodel niet uitgeput. Het gaf ook een interpretatie van de zogenaamde Pickeringlijnen, die in 1896 door Edward Pickering waren ontdekt in sterlicht. Deze lijnen konden worden beschouwd als licht dat was uitgezonden bij overgangen in He^+ -atomen – helium-atomen die een van hun elektronen waren kwijtgeraakt en waarin dus nog maar één elektron rond de kern draaide. Deze atomen zijn vergelijkbaar met waterstofatomen, met dit verschil dat het atoomgetal van helium twee is in plaats van één. De evenredigheidsconstante R , zoals Bohr die berekende, hing af van het atoomgetal in het kwadraat. Er verscheen echter een bezwaar in het tijdschrift *Nature*: de evenredigheidsconstante die voor Pickeringfrequenties moet worden ingevuld in de formule van Balmer is niet precies viermaal die van waterstof, maar 4,0016 maal die waarde. Bohr keek nog eens goed naar zijn afleiding en ontdekte dat hij ter vereenvoudiging de atoomkern had beschouwd als oneindig zwaar in vergelijking met de massa van een elektron. Het schrappen van die vereenvoudiging en het meenemen van de werkelijke massa van de kern leidde tot een voorspelling van 4,00163 maal de waterstofwaarde. Zoals Bohrs biograaf Pais het uitdrukt: ‘Een dergelijk staaltje was op het terrein van de spectroscopie nog door niemand eerder geleverd.’ Dit was ook de overtuiging van Bohrs collega’s. Toen Einstein van het voorval rond de Pickeringlijnen hoorde, zei hij: ‘Dit is een enorme prestatie. De theorie van Bohr moet waar zijn.’

Toch konden deze aanvankelijke successen niet verhullen dat Bohrs atoomtheorie in talloze opzichten te eenvoudig was. De aanvankelijke veronderstelling dat de elektronen in cirkelvormige banen rond de kern draaien, hield geen stand: de banen bleken ook ellipsvormig te kunnen zijn. Bovendien bleek het elektron niet alleen om de kern te draaien maar ook om zijn eigen as. In de aanwezigheid van elektrische en magnetische velden maakte de oriëntatie van de baan of van de elektron-as ten opzichte van deze

velden dan ook uit voor de energie van het elektron. Wel bleek die energie steeds weer gequantiseerd te zijn: ze kon slechts een geheel aantal keren $\frac{1}{2}h\nu$ zijn.

In de uitgebreide versie van het atoommodel zijn de elektronenbanen gegroepeerd in 'schillen', die van elkaar verschillen in hun basisenergie en in de langgerektheid van hun elliptische baan. Elke schil kan worden gevuld met elektronen tot een bepaald maximum: twee in de binnenste schil, acht in de volgende (de n -de schil kan $2 \cdot n^2$ elektronen bevatten), waarbij het aantal wordt bepaald door de verschillende oriëntatiemogelijkheden van de baan en de draaias. Hiermee kon de opbouw worden verklaard van het periodiek systeem van elementen, dat in 1869 door de Rus Mendelejev was ingevoerd om patronen in de chemische eigenschappen van de verschillende elementen weer te geven. Bohr kon laten zien dat bij het stijgen van het atoomgetal de elektronenschillen langzaam gevuld worden, van binnen naar buiten, waarbij de elektronen die overblijven voor de buitenste schil het chemisch gedrag van de stof bepalen.

Dankzij deze uitleg van de relatie tussen atoombouw en periodiek systeem slaagden Bohr en zijn medewerkers erin het raadsel van de zogenaamde 'zeldzame aarden' op te lossen. Deze groep van chemisch zeer nauw verwante elementen had zich tot dan toe moeilijk laten inpassen in het periodiek systeem. Bohr wist aannemelijk te maken dat bij deze elementen de elektronenschil die geleidelijk wordt opgevuld een meer naar binnen gelegen schil is, terwijl de buitenste schil steeds hetzelfde aantal elektronen bevat. Op grond hiervan wisten zij dat de Fransman Urbain ongelijk had toen deze beweerde dat hij een volgende zeldzame aarde had ontdekt, het element met atoomgetal 72, dat hij celtium wilde noemen. De binnenschil waarin de zeldzame aarden er telkens een elektron bij kregen, was met de elementen 70 en 71 vol geraakt. Element 72 kreeg volgens hun theorie een elektron erbij in een buitenschil en moest daarom lijken op zirkonium, dat een vergelijkbare opbouw van de buitenste elektronenschil kende. Inderdaad slaagden chemici in Kopenhagen erin het element met atoomgetal 72 aan te tonen in bijna alle zirkoniumertsen. Het element kreeg de naam hafnium, naar Hafniae, de

Latijnse benaming voor Kopenhagen – hoewel Bohr het achteraf liever danium had genoemd.

De succesvolle voorspelling dat hafnium via zirkonium te vinden moest zijn, was inhoudelijk gezien de kroon op Bohrs werk aan zijn model voor het atoom. Ze kwam nauwelijks een maand na de openbare erkenning van het belang van zijn werk door zijn collega's, in 1922, in de vorm van de Nobelprijs.

7.5 Problemen voor de klassieke fysica: het Compton-effect

De verklaringskracht van Bohrs quantumtheorie van het atoom was eigenlijk een wonder, gezien het feit dat de theorie voornamelijk uit losse eindjes bestond. Nogal wat aspecten van de baanovergangen van elektronen in aan atoom bleven onverklaard: de verschillen in intensiteit van de lijnen uit het stralingsspectrum van een element; de tijdsduur die verstrijkt voordat een 'aangeslagen' elektron terugvalt naar een baan met een lagere energie; welke baan dat zal zijn; en de richting waarin de straling wordt uitgezonden.

Voor degenen die vasthielden aan een klassiek beeld van de interactie tussen materie en straling, waarbij straling werd voorgesteld als een continu trillingsverschijnsel in overeenstemming met de elektrodynamica van Maxwell (zie par. 4.7), leek één interpretatie van het discontinue karakter van de uitstraling van licht door atomen onvermijdelijk. De fundamentele wetten die het botsingsgedrag van deeltjes en de wisselwerking tussen materie en straling in de klassieke gevallen beheersten, waren de wet van behoud van energie (de eerste hoofdwet van de thermodynamica, zie par. 5.3) en de wet van behoud van impuls. De *impuls* is een maat voor de 'hoeveelheid beweging' (zie ook par. 3.1) en wordt bepaald door de snelheden van de betrokken lichamen – inclusief de richting ervan – en hun massa. Deze beide wetten, zo concludeerde men nu, golden kennelijk niet voor de wisselwerking tussen individuele atomen en straling.

