

# Isaac Newton

C. de Pater

## Inleiding

We zijn er in onze eeuw aan gewend geraakt dat het terrein van ons kennen in talloze deelgebieden is opgesplitst, met als gevolg dat ook de beoefenaren van de diverse disciplines in allerlei 'hokjes' worden ingedeeld: iemand is fysicus, socioloog, bioloog, en wat dies meer zij. En voor zover we van de weeromstuit daarin enige eenheid tot stand proberen te brengen, blijven we toch min of meer steken in een tweedeling die wel als alfa- en betacultuur wordt aangeduid, eventueel een driedeling met de gammavakken als derde gebied. Deze 'boedelscheiding' is ongetwijfeld mede het gevolg van de sterke groei van de natuurwetenschappen in de laatste eeuwen; een groei die ondenkbaar is zonder de *Principia* (1687) en de *Opticks* (1704) van Isaac Newton (1642-1727) (figuur 1).

In Newtons tijd, waarin de eeuwwende 1700 valt, is er nog geen sprake van aparte hokjes voor alfa's en beta's (en gamma's), zodat we voorzichtig moeten zijn om personen uit die periode in een van deze culturen in te lijven. Dat geldt in het bijzonder ook de figuur van Newton, die bij velen uitsluitend bekend is als wiskundige en natuurwetenschapper, terwijl hij meer tijd, papier en inkt aan theologie, (kerk)geschiedenis en alchemie besteed heeft dan aan wat wij nu natuurwetenschap noemen. Onderzoek van zijn manuscripten in de twintigste eeuw heeft onomstotelijk aangetoond dat de Brit niet de koele, recht-toe-recht-aan-mathematicus en dito fysicus was die men in de achttiende en negentiende eeuw van hem gemaakt heeft, een 'positivist', "*die niets geloofde dan datgene wat even helder en duidelijk was als de drie zijden van een driehoek*", zoals de vroegnegentiende-eeuwse essayist Charles Lamb het uitdrukte. Het is de laatste decennia steeds duidelijker geworden dat Newtons alchemie, theologie en natuurwetenschap met elkaar samenhangen. Zonder alchemie en theologie zou hij wellicht nooit op het zo vruchtbaar gebleken idee geko-



**Figuur 1.**

Isaac Newton (1642-1727)

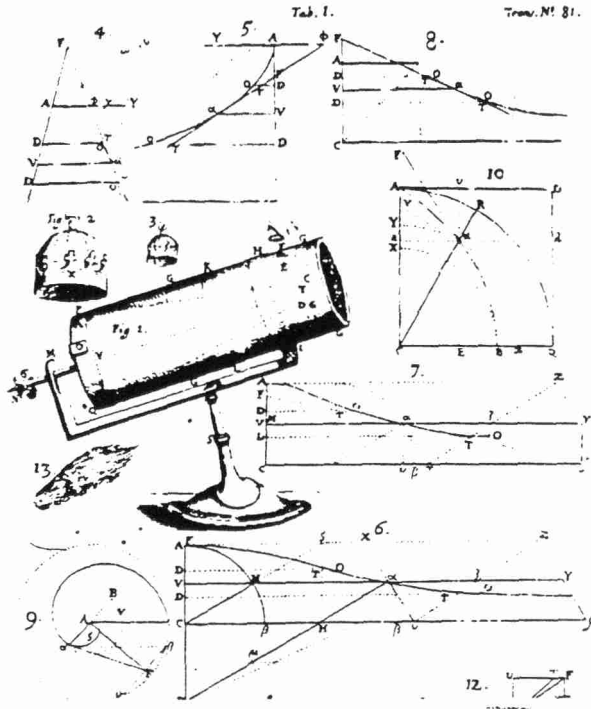
men zijn dat natuurprocessen veroorzaakt worden door aantrekkende of afstotende krachten en andere actieve beginselen.