Het was niet vreemd dat men deze mogelijkheid over-

woog. Boltzmann was tot de overtuiging gekomen dat de tweede hoofdwet van de thermodynamica moest worden opgevat als een statistische wet (zie par. 5.5), die niet gold op het niveau van de individuele deeltjes waaruit de materie is opgebouwd. Dan volgde al snel de vraag of dit niet evenzeer het geval zou kunnen zijn voor de eerste hoofdwet, de wet van behoud van energie. De consequenties van deze stap zouden echter aanmerkelijk groter zijn, omdat het energiebegrip, anders dan het entropiebegrip van de tweede hoofdwet, het enige houvast leek voor een theorie over het gedrag van atomen onder invloed van erop inwerkende krachten, zoals de mechanica dat beschreef voor klassieke deeltjes.

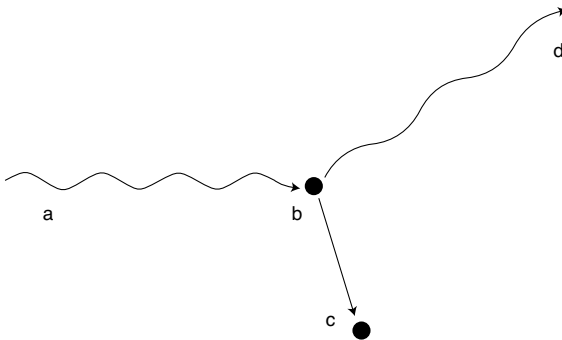
Dat men toch een statistische uitleg van de eerste hoofdwet overwoog, is alleen begrijpelijk omdat men iets anders nog belangrijker vond: het vasthouden aan de klassieke, continue interpretatie van straling. Dat gold zeker voor Bohr. Einsteins 'zeer revolutionaire' stap om, althans in sommige omstandigheden, licht op te vatten als een stroom lichtquanta, die een deeltjeskarakter hebben, was voor hem, en voor velen met hem, té revolutionair. Iets van de discontinue aard van het licht zou dan toch in een of ander optisch verschijnsel merkbaar moeten zijn, zo meende hij. De golftheorie van licht, en de elektrodynamica waarop die rustte, waren te goed bevestigd.

Bohrs afkeer van lichtquanta ging zelfs zo ver dat hij in zijn Nobelrede in december 1922 verklaarde: 'De hypothese van lichtquanta kan geen licht werpen op de aard van straling.' En dat terwijl bij dezelfde gelegenheid de voor Einstein bestemde Nobelprijs voor 1921 werd uitgereikt, 'in het bijzonder voor zijn ontdekking van de wet van het foto-elektrisch effect'. Einstein nam de prijs overigens niet persoonlijk in ontvangst, omdat hij in Japan verbleef.

Anders dan Bohr had Einstein de mogelijkheid dat de wetten van behoud van energie en impuls op atomaire schaal niet zouden gelden, wel overwogen maar bijna onmiddellijk verworpen. Hij leek gelijk te krijgen in 1923, toen de Amerikaan Arthur Compton zijn sensationele resultaten publiceerde over de verstrooiing van licht aan elektronen. Compton deed een experiment waarbij

hij een röntgenstraal (te beschouwen als licht met een zeer korte golflengte) liet vallen op een blok grafiet. Een deel van de straling ging rechtdoor; een deel boog af onder verschillende hoeken. Men veronderstelde dat deze straling werd verstrooid door botsing met elektronen. Het bleek nu dat de verstrooide straling een andere frequentie had gekregen, die lager was naarmate de verstrooiingshoek groter was.

De uitkomst van Comptons experiment was verklaarbaar als men veronderstelde dat licht bestond uit een bundel lichtquanta, die niet alleen een energie hadden maar ook een impuls. (Maar dan wel een ‘relativistische’ impuls: volgens Einsteins $E=mc^2$ kon aan lichtdeeltjes, die klassiek gezien geen massa hadden, toch een impuls worden toegekend.) Wanneer de botsingen tussen lichtquanta en elektronen net zo werden beschouwd als botsingen tussen klassieke puntdeeltjes, waarvoor de wetten van behoud van energie en impuls golden, volgde precies het door Compton gevonden effect (zie afbeelding 7.3). Hoe groter de verandering van de impuls van het lichtquantum, hoe meer im-



Afbeelding 7.3: Uitleg van het Compton-effect in termen van Einstein. De botsing tussen licht en een elektron kon net zo worden beschreven als een botsing tussen twee biljartballen, als men het licht opvatte als een stroom deeltjes met een eigen impuls. Een lichtdeeltje (a) wordt afgeschoten op een ‘stilstaand’ elektron (b). Het elektron schiet weg onder een hoek (c) en het lichtdeeltje kaatst weg, nu met een lagere frequentie (d).

puls en dus ook bewegingsenergie er aan het elektron werd overgedragen, en volgens de formule $E=hf$ correspondeert dit energieverlies van het lichtquantum met een afname van de frequentie van het licht.

Toch liet Bohr zich hierdoor niet overtuigen. In die tijd werkte hij – samen met zijn vaste medewerker, de Nederlander Henk Kramers, en een Amerikaanse assistent, John Slater – aan een theorie over de wisselwerking tussen atomen en straling die in 1924 gepubliceerd werd. In deze theorie worden alle mogelijke overgangen voor een atoom in een zekere toestand vervat in een ‘onwerkelijk’ stralingsveld dat het atoom met andere atomen uitwisselt. Zowel de wetten van behoud van energie en impuls als het causaliteitsprincipe (dat zegt dat gevolgen eenduidig bepaald worden door oorzaken die eraan voorafgaan) werden op atomair niveau opgegeven; ze golden alleen nog in de vorm van statistische generalisaties. Al binnen een jaar sneuvelde de theorie. Dat kwam door experimenteel werk aan het Compton-effect, waarbij zowel Walther Bothe en Hans Geiger in Duitsland als Arthur Compton en Alfred Simon in de Verenigde Staten wisten aan te tonen dat energie en impuls behouden waren in elke individuele botsing.

De theorie van Bohr, Kramers en Slater was een ongelukkige greep voor alle betrokkenen, zoals hieronder nog zal blijken. Bohr zou hierna geen eigen bijdragen meer leveren aan de ontwikkeling van de zogenaamde ‘nieuwe quantummechanica’, die vooral in de jaren 1925 en 1926 tot ontwikkeling kwam en die de ‘oude quantummechanica’ van Bohr zou vervangen.

7.6 De nieuwe quantummechanica of golfmechanica

Bohr ging zich nu onvermoeibaar bezighouden met de fysische betekenis die achter de wiskundig geformuleerde voorstellen schuilging en met de interpretatie van de nieuwe theorie die daaruit zou resulteren. Zijn ideeën liet hij vooral los op de jonge Duitse fysicus Werner Heisenberg, die tussen 1924 en 1927 in totaal bijna twee jaar in Kopenhagen werkte en in die tijd enkele

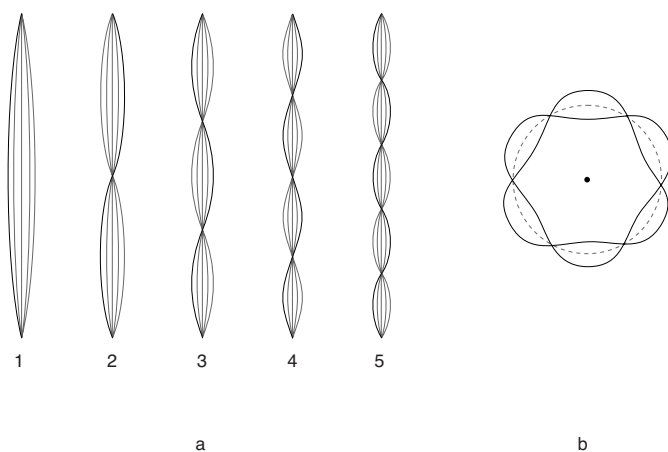
van de belangrijkste bijdragen aan de ontwikkeling van de nieuwe quantummechanica leverde.

De nieuwe quantummechanica geldt als een vreemde theorie, maar de manier waarop ze haar opwachting maakte was minstens zo vreemd. In feite werd de theorie twee keer voorgesteld, in twee vormen die elkaar bijna leken tegen te spreken, maar die toch dezelfde theorie bleken te zijn. De eerste vorm werd in 1925 opgesteld door – onafhankelijk van elkaar – Werner Heisenberg in Duitsland (met hulp van Max Born en Pascual Jordan) en Paul Dirac in Engeland. Hun doel was een theorie die een juiste voorspelling kon geven van de verschillende intensiteiten van spectraallijnen en van de waarschijnlijkheid van overgangen tussen elektronbanen, zoals die uit de empirie bekend waren. Dit keer gaven ze niet de wet van behoud van energie op of het causaliteitsprincipe, maar het idee dat het elektron werkelijk een baan om de atoomkern beschrijft – dat wil zeggen, het idee dat het elektron op elk moment in de tijd een precieze positie inneemt in de ruimte ergens bij de atoomkern. In plaats daarvan mocht de theorie louter zijn gebaseerd op relaties tussen grootheden die in beginsel waarneembaar waren. De positie van het elektron, en trouwens ook zijn impuls, werd daartoe voorgesteld door een *matrix*, een reeks over rijen en kolommen verdeelde getallen die de positie of impuls voorstellen in een bepaalde toestand of ‘tijdens’ een overgang tussen twee toestanden. Wolfgang Pauli slaagde erin met behulp van deze theorie de Balmerformule voor het lijnenspectrum van waterstof af te leiden, wat een van de belangrijkste wapenfeiten van de oude theorie was geweest.

De tweede vorm waarin de theorie werd voorgesteld, had zijn oorsprong in de door Bohr met zo veel wantrouwen bejegende lichtquantumhypothese van Einstein. In het ver van alle fysische gewoel gelegen Parijs bedacht de jonge promovendus Louis de Broglie dat Einsteins suggestie dat licht, dat tot dan toe als een continu golfverschijnsel behandeld was, zich in sommige omstandigheden voordoet als deeltjes, moest worden opgevat als een aspect van een veel algemener feit. Het idee kon ook worden omgekeerd: verschijnselen die tot dan toe als discrete deeltjesverschijnselen waren opgevat, zouden zich in bepaalde omstandighe-

den juist voordoen als golven. Zo kon ook met elektronen een golf worden geassocieerd, via de formules voor energie en impuls die werden gebruikt voor licht: het elektron had een energie en een impuls, respectievelijk $E=hf$ en $p=h/\lambda$, waarbij f de frequentie van de golf was en λ de golflengte. Deze veronderstelling bood eindelijk een manier om de quantisatie van de energie van het elektron in een atoom te begrijpen. Het elektron kon alleen in die banen om de kern draaien waar zijn halve golflengte een geheel aantal keren in paste (zie afbeelding 7.4). Dit kwam precies overeen met de regel die Bohr simpelweg moest aannemen, namelijk dat alleen energiewaarden van een geheel aantal keren $\frac{1}{2}hf$ waren toegestaan.

Wellicht zou deze veronderstelling over het golfkarakter van materie en de mogelijkheid om de gequantiseerde elektronbanen in een atoom op te vatten als staande golven jarenlang



Afbeelding 7.4: a. Een snaar kan alleen met bepaalde frequenties trillen, zó dat de halve golflengte een geheel aantal keren op de lengte van de snaar past. Hoe hoger de frequentie, des te korter de golflengte en des te hoger de toon. 1 stelt de grondtoon van de snaar voor, bij 2 past er een hele golflengte op de snaar; 2-5 zijn boventonen. b. Ook een elektron kan worden beschouwd als een golfverschijnsel: het kan alleen met bepaalde energiewaarden (frequenties) in een stabiele baan rond de kern draaien.

onopgemerkt zijn gebleven, als Einstein niet was gevraagd om een oordeel te geven over De Broglies proefschrift. Hij gebruikte het idee meteen in een artikel, dat werd gelezen door de Oostenrijkse fysicus Erwin Schrödinger. Die slaagde erin de veronderstelling uit te werken tot een theorie over het elektron in een atoom.

Aan het elektron werden door Schrödinger geen positie, snelheid en omlooppfrequentie rond de kern toegekend, maar een golf functie waarvan het gedrag werd bepaald door een golfvergelijking, later de Schrödinger-vergelijking genoemd. Ook hij wist uit deze theorie de Balmerformule voor het spectrum van waterstof af te leiden, zodat het er even op leek dat men na jaren in het duister getast te hebben, nu plotseling over twee volstrekt verschillende theorieën voor dezelfde verschijnselen beschikte – de matrixmechanica van Heisenberg, Born en Jordan en de golfmechanica van Schrödinger. Schrödinger zelf wist echter binnen enkele maanden aan te tonen dat de twee theorieën slechts twee wiskundig verschillende manieren waren om dezelfde natuurkundige theorie op te schrijven.