## Leven en werk

Newton werd geboren als postume zoon van een boer in Lincolnshire. Toen hij drie jaar was, hertrouwde zijn moeder en werd hij verder door zijn grootmoeder opgevoed. Zeven jaar later kwam zijn moeder weer als weduwe naar de boerderij terug. Op zijn twaalfde jaar bezocht Isaac de *Free Grammar School* in Grantham, waar hij naar het schijnt zijn eigen weg ging, min of meer geïsoleerd van zijn medeleerlingen. Op zeventienjarige leeftijd moest Newton naar huis terugkeren om het boerenvak te leren. Dat werd echter een volslagen mislukking en gelukkig wisten anderen zijn moeder ervan te overtuigen dat ze haar Isaac beter kon laten studeren. In 1661 vertrok hij daarom naar *Trinity College* in Cambridge waar hij, behoudens een korte onderbreking, vijfendertig jaar zou blijven. Het officiële curriculum behelsde voornamelijk de aristotelische filosofie, inclusief de retorica en de logica van de oude Griekse denkers. De sporen van de daar ontvangen training in logisch denken en redeneren zijn duidelijk in zijn werken terug te vinden, tot in zijn alchemistische geschriften toe. Vooral uit de vele polemieken die hij voerde blijkt dat hij een meester was in het 'mobiliseren' van argumenten om zijn tegenstanders te verslaan.

In 1665 werd de universiteit in Cambridge gesloten vanwege een pest-epidemie, zodat Newton als kersverse *bachelor of arts* de stad verliet en van 1665-'67 in zijn geboorteplaats woonde. In deze periode legde hij op dezelfde boerderij waar zijn scholing tot boer op een mislukking was uitgelopen, de grondslagen voor zijn baanbrekende werk op het gebied van de wiskunde, de optica en de (hemel)mechanica. De denkbeelden die hij twintig jaar later zou verwoorden in zijn *Principia*, vonden hun oorsprong in de winter van 1664-'65 met het lezen van de (natuur)filosofische werken van Descartes. Verder bestudeerde hij Kepler, Galilei, Gassendi en vele andere auteurs uit zijn tijd. Lezen, nadenken en schrijven brachten hem in een paar jaar in de voorste gelederen van de Europese wis- en natuurkundigen.

In 1667 keerde Newton naar Cambridge terug, waar hij twee jaar later, 26 jaar oud, benoemd werd tot lucasiaans professor, een post die thans door de bekende fysicus Stephen Hawking wordt bekleed. Naast meetkunde, statica e.d. doceerde Newton ook geometrische optica,



**Figuur 2.**

Newton's spiegeltelescoop

waardoor hij belangstelling kreeg voor andere gebieden van de optica. Problemen met kleurverschijnselen bij lenzen, waarmee in die tijd alle verrekijkers waren uitgerust, brachten Newton ertoe een spiegeltelescoop (*figuur 2*) te construeren; een prestatie waarvoor hij in 1672 tot fellow van de Royal Society werd gekozen. Dat hijzelf de buis en de spiegels voor zijn telescoop vervaardigde, bewijst wel dat hij niet alleen buitengewone intellectuele, maar ook grote manuele vaardigheden bezat.

Rond 1670 kreeg Newton in toenemende mate belangstelling voor theologische en kerkhistorische kwesties. Meer en meer vatte bij hem de overtuiging post dat het christendom in de vierde en vijfde eeuw verbasterd was en dat bijbelteksten waarin de drieëenheid werd beleden, niet authentiek waren. Dat hij hierdoor niet in de problemen kwam, was in belangrijke mate te danken aan het feit dat hij zijn antitrinitarische opvattingen zorgvuldig voor zich hield.

In diezelfde tijd raakte hij sterk geïnteresseerd in de alchemie, waarvan diverse manuscripten getuigenis afleggen, o.a. een *Notebook* dat een verslag bevat van chemische en alchemistische experimenten uit de periode van ca. 1670 tot 1695. In de jaren 1679-'80 hield hij zich intensief met alchemie bezig om meer inzicht te krijgen in de aard van aantrekkende en afstotende krachten, die daarin een belangrijke rol speelden. Hij raakte er namelijk steeds meer van overtuigd dat alle in de natuur optredende processen door krachten werden veroorzaakt en wilde deze gedachte allereerst op de hemelverschijnselen toepassen. Vandaar dat hij zich grondig verdiepte in de problemen van de hemelmechanica. Toen dan ook de astronoom Edmond Halley in 1684 aan Newton de vraag voorlegde wat de baan zou zijn van een planeet, als men uitging van de veronderstelling dat de zon een aantrekkende kracht uitoefende die omgekeerd evenredig was met de afstand tussen zon en planeet, kon hij zonder aarzelen het antwoord geven: een ellips. De gedachten van Halley, Robert Hooke en Christopher Wren gingen eveneens in die richting, maar ze hadden hun vermoeden niet kunnen bewijzen. Toen Halley, die uiteraard zeer verrast was met dit antwoord, naar het bewijs vroeg, kon Newton de betreffende notities niet vinden, maar hij beloofde zich opnieuw in de materie te verdiepen.

Newton wist het vermoeden van Halley c.s. opnieuw te bewijzen en raakte daardoor volledig in de ban van zijn onderwerp. Het korte artikel van negen pagina's dat hij Halley toestuurde, veranderde in acht-

tien maanden in het misschien wel belangrijkste boek dat ooit op natuurkundig gebied is geschreven: de *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687). Dat de *Principia*, zoals het werk gewoonlijk wordt aangeduid, ooit verschenen is, danken we aan de actieve bemoeienis van Halley. Niet alleen stimuleerde hij Newton het werk te schrijven, maar bovendien betaalde hij de drukkosten, daar noch Newton zelf, noch de Royal Society deze konden betalen.

In 1693 kreeg Newton een diepgaande mentale inzinking, waarvan nog veel onopgehelderd is, maar die mogelijk voor een deel te maken had met de geweldige inspanning die het schrijven van de *Principia* hem had gekost. In elk geval markeerde deze crisis zijn wetenschappelijke creativiteit. De rest van zijn leven besteedde hij hoofdzakelijk aan het verbeteren en bewerken van eerder door hem behaalde resultaten, zowel op het terrein van de natuurwetenschappen, als op wiskundig en theologisch gebied. Dat gebeurde overigens niet meer in Cambridge, want in 1696 was Newton naar de Munt in Londen vertrokken, omdat hij daar een aanstelling als bedrijfsleider had gekregen (*warden of the Mint*). Vier jaar later volgde zijn benoeming tot directeur (*master of the Mint*).

In 1703 volgde Newton de overleden Hooke op als president van de Royal Society, waarvan hij tot aan zijn dood de ongekroonde koning was. Het jaar daarop verscheen eindelijk zijn reeds eerder geschreven *Opticks*. Newton gaf dit werk nu pas uit, na de dood van Hooke, omdat deze in 1672 een scherpe aanval had gedaan op zijn *New theory about light and colours*, waarin hij een geheel nieuwe visie op het ontstaan van kleuren en de aard van het licht had gegeven. In de periode van het presidentschap van de Royal Society verzamelde Newton een kring van jonge wetenschappers om zich heen, zoals William Whiston, John Keill, Jean Théophile Desaguliers, e.a., die hij benoemd wist te krijgen aan diverse instellingen van hoger onderwijs en die daar zijn opvattingen uitdroegen, niet in de laatste plaats door het schrijven van leerboeken. Bovendien verdedigden ze hem in talloze debatten. Newton was namelijk voortdurend in prioriteitskwesities gewikkeld of in discussies over de gravitatie en andere 'newtoniana'. Het bekendste dispuut is dat met Leibniz over de ontdekking van de differentiaal- en integraalrekening (*calculus*), een debat waarbij overigens ook alle mogelijke andere kwesities ter sprake kwamen, zoals de relatie tussen God en zijn schepping, het probleem van (absolute) ruimte en tijd en de oorzaak van de gravitatie. De neerslag van deze discussie is te vin-