Er mocht dan één quantummechanica zijn voor zover men met de theorie rekende, over de betekenis van de fysische processen die achter de theorie schuilgingen ontstond direct groot verschil van mening. Schrödinger had in de ‘materiegolven’ van De Broglie een mogelijkheid gezien om de quantumverschijnselen te verzoenen met het wereldbeeld van de klassieke natuurkunde. Hij hoopte de golf functie waarmee het elektron in een atoom werd beschreven te kunnen interpreteren als de beschrijving van een continu rond de atoomkern verdeelde hoeveelheid lading. In het algemeen wilde hij deeltjes zien als gelokaliseerde verstoringen in een continu medium, ‘golfpakketjes’. Dit deed hij in navolging van eerdere pogingen om de tweeslachtigheid van de negentiende-eeuwse natuurkunde – het naast elkaar bestaan van uit puntdeeltjes opgebouwde materie en golfverschijnselen – op te lossen door de deeltjes van de klassieke mechanica op te vatten als veldverschijnselen. Deze duiding bleek echter om een aantal uiteenlopende redenen voor iedereen behalve Schrödinger zelf onaanvaardbaar.

In de groep rond Heisenberg opperde Born medio 1926 een interpretatie die al snel door bijna iedereen werd overgenomen. De golf functie die de quantummechanica toekende aan bijvoorbeeld een elektron in een atoom, die een waarde had in elk punt en op elk tijdstip, had zelf heeft geen fysische betekenis, maar het kwadraat ervan wel. Het kwadraat van de golf functie gaf de *waarschijnlijkheid* dat men het beschreven deeltje bij een positie-meting op dat tijdstip op die plaats zou aantreffen. Ook voor andere grootheden dan de positie konden met behulp van de golf functie slechts de kansen worden uitgerekend dat men bij meting van die grootheid bepaalde waarden zou vinden.

Hoewel Schrödingers interpretatie niet werd overgenomen, raakte de vorm die hij aan de quantummechanica gaf direct ingeburgerd. In deze vorm hield de quantummechanica in zekere zin een klassiek deterministisch karakter, maar dat determinisme manifesteerde zich op een ander niveau. In de klassieke natuurkunde bepaalden de eigenschappen van een systeem op een zeker moment volledig de eigenschappen op elk later tijdstip, via de vergelijkingen van de klassieke mechanica (of hun verbeterde vorm, de relativiteitstheorie) en de elektrodynamica. In de quantummechanica zijn het nog slechts de waarschijnlijkheden dat men een bepaald gedrag op een later tijdstip zal zien, die via de Schrödingervergelijking volledig worden bepaald door de waarschijnlijkheden op een eerder moment.

Borns interpretatie werd weliswaar door bijna iedereen overgenomen, maar niet door Einstein, die toch aanvankelijk de meest radicale stappen over de drempel van de quantumwereld had gezet. Volgens de voor hem onacceptabele interpretatie bevatte de meest fundamentele beschrijving die we van atomaire deeltjes kunnen geven slechts waarschijnlijkheidsinformatie over hun gedrag. Deze waarschijnlijkheid gaat niet terug op het feit dat we onbekend zijn met hun werkelijke gedrag, zoals dat het geval was in de statistische mechanica, waaraan Einstein belangrijke bijdragen heeft geleverd. We kunnen niet dichter bij het werkelijke gedrag komen, bij de werkelijke eigenschappen van de deeltjes, omdat die er volgens deze interpretatie van de quantummechanica gewoon niet zijn.

Hoe ingrijpend dit loslaten van enkele van de uitgangspunten van de klassieke fysica was, werd toen nog niet door iedereen even helder ingezien. Eind 1926 gaf Einstein in een brief aan Born echter al aan dat hij er geen genoegen mee zou nemen:

De quantummechanica dwingt zeker ontzag af. Maar een stem vanbinnen zegt me dat het nog niet de ware Jakob is. De theorie kan veel maar ze brengt ons nauwelijks dichterbij het geheim van de Oude Baas. Ik ben er in ieder geval van overtuigd dat *hij* niet dobbelt.

Vanaf dat moment zou Einstein bij de zoektocht naar de uiteindelijke quantumtheorie niet langer de rol van voortrekker spelen, maar die van criticus langs de zijlijn. Voor Schrödinger gold hetzelfde. Omstreeks dezelfde tijd riep hij vertwijfeld tegen Bohr: ‘Als het bij dit verdomde quantumgesprek gaat blijven, betreur ik het dat ik me ooit met de atoomtheorie heb ingelaten.’

7.7 Complementariteit – Bohrs invloed

Hoewel Born in het Duitse Göttingen werkte, werd de waarschijnlijkheidsinterpretatie van de golffunctie de basis voor wat de ‘Kopenhaagse interpretatie’ werd genoemd. Deze naamgeving was een finaal eerbetoon aan Bohr, die na de zomer van 1926 vastbesloten was de betekenis te achterhalen van het feit dat op atomaire verschijnselen zowel een deeltjesbeschrijving als een golfbeschrijving van toepassing was. Hierover discussieerde hij bijna dag en nacht met Heisenberg, die net een docentschap in Kopenhagen had gekregen. In deze maanden kwam Heisenberg tot de formulering van zijn beroemde onzekerheidsrelatie: de positie en de snelheid van een atomair deeltje kunnen niet tegelijkertijd ‘scherpe’ waarden hebben. De bovengrens aan deze scherpte wordt gegeven door de uitdrukking

$$\Delta p \Delta q \geq \frac{h}{2\pi}$$

waarbij Δq de onbepaaldheid van de plaats is en Δp de onbepaaldheid van de waarde van de impuls. Natuurlijk is h weer de constante van Planck. Deze formule houdt in dat als een van de twee waarden, de plaats óf de impuls van een deeltje, preciezer bepaald wordt, de onbepaaldheid van de andere net zo snel groter wordt.

Nadenkend over de precieze betekenis van deze onzekerheidsrelatie kwam Bohr tot de notie van *complementariteit*. Alle begrippen die we gebruiken bij onze pogingen de natuur te beschrijven, zoals plaats, tijd, kracht en massa, hebben hun wortels in experimentele procedures, en de taal waarin deze worden beschreven is de taal van de klassieke natuurkunde. De klassieke taal is daarom de enige taal die beschikbaar is om in alle natuurverschijnselen, op welke schaal dan ook, door te dringen. Bij de quantumverschijnselen zijn we op de grenzen van deze taal gestuit. We kunnen deze verschijnselen nog slechts fragmentarisch beschrijven, waarbij we afwisselend gebruik maken van verschillende delen van onze klassieke theorieën, die elk op zich ontoereikend zijn. Zo hebben we bij de beschrijving van quantumprocessen zowel de beschrijvingsvorm van (klassieke) deeltjesprocessen nodig als de beschrijvingsvorm van (klassieke) golfverschijnselen; soms geeft de deeltjesbeschrijving de juiste uitkomsten, soms de golfbeschrijving. Geen van beide beschrijvingswijzen is op zichzelf voldoende om het gedrag van de atomaire processen volledig in kaart te brengen: golf- en deeltjeskarakter zijn complementair.