den in de beroemde correspondentie tussen Leibniz en de theoloog Samuel Clarke, die optrad als woordvoerder van Newton. Deze briefwisseling vond plaats in 1715-1716 en brak af bij de dood van Leibniz.

Zoals ik reeds opmerkte, heeft Newton, toen hij eenmaal werkzaam was bij de munt, geen nieuwe opzienbarende ontdekkingen meer gedaan, maar wel heeft hij zich tot aan het eind van zijn leven bezig gehouden met diverse nog onopgeloste problemen, met name over de aard van de gravitatie. Veel zorg besteedde hij ook aan herdrukken van de *Principia* en de *Opticks*. Het waren, naast zijn verdiensten op het terrein van de wiskunde, deze werken waardoor Newton, anders dan vele bekende zeventiende-eeuwse onderzoekers, reeds tijdens zijn leven als autoriteit werd erkend, een erkenning die in de achttiende eeuw uitmondde in een ware Newton-cultus: in de ogen van zijn tijdgenoten en de daarop volgende generaties was hij de man "*die alle mensen in genie te boven ging*", zoals te lezen staat op zijn standbeeld dat in 1755 in *Trinity College* werd onthuld.

### **Newtons verdiensten**

Toen Newton in 1727 overleed was de natuurwetenschap grondig van karakter veranderd. In hem voltrok zich definitief de overgang van de antiek-middeleeuwse naar de moderne natuurwetenschap. In zijn werk zien we een aantal lijnen samenkomen waarlangs zij zich sinds het midden van de zestiende eeuw had ontwikkeld. Dat geldt vooral de astronomie, de mechanica en de optica.

Newton zelf schreef over zijn eigen bijdrage aan de uitbouw van de natuurwetenschap eens aan Hooke dat hij op de schouders van reuzen had gestaan en daardoor verder had kunnen zien dan zij allen; een uitspraak die overigens zeker niet moet worden uitgelegd als een bagatellisering van eigen verdiensten. De voornaamste 'reuzen' waren: Copernicus, Tycho Brahe, Kepler, Descartes, Stevin, Galilei en Christiaan Huygens. Het is inderdaad waar dat Newton op het werk van al deze onderzoekers kon voortbouwen, maar wat hijzelf tot stand gebracht heeft, was dermate uniek dat hij ze daarmee allen in de schaduw stelde. Daarbij gaat het om de volgende bijdragen:

1. Newton gaf de mechanica haar fundament als zelfstandige wetenschap door middel van een axiomatische opbouw.

PHILOSOPHIÆ  
NATURALIS  
PRINCIPIA  
MATHEMATICA.

Autore JS. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos  
Professore Lucafiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.  
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.  
Julii 5. 1686.

LONDINI,  
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostant Vena-  
les apud Sam. Smith ad insignia Principis Walliæ in Cœmiterio  
D. Pauli, alioq; nonnullos Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Figuur 3.

Titelblad van Newton's '*Principia*'

2. Hij bracht de definitieve synthese tot stand tussen aardse en hemelse mechanica, die bij Aristoteles en de middeleeuwse wetenschap twee scherp gescheiden gebieden vormden. De eenheid in de natuur werd in Newtons mechanica zichtbaar gemaakt door op aardse en hemelse verschijnselen dezelfde wetten en dezelfde verklaringsprincipes toe te passen, met vooral de gravitatie als unificerend beginsel.
3. Doordat Newton ter verklaring van de verschijnselen niet alleen gebruik maakte van de contactwerking van materiedeeltjes, zoals Descartes had geëist, maar ook krachten tussen deeltjes invoerde, kreeg het begrip 'mechanistische natuurverklaring' bij hem een nieuwe, ruimere betekenis.
4. Newton droeg zowel in praktisch als in theoretisch opzicht bij aan de ontwikkeling van de optica.
5. Newtons werk verschafte het denkkader waarbinnen de natuuronderzoekers twee eeuwen lang gewerkt hebben om nieuwe onderzoeksgebieden te exploreren.