De intensieve gesprekken tussen Bohr en Heisenberg maakten duidelijk dat ze lang niet altijd op dezelfde golflengte zaten. Het is tekenend dat beiden hun bijdrage uitwerkten toen ze enkele weken alleen waren. Heisenberg was geneigd eenvoudigweg voor lief te nemen dat de quantumwereld anders was dan de klassieke: men moest leren in quantumtermen te denken. Bohr daarentegen wilde niet rusten voor hij begreep waar de eigenaardigheden van quantumprocessen vandaan kwamen. Hij vond dat Heisenberg de kwintessens van het probleem miste en bijvoorbeeld ook zijn eigen onzekerheidsrelatie niet goed begreep. Tijdens de felle gesprekken hierover verliet Heisenberg zelfs een keer in tranen de

kamer omdat de druk die Bohr uitoefende hem te veel werd.

Ook Bohrs andere medewerkers leden onder zijn dwingende karakter. Voor zichzelf was hij echter net zo hard. Hij vond nooit de juiste woorden om zijn ideeën uit te drukken. Het schrijven van zijn eerste artikel over het complementariteitsprincipe, dat hij in september 1927 presenteerde tijdens een conferentie in het Italiaanse Como, bleek een ramp. Vijf maanden lang dicteerde hij gedurende de ochtend zinnen aan zijn assistent Oskar Klein, om alles de volgende ochtend in de prullenbak te gooien en opnieuw te beginnen. Slechts na ingrijpen van zijn broer Harald wist hij het stuk te voltooiën. Dit valt te rijmen met de nadruk die Bohr legde op het belang van de taal én op de beperkingen van de taal bij het beschrijven van de natuur.

Het complementariteitsbegrip kreeg minder waardering dan Bohr had gewenst. Men vatte het vooral op als een motivering van de keuzen die bij het opstellen van de quantumtheorie waren gemaakt en niet als essentieel voor een juist begrip van de theorie zelf. De meerderheid van de fysici ging het erom dat de gemaakte keuzen de juiste uitkomsten opleverden – en wat dat betreft heeft de quantummechanica zich meer dan bewezen. Een verdere verklaring kon beter achterwege worden gelaten, vonden velen, zeker als die werd gegeven in termen van absolute grenzen aan de menselijke kennis.

Soms viel in Bohrs gehamer op complementariteit zelfs een neiging tot mystiek te bespeuren. Hij breidde het principe al vrij snel uit naar andere terreinen. Zo was het volgens hem onmogelijk om dieren en planten binnen één beschrijvingswijze tegelijkertijd als levende organismen en als structuren van dode materie te behandelen, of om mentale verschijnselen tegelijkertijd te beschouwen als vormen van intentioneel bewustzijn en als processen tussen hersencellen. Slechts weinigen volgden hem hierin en het heeft de status van het complementariteitsprincipe in de natuurkunde geen goed gedaan. Bohrs enorme betekenis voor de ontwikkeling van de quantummechanica is er echter niet minder om.

7.8 Latere ontwikkelingen van de quantummechanica

De quantummechanica was in eerste instantie ontworpen om het gedrag van atomen te beschrijven, en met name het gedrag van de elektronen in atomen. De kracht die dit gedrag bepaalt was bekend: de elektromagnetische aantrekkingskracht tussen de negatief geladen elektronen en de positief geladen atoomkern. Het werk van Rutherford op gebied van de bouw van de atoomkern maakte echter duidelijk dat de elektromagnetische kracht niet de enige wisselwerking kon zijn die op het niveau van de kleinste bouwstenen van de materie werkzaam is. (Vanzelfsprekend werkt de zwaartekracht op dat niveau ook, maar vanwege de geringe massa's van atomaire deeltjes kunnen de effecten daarvan gevoeglijk verwaarloosd worden.) Het bleek namelijk dat de kern van een willekeurige atoomkern is opgebouwd uit eenheden die overeenkomen met de kern van het waterstofatoom, die door Rutherford *protonen* werden genoemd. Aangezien elk proton positief geladen was, zou een opeenhoping van protonen in een atoomkern nooit een stabiel systeem kunnen opleveren als er alleen sprake was van een elektromagnetische krachten. Zo'n kern zou door de onderlinge afstoting van de protonen uit elkaar moeten vliegen. De kracht die verantwoordelijk is voor het bij elkaar houden van de protonen in een atoomkern werd de *sterke kracht* genoemd, omdat ze sterk genoeg is om de onderlinge afstoting van de protonen te overwinnen.

In 1932 ontdekte John Chadwick dat in de atoomkern ook nog een ongeladen deeltje voorkwam, dat door hem *neutron* werd genoemd. Dit deeltje was niet stabiel: het kon vervallen, waarbij een proton en een elektron ontstonden. Bestudering van dit verval, dat al gauw in verband werd gebracht met het sinds 1896 bekende radioactieve verval van atoomkernen, leidde tot de veronderstelling van het bestaan van een vierde soort wisselwerking tussen atomaire deeltjes, de *zwakke kracht* – zo genoemd omdat ze niet sterker maar juist zwakker is dan de elektromagnetische kracht. Grootschalig onderzoek in de tweede helft van de twintigste eeuw, waarbij men elektronen en protonen tot steeds grotere snelheden versnelde en vervolgens op stilstaande waterstofkernen

of op elkaar liet botsen, maakte duidelijk dat de zwakke kracht net als de zwaartekracht op alle bekende deeltjes aangrijpt maar, anders dan de zwaartekracht, slechts werkzaam is op een zeer kleine afstand – ongeveer de doorsnede van een atoomkern. Anderzijds bleek de sterke kracht in feite niet direct tussen bijvoorbeeld de protonen en neutronen in een atoomkern te werken, maar een kracht te zijn die door nog kleinere deeltjes op elkaar wordt uitgeoefend. Deze bouwstenen werden *quarks* genoemd. Een proton en een neutron bestaan elk uit drie quarks. In tegenstelling tot alle eerder ontdekte atomaire en subatomaire deeltjes zijn quarks echter deeltjes die niet los kunnen voorkomen. Elektronen daarentegen zijn ook in het moderne standaardbeeld werkelijk elementaire deeltjes.

De voor de elektromagnetische wisselwerking tussen elektron en atoomkern ontwikkelde quantummechanica bleek zich wonderwel te lenen voor een behandeling van zwakke en sterke wisselwerkingen. Daarbij onderging de theorie wel enige gedaantewisselingen, die haar steeds moeilijker te begrijpen maakten voor niet-specialisten. De belangrijkste eerste stap was de ontwikkeling van de quantumelektrodynamica, om de wisselwerking tussen geladen deeltjes en een veld van elektromagnetische straling te kunnen beschrijven. In de jaren zeventig volgde de opname van de zwakke kracht in een geünificeerde ‘elektrozwakke’ theorie. Aan deze theorie is door vele mensen bijgedragen, onder andere door de Nederlanders Martinus Veltman en Gerard 't Hooft, die daar in 1999 de Nobelprijs voor ontvingen.

Ook de sterke kracht lijkt in hetzelfde stramien opgenomen te kunnen worden, al is hier nog veel onzeker. Er is echter nauwelijks zicht op een verzoening tussen het eindresultaat van de klassieke natuurkunde – de algemene relativiteitstheorie of zwaartekrachtstheorie van Einstein – en de quantumtheorie van de drie andere krachten. De kloof tussen de ‘klassieke’ en de ‘moderne’ natuurkunde die in de twintigste eeuw is ontstaan, laat zich niet gemakkelijk dichten.

Aanbevolen literatuur

De meest recente en meest uitgebreide biografie van Bohr is: A. Pais, *Niels Bohr's times, in physics, philosophy and polity*. (Oxford, 1991). Ook S. Rozental (red.), *Niels Bohr. His life and work as seen by his friends and colleagues* (Amsterdam, 1967) biedt veel biografische bijzonderheden. Een biografie van Heisenberg die een goed overzicht geeft van de ontwikkeling van de quantummechanica is: D.C. Cassidy, *Uncertainty. The life and science of Werner Heisenberg* (New York, 1992).

Twee Nederlandstalige inleidingen in de quantumnatuurkunde zijn: J.P. McEvoy en O. Zarate, *Quantummechanica voor beginners* (Rijswijk, 1997), een vertaling van: *Quantum theory for beginners* (Cambridge, 1996); en G. 't Hooft, *De bouwstenen van de schepping. Een zoektocht naar het allerkleinste* (Amsterdam, 1992).

De twee bekendste bundels met opstellen van Bohr zelf zijn ook in Nederlandse vertaling beschikbaar: N. Bohr, *Atomic theory and the description of nature* (Cambridge, 1934, 1961²), Nederlandse vertaling: *Atoomtheorie en natuurbeschrijving* (Utrecht, 1966); en N. Bohr, *Atomic physics and human knowledge* (New York, 1958), Nederlandse vertaling: *Atoomfysica en menselijke kennis* (Utrecht, 1967). Een vergelijkbare bundel van Heisenberg is: W. Heisenberg, *Schritte über Grenze* (München, 1971), Nederlandse vertaling: *Fysica in perspectief* (Utrecht, 1974).

Illustratieverantwoording

- pag. 25: Granger Collectie;
- pag. 55: Huygens museum Hofwijck;
- pag. 81: Library of Congress;
- pag. 109 (links, Faraday): The Royal Institution;
- pag. 109 (rechts, Maxwell): Cavendish Laboratory, University of Cambridge;
- pag. 137 (links, Carnot): Centre National de la Recherche Scientifique;
- pag. 137 (rechts, Boltzmann): Collectie Dieter Flamm;
- pag. 157: Einstein Archive;
- pag. 185: Niels Bohr Archive.

Index

- actio in distans 16, 31, 77, 98, 112, 119, 121, 125
- afstand, werking op; *zie actio in distans*
- alchemie 101, 104, 107
- Algarotti, Francesco 106
- Ampère, André Marie 112, 119
- analogiebeginsel 93, 103, 116, 126
- Arago, Jean François 118, 131
- Archimedes 39, 40, 44, 49, 59
- Aristoteles 29, 31, 43
- aristotelisch wereldbeeld 30-33, 48, 51, 86, 140, 141
- atomisme 30, 151
- atoomgetal 197-199
- atoommodel 193, 194, 198-200
- ballistiek; *zie kogelbaan*
- Balmer, formule van 197, 198, 206
- Balmer, Johann 196
- Bartholinus, Erasmus 64, 67, 75
- Benedetti 40, 41
- Bernoulli, Daniel 151
- Berzelius 151
- Besso, Michele 162
- beweging 28; *zie ook cirkelbeweging, valbeweging*
- eenparige 28, 30, 49, 88, 169
- eenparig versnelde 28, 34, 35, 41, 44, 45, 49
- natuurlijke 31, 32, 34, 37, 41
- relativiteit van 48, 168, 169, 177, 182
- bewegingswetten 85, 100, 169
- bijbelstudie 102, 113
- Black, Joseph 142
- Boerhaave, Herman 83, 105
- Bohr, Harald 193, 210
- Bohr, Niels 188, 193-195, 197, 198, 200, 201, 203, 208, 209
- Boltzmann, Ludwig 152-154, 189, 201
- Borel, Emile 155
- Born, Max 204, 207, 208
- Boscovitsch 151
- Bothe, Walther 203
- botsingswetten 52, 60, 150, 200, 202
- Boyle 52, 141

- breking, wet van 63-65, 68
 Broglie, Louis de 204, 206
 Bunsen, Robert Wilhelm 122
 Buridan 34
- Carnot, Sadi 142, 144, 146
 cartesiaans wereldbeeld 91, 98
 Cavalieri 52
 Chadwick, John 211
 cirkelbeweging 33, 41, 61
 Clapeyron 146
 Clausius, Rudolf 146-151
 Cohen, I.B. 88
 complementariteitsprincipe 209, 210
 Compton, Arthur 201, 203
 Compton-effect 201-203
 contactwerking 84, 98, 100, 103, 119, 125
 copernicaans wereldbeeld 27, 30, 39, 42, 45, 46, 51, 86
- Davy, Sir Humphry 113, 114
 Descartes 47, 65, 73, 87, 91, 96, 99-101
 diëlektricum 122, 130
 Dirac, Paul 204
 dissipatie van energie 147
 Duhem 53
 dynamo 118
- Eddington, Arthur 180
 eenheid; *zie unificatie*
 eenvoud van begrippen 11
 eerste hoofdwet van de thermodynamica; *zie thermodynamica, eerste hoofdwet*
- Einstein, Albert 123, 154, 161, 167, 168, 170, 171, 173, 175-177, 179, 180, 189, 190, 192, 198, 201, 202, 206, 207
 elektriciteit 111, 123, 125, 126
 als deeltjes 128, 129
 als substantie 116
 als toestand van materie 116
 elektrodynamica 112, 168, 170
 elektromagnetisch veld 132, 133
 elektromagnetische golf 129
 elektromagnetische veldtheorie; *zie veldtheorie, elektromagnetische*
 elektromagnetisme 111, 112, 114, 116
 elektromotor 115
 elektron 193, 198, 202
 als golfverschijnsel 205, 206
- elementen
 aarde, water, lucht, vuur 33, 140
 periodiek systeem 199
 spectraallijnen van 195
- energie
 behoud van 146, 200, 203
 dissipatie van 147, 152
 equivalentie met massa 174
 kwantisatie van 190, 194, 195, 197, 199, 205
- entropie 149, 153, 190
 equivalentieprincipe 178
- ether
 aard van 79, 132, 162-164, 167
 als element 33
 als geest 103
 als medium voor elektromagnetisch veld 122, 124, 127, 133
 als medium voor elektromagnetische golven 162, 164
 als medium voor licht 65, 69, 79
 beweging van aarde t.o.v. 162, 164, 167, 168
 in plaats van stoom in stoommachine 145
- Euclidische meetkunde 35, 85
 Euler 86, 95
- Faraday, Michael 95, 112-115, 117, 119, 120, 122, 124-126, 133, 163
 Faraday-effect 122