### De *Principia*

Newtons bijdragen aan de mechanica en de optica zijn in hun definitieve vorm te vinden in zijn twee reeds genoemde hoofdwerken:

1. *Philosophiae naturalis principia mathematica*, (1787<sup>1</sup> (figuur 3), 1713<sup>2</sup>, 1726<sup>3</sup>).
2. *Opticks: or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light. (...)*, (1704<sup>1</sup>, 1717<sup>2</sup>; Lat. ed. 1706).

De vertaling van de volledige titel van de *Principia* luidt *Wiskundige beginselen van de natuurfilosofie*. Het woord 'filosofie' zal bij de moderne lezer wat vreemd overkomen. Vanouds was echter de natuurkunde een onderdeel van de filosofie. De fysica van Oudheid en Middeleeuwen hield zich immers bezig met de vraag naar het wezen van de dingen en het 'waarom' van de verschijnselen. Ook na de zeventiende-eeuwse wetenschapsrevolutie duurde het nog geruime tijd voordat de natuurwetenschap en de filosofie, in de betekenis die wij er nu aan geven, min of meer gescheiden wegen gingen. Nog in de achttiende eeuw behelsde de filosofische faculteit alle natuurwetenschappelijke, literaire en wijsgerige vakken en kon een hoogleraar in de filosofie zowel fysica als metafysica doceren. Ook nadat de natuurkunde een experimentele wetenschap geworden was, bleef de oude terminologie nog lange tijd gehandhaafd. Zo sprak men in de achttiende, en

zelfs in de negentiende eeuw nog van *philosophia experimentalis*, (*experimental philosophy*, *proefondervindelyke wys(be)geerte*). De vertaling *Wiskundige beginselen van de natuurwetenschap* geeft de inhoud van de *Principia* daarom beter weer dan de eerder genoemde, al is het wel zo dat we in Newtons boek toch wat meer (natuur)filosofische beschouwingen tegenkomen, dan wij nu gewend zijn.

Naar het voorbeeld van de *Elementen* van Euclides -het leerboek dat vanaf de vierde eeuw tot in de zestiger jaren van onze eeuw het meetkunde-onderwijs bepaald heeft- is de *Principia* opgebouwd volgens het patroon: definities, axioma's en proposities (stellingen). Na een achttal definities, geeft Newton drie 'axioma's of bewegingswetten' en vervolgens worden daaruit in de eerste twee 'boeken' van de drie waaruit het werk bestaat allerlei stellingen afgeleid voor de beweging van mathematische entiteiten ten gevolge van mathematische krachten. Een aantal van deze proposities wordt in het derde boek toegepast op het wereldsysteem, dat wil zeggen op het zonnestelsel. Pas dan wordt dus (hemel)fysica bedreven.