- Fitzgerald 167
 Fizeau, Armand 130
 foto-elektrisch effect 190-192
 Frederik, koning van Denemarken 64
 Fresnel, Augustin 79, 131, 132
 Fuller, John 113
- Galilei, Galileo 28, 30, 39, 40, 42-44, 46, 48, 50, 53, 60, 92, 169, 178
 Galilei, Vincenzo 40
 Galilei-invariantie 169-171
 Geiger, Hans 193, 203
 gelijktijdigheid 171, 172
 geluidsgolven 132
 geocentrisch wereldbeeld; *zie onder kosmologie*
 God 96, 100, 101, 103, 148, 208
 golf/deeltje 209; *zie ook onder licht golven; zie geluidsgolven, licht, trilling*
 's-Gravesande, Willem Jacob 105
 gravitatie 77, 84, 94, 98, 123, 125, 177
 equivalentie met versnelling 178
 gravitatiewet 77, 94, 95, 112, 119
 Grossmann, Marcel 162, 178
 grote overkoepelende theorie 23
 Guidobaldo 41, 43
- Habicht, Konrad 162
 Halley, Edmond 84
 Harriot, Thomas 66
 Hegel 11
 Heisenberg, onzekerheidsrelatie van 208
 Heisenberg, Werner 203, 204, 208, 209
 heliocentrisch wereldbeeld; *zie onder kosmologie*
 Henry, Joseph 120
 Herschel, William 100
 Hertz, Heinrich 132, 134, 164
 Hitler 177
- hoofdwetten van de thermodynamica; *zie onder thermodynamica*
 Hooft, Gerard 't 212
 Hooke, Robert 66
 Huygens, Christiaan 52, 55, 59, 61, 63, 65, 68, 72, 74, 77, 79, 131
 Huygens, Constantijn 59
- impetus 33, 49
 impuls 34, 86, 200
 behoud van 200, 203
 relativistische 202, 205
- inductie
 elektrodynamische 115
 elektromagnetische 116, 117, 119-121, 123
 elektrostatische 115
 zelf- 120
- inertiaalstelsel 171
 inquisitie 46
- Jordan, Pascual 204
 Joule 146
- kanonskogel; *zie kogelbaan*
 Kelvin, Lord (William Thomson) 124, 142, 146-148, 151, 160, 167
 Kepler 42, 48, 88, 89, 92
 kerk 30, 45, 102
 Kirchhoff, Gustav Robert 122
 Klein, Oskar 210
 kogelbaan 28, 31, 37-39, 43, 48, 50
 Kohlrausch, Friedrich 130
 kosmologie 92
 aarde als middelpunt 29, 42
 zon als middelpunt 30, 42, 87
 krachtlijnen 115, 120, 121, 122, 125, 127, 133
 Kramers, Henk 203
 kringloop, omkeerbare 144, 148
 Kuhn, Thomas 12, 95
- Lagrange 96

- Laplace 96
 Larmor 174
 Lavoisier 142
 Leibniz 96, 104
 Lenard, Philipp 193
 lengtebepaling 173
 licht
 afgebogen door zwaartekracht 179
 als deeltjes 66, 78
 als elektromagnetisch verschijnsel 131, 132, 164
 als geest 103
 als golfverschijnsel 59, 65, 66, 69, 78, 131, 132, 162
 als quanta 190, 192, 201, 202, 204
 gepolariseerd 78, 122, 131, 164
 lichtsnelheid 130, 165, 170
 als maximale snelheid 174, 177
 constante waarde 171, 172, 173
 lijnenspectrum; *zie spectraallijnen*
 Lodewijk XIV 61, 107
 longitudinale golf/trilling; *zie trilling, longitudinale*
 Lorentz 167, 174
 Lorentz-transformaties 171, 174
 Loschmidt 150, 153

 magnetisme 98, 111, 121, 122, 127
 Malus, Etienne 78
 Marsden, Ernest 194
 massa 52, 53, 85
 equivalentie met energie 174
 relativistische 174
 materie
 beweging t.o.v. ether 160, 165, 174
 eigenschappen van 93, 100
 golfkarakter van 205
 samenstelling van 27, 99, 103, 151

 Maxwell, James Clerk 95, 123-125, 127, 128, 130-134, 151, 164
 duiveltje van 152
 vergelijkingen van 133, 170, 174
 mechanisch model; *zie model, mechanisch*
 mechanistisch wereldbeeld 29, 30, 57, 65, 66, 98, 122
 Medici 40, 44
 Mendelejev 199
 Michelson, A.A. 159, 165
 Michelson-Morley-experiment 166-168, 175
 Millikan 192
 Minkowski, Hermann 175
 model
 hydrodynamisch 126, 127
 mechanisch 57, 124, 125, 127, 133
 Musschenbroek, Petrus van 105

 natuurlijke beweging; *zie beweging, natuurlijke*
 nazi's 176
 neutron 211
 Newton, Isaac 52, 76, 81, 84, 85, 88, 92, 95, 100, 104
 lichttheorie van 131
 mechanica van 95, 104, 161, 168, 169, 171
 Nobelprijs 192, 200, 201, 212

 Ockham, scheermes van 93
 Oersted, Hans Christian 95, 111, 114
 Oersted-effect 115
 omkeerbare kringloop; *zie kringloop, omkeerbare*
 ondermaanse/bovenmaanse 29, 32, 43, 92
 onzekerheidsrelatie 208
 Oresme 36