Wat de definities betreft, Newton was de eerste die het begrip 'massa' invoerde als maat voor de hoeveelheid materie van een lichaam. Bij hem treedt ook voor het eerst het onderscheid tussen massa en gewicht duidelijk naar voren. Op grond van slingerexperimenten concludeerde hij dat beide evenredig zijn, zodat het gewicht een maat is voor de massa. Nieuw is ook de invoering van het begrip 'kracht'. Het woord stamt uit de omgangstaal en is als zodanig verre van eenduidig. Het houdt immers in de dagelijkse praktijk allerlei vormen van inspanning, activiteit en arbeid in, die in de fysica op den duur geleid hebben tot een scherp onderscheid tussen kracht, impuls en energie. De alledaagse ervaring lijkt ons te leren dat voor elke beweging een krachtsinspanning nodig is en dat deze bovendien nog groot genoeg moet zijn om een beweging te realiseren. Deze ervaring vormt de grondslag van de mechanica in Oudheid en Middeleeuwen. Maar ook toen men deze op de dagelijkse praktijk geënte 'traagheidswet' als onjuist had verworpen, bleven oude opvattingen over het verband tussen kracht en snelheid nog geruime tijd voortbestaan, zonder dat het tot een nauwkeurige definitie van het begrip 'kracht' kwam. Terwijl dus in de oude, aristotelische fysica een uitwendige kracht als óorzaak van beweging fungeerde, werd 'kracht' in de mechanistische natuurverklaring van Descartes juist een gevolg van beweging: het is voor hem het vermogen van een bewegend lichaam een bepaalde werking uit te

oefenen op een ander lichaam waarmee het in contact (botsing, druk) komt.

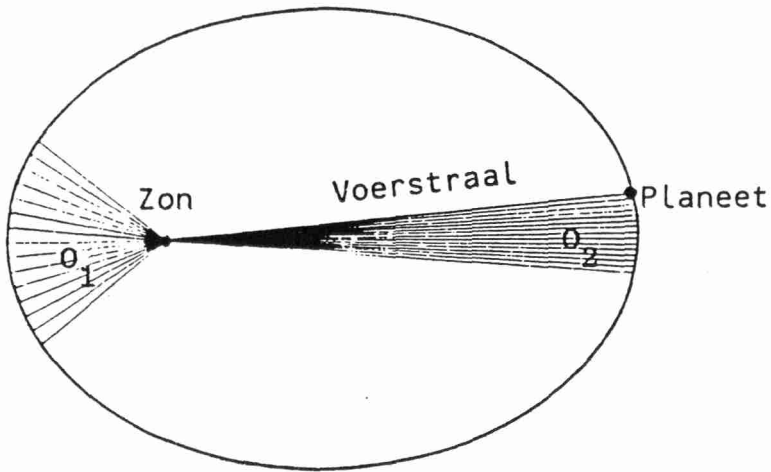
Dat het begrip 'kracht' tenslotte in de mechanica gereserveerd is voor een werking op een lichaam die van buitenaf komt en daarbij een bewegingsverandering teweegbrengt, is uiteindelijk te danken aan Newton. Toch is ook bij hem het krachtbegrip nog allerminst helder gedefinieerd. Wie de wetenschap vernieuwt, denkt voortdurend nog in termen en begrippen van de gedachtenwereld waaraan hij zich juist tracht te ontworstelen. Pas de volgende generaties zien door ervaring met de nieuwe denkbeelden scherper waarop het aankomt.

Na de definities volgen een drietal axioma's of bewegingswetten (*leges motus*). Allereerst de zogenaamde traagheidswet:

Ieder lichaam volhardt in de toestand van rust of eenparige beweging, behalve voor zover het door inwerking van krachten gedwongen wordt die toestand te wijzigen.

Eeuwenlang had men geworsteld met het traagheidsprobleem. Ik wees al op de opvatting hierover in Oudheid en Middeleeuwen. Galilei zette een belangrijke stap in de goede richting door aan te nemen een beweging langs een cirkel rond de aarde ongestoord door zou gaan, wanneer er geen invloeden van buitenaf werkzaam waren. Over een niet te grote afstand langs zo'n cirkel kan men bij benadering van een rechtlijnige beweging spreken, of, zoals hij zelf wel deed, van een beweging in een horizontaal vlak. Vandaar dat in de schoolboeken de (goede) traagheidswet nogal eens aan Galilei wordt toegeschreven. De eerste die ondubbelzinnig rechtlijnige traagheid aannam, was Descartes, wiens formulering van de traagheidswet duidelijk model gestaan heeft voor die van Newton. Ze is bij de Brit echter ingebed in een geheel andere fysica en heeft pas daarin haar betekenis gekregen.

Newton was ervan overtuigd dat er, los van een relatieve beweging ten opzichte van aarde of zon, een absolute beweging bestond in een absolute ruimte. De traagheidswet heeft bij hem betrekking op deze laatste, 'ware' beweging. Elk materiedeeltje in de absolute ruimte, hoe klein of groot ook, bezit een traagheidskracht, die een even essentiële eigenschap van materie is als uitgebreidheid, ondoordringbaarheid, hardheid en beweegbaarheid. Deze traagheidskracht wordt enkel en alleen manifest wanneer een uitwendige kracht de beweging van een lichaam wil



**Figuur 4.**

De drie wetten van Kepler voor de planetenbeweging.

1. De baan van een planeet is een ellips. In een van de brandpunten daarvan staat de zon.
2. In gelijke tijden  $T_1$  en  $T_2$  doorloopt de voerstraal zon-planeet gelijke oppervlakten  $O_1$  en  $O_2$ . In formule  $T_1 = T_2 \rightarrow O_1 = O_2$  (zie figuur).
3. De derde macht van de halve lange as  $a$  van de door een planeet doorlopen ellips is evenredig met het kwadraat van de omlooptijd  $T$ . In formule  $a^3 : T^2 = \text{constant}$ .

vertragen of versnellen, omdat het lichaam zich blijkbaar tegen een dergelijke verandering verzet. Anders dan in de aristotelische fysica is er bij Newton geen ontologisch verschil tussen rust en eenparige beweging. Voor de oude natuurkunde vereist immers 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. En daarmee is de breuk met het verleden definitief.

## Wiskundige constructies

Ik wees er al op dat de definities en de axioma's, en de daaruit in boek I en II afgeleide stellingen strikt genomen geen (hemel)fysica willen bieden, terwijl boek III dat wel pretendeert te doen. De vraag rijst dus wat het verband is tussen beide delen van de *Principia*. Met name de Amerikaanse wetenschapshistoricus I.B. Cohen heeft dit probleem diepgaand geanalyseerd. Newton scheidt zich volgens hem in boek I een *mathematical construct*, een mathematisch (wereld)systeem, met een algemene dynamica, waarin stellingen worden afgeleid over mathematische punten die 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.

Zo stelde Newton zich de vraag hoe in zijn mathematische constructie een punt beweegt onder invloed van een centrale kracht. Dat blijkt een beweging te zijn die gehoorzaamt aan de wet dat de voerstraal die het krachtcentrum verbindt met het bewegend punt, in gelijke tijden gelijke oppervlakken doorloopt, en dat is precies de empirisch gevonden tweede wet van Kepler (de zogenaamde perkenwet) voor de beweging van de planeten om de zon (*figuur 4*). Voor het speciale geval dat het bewegend punt een ellipsbaan beschrijft, kon Newton bovendien nog bewijzen dat de centrale kracht omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand tussen punt en centrum ( $F(\cdot) \propto 1/r^2$ ). Dit wiskundig resultaat zou hij later toepassen op de hemelbewegingen, omdat immers de planeten ellipsbanen beschrijven met de zon in een van de brandpunten.