- Pais 198
 paraboolbaan 38, 48, 50
 paradigma 13, 95
 Pardies, Ignace-Gaston 65, 66
 Pascal 100
 Paulus v, Paus 45
 periodiek systeem 199
 perpetuum mobile 19, 144, 147
 Philoponus 33
 Pickering, Edward 198
 planeetbaan 84
 plaatsbepaling 172, 174
 Planck, Max 175, 189, 192
 planeetbaan 88, 96, 179
 Plato 29
 Poincaré 174
 polarisatie; *zie licht, gepolariseerd*
 Pope, Alexander 105
 Popper 13
 projectiel; *zie kogelbaan*
 proton 211
- kwantisatie 189, 190, 194, 197
 quantumelektrodynamica 212
 quantummechanica 154, 187, 188,
 200, 203
 interpretatie van 206
 nieuwe 204
 quark 212
- Rankine 145, 151
 relativiteit van beweging; *zie bewe-
 ging, relativiteit van*
 relativiteitsprincipe 172, 178
 relativiteitstheorie 113, 167, 168,
 174-176, 181
 algemene 177-179
 religie; *zie God*
 rendement 144
 Ricci, Ostilio 40
 richting van natuurprocessen 147,
 149, 150
- Römer, Ole 75
 Rutherford, Ernest 194, 211
- Scheiner 44
 Schooten, Frans van jr. 60
 Schrödinger, Erwin 206-208
 Schrödinger-vergelijking 206
 Simon, Alfred 203
 sinuswet; *zie breking, wet van*
 Slater, John 203
 slinger 43, 50, 60
 slingeruurwerk 60
 Snel, Willebrord 66
 Soldner 180
 Solovine, Maurice 162
 spectraallijnen 122, 195-197, 204
 Stark, Johannes 177
 stellaire aberratie 165, 167, 175
 sterke kracht 211, 212
 stoommachine 143, 145
 stralingsspectrum; *zie spectraallijnen*
 symmetrie
 in de tijd 153, 155
- taal, beperkingen van 209, 210
 Tartaglia 38, 39
 telescoop 44, 62, 63
 temperatuur
 bepaling 140, 141
 vs. warmte 141
 temperatuurschaal 146
 theologie 45, 101, 102, 104, 107, 122
 thermodynamica 142, 154
 eerste hoofdwet 146, 200, 201
 tweede hoofdwet 147-150, 152,
 153, 189, 201
 Thomson, J.J. 180, 193, 194
 Thomson, William; *zie Kelvin, Lord*
 tijd
 absolute 169, 171
 niet absoluut 171, 175
 tijdbepaling 172, 174
 Torricelli 52

- traagheid 30, 41, 47, 48, 86, 87
- transversale golf/trilling; *zie trilling, transversale*
- trilling
 longitudinale 131, 162
 transversale 131, 132, 134, 162, 163, 164
- unificatie
 van krachten 18, 23, 212
 van natuurwetten 21, 123, 132, 134, 182
 van vakgebieden 22, 187
- Urbain 199
- Urbanus VIII, Paus 46
- valbeweging 28, 30, 31, 34, 41, 43, 49, 61, 92
- veldtheorie, elektromagnetische 119, 123
- Veltman, Martinus 212
- Verlichting 105
- versnelling
 als gevolg van kracht 52
 equivalentie met gravitatie 178
- Volta, Alessandro 111
- Volta, kolom/zuil van 114
- Voltaire 106
- vortex; *zie wervels*
- vrije val; *zie valbeweging*
- waarschijnlijkheid 207, 208
- warmte 123, 139, 146
 als beweging van deeltjes 141, 151
 als substantie 141-143, 146
 vs. temperatuur 141
- warmtemachine 142
- warmtedood 148
- warmteleer 139
- warmtemachine 143
- Weber, Wilhelm Eduard 130
- wereldbeeld; *zie aristotelisch, cartesiaans, copernicaans, geocentrisch, heliocentrisch, mechanistisch*
- werking op afstand; *zie actio in distans*
- wervels 91, 100, 114, 127, 129, 133
- wetenschappelijke revolutie 12, 14, 28, 29, 30
- Wien, wet van 190
- Wien, Wilhelm 188
- worp 31, 34, 37, 39
- Young, Thomas 132
- Zeeman, Pieter 122
- zelfinductie 120
- Zermelo, Ernst 153
- zonnestelsel; *zie kosmologie*
- zwaarte 33, 34, 37, 41, 98, 103
- zwaartekracht; *zie gravitatie*
- zwakke kracht 211
- zwart lichaam 188, 195

Over de auteurs

FOKKO JAN DIJKSTERHUIS studeerde wiskunde en wetenschapsstudies aan de Universiteit Twente. Na enkele jaren in het voortgezet onderwijs keerde hij terug voor een promotieonderzoek naar Huygens' optica dat hij in 1999 afrondde met zijn proefschrift *Lenses and waves*. Hij doceert nu wetenschapsgeschiedenis aan de Universiteit Twente en onderzoekt het gebruik van wiskunde in wetenschap en techniek in de periode 1550-1850.

MACHIEL KEESTRA studeerde filosofie en psychologie aan de Universiteit van Amsterdam en de Universität Heidelberg. Hij is werkzaam als stafmedewerker bij het Studium Generale van de UvA en bereidt een dissertatie voor over filosofie en tragedie.

FRANS VAN LUNTEREN is docent wetenschapsgeschiedenis aan de Universiteit Utrecht. In 1991 promoveerde hij op het proefschrift *Framing hypotheses: Conceptions of gravity in the 18th and 19th centuries*. Hij bestudeert momenteel de Nederlandse fysica tussen 1800 en 1940 en de Nederlandse meteorologie in de negentiende eeuw.

KEES DE PATER is werkzaam als wetenschapshistoricus aan de Vrije Universiteit te Amsterdam en de Universiteit Utrecht. Hij houdt zich met name bezig met de ontvangst van de denkbeelden van Newton in Nederland. In 1979 promoveerde hij op het proefschrift *Petrus van Musschenbroek (1692-1761), een newtoniaans natuuronderzoeker*.

HARRY SNELDERS studeerde scheikunde en geschiedenis van de natuurwetenschappen aan de Vrije Universiteit in Amsterdam en promoveerde in Utrecht op het proefschrift *De invloed van Kant, de romantiek en de Naturphilosophie op de anorganische natuurwetenschappen in Duitsland* (1973). Hij was hoogleraar in de geschiedenis van de natuurwetenschappen aan de Universiteit Utrecht en de Vrije Universiteit te Amsterdam en is sinds 1995 met emeritaat. Van zijn hand verschenen onder meer *De geschiedenis van de scheikunde in Nederland* (twee delen, 1993, 1997) en *Wetenschap en intuïtie. Het Duitse romantisch-speculatief natuuronderzoek rond 1800* (1994).

JOS UFFINK is als universitair docent verbonden aan het Instituut voor Geschiedenis en Grondslagen van de Natuurwetenschappen van de Universiteit Utrecht. Zijn onderzoek richt zich op de grondslagen en interpretatieproblemen in de quantummechanica, waarschijnlijkheidsleer, statistische mechanica en klassieke thermodynamica.