In een volgende fase wordt deze geconstrueerde wereld vergeleken met de wereld der verschijnselen en op grond daarvan vindt bijstelling van de mathematische constructie plaats. 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 leidt tot een verfijnd mathematisch systeem, 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 systeemverfijning door confrontatie met de reële wereld leidt tenslotte tot een wiskundig bouwsel dat ten opzichte van de waargenomen verschijnselen vergaand is bijgesteld, maar dat nog altijd wezenlijk mathematisch van aard is. Bovendien gaat het in boek I steeds om beweging in een weerstandsloze ruimte, hoever het systeem ook verfijnd is. In verband met de natuurkundige horizon besteedt Newton ook aandacht aan de beweging in een weerstandbiedend medium. Dat gebeurt in boek II, waarin o.a. 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 fysica willen geven, enkele uitzonderingen daargelaten, zoals de behandeling van de maanbeweging in boek I en de snelheid van het geluid in boek II. Newton geeft een arsenaal van (wiskundige) stellingen waarin tussen baanvorm, plaats, snelheid, omlooptijd en kracht verbanden worden gelegd die van toepassing zijn op de beweging van punten en lichamen in zijn *mathematical construct*. Het zijn deze stellingen die samen de *Wiskundige grondbeginselen van de natuurfilosofie* (natuurwetenschap) 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 op de bewegingsverschijnselen toe en daarmee leidde hij in boek III zijn algemene gravitatiewet af, waarmee hij de beweging van de hemellichamen, de valbeweging, de getijden en dergelijke kon beschrijven.

### ***De regulae philosophandi* en de algemene gravitatie**

Maar dan rijst natuurlijk de vraag waarom deze toepassing geoorloofd is. Het feit dat in een euclidisch 'heelal' alle bewegingen met dezelfde beginselen beschreven kunnen worden, betekent niet automatisch dat dit voor de bewegingsverschijnselen in 'onze' wereld ook het geval is:

was de bewegingsleer niet eeuwenlang opgesplitst in een streng van elkaar gescheiden hemelmechanica en een mechanica voor de ondermaanse verschijnselen en werd bovendien in het laatste geval geen onderscheid gemaakt tussen zogenaamde natuurlijke en gedwongen bewegingen? Met het oog op dit soort vragen liet Newton aan de behandeling van het wereldsysteem (zonnestelsel) een aantal *hypotheses* voorafgaan, waarvan er twee, samen met een nieuwe derde, in de tweede editie (1713) de beroemde *Regulae philosophandi* (regels van wijsgerig redeneren) vormen, waaraan in de derde editie (1726) nog een vierde regel is toegevoegd. De vier *Regulae* luiden in deze derde editie 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, ondanks dat een daarmee strijdige hypothese kan worden verzonnen, totdat zich andere verschijnselen hebben voorgedaan, waardoor ze meer vast komen te staan of onderhevig blijken te zijn aan uitzonderingen.

Het zal duidelijk zijn dat deze regels niet door experimenten of berekeningen bewezen kunnen worden. De beslissing over de manier waarop we in de natuurwetenschap te werk willen gaan, valt buiten haar eigen terrein. Zo poneert de eerste regel een eenvoudigheidsbeginsel dat in de geschiedenis in verschillende vormen meermalen is uitgesproken. In zijn toelichting beroept Newton zich op 'de filosofen', volgens wie de natuur niets tevergeefs doet: ze is op eenvoud gesteld en siert zich niet met overtollige oorzaken. De tweede regel behelst het principe van de analogie en de uniformiteit van het natuurgebeuren.

Als voorbeelden noemt Newton o.a. de ademhaling van de mens in vergelijking met die van het dier en de val van lichamen in Europa en die in Amerika. Deze beide regels zijn metafysisch van aard. Ze behelzen de grondartikelen van een fysische 'geloofsbelijdenis'. Ook de derde regel is in zekere zin een analogiebeginsel, dat de mogelijkheid biedt kenmerken die aan lichamen zijn waargenomen, te generaliseren tot universele eigenschappen van de materie, zoals uitgebreidheid, ondoordringbaarheid, beweegbaarheid, traagheid en zwaarte.

Deze derde regel lijkt tamelijk gewaagd, immers met een beroep op een wellicht veel te beperkte ervaring zou men vergaande conclusies kunnen trekken, die puur speculatief zijn. Sommige historici zijn daarom van mening dat de vierde regel vooral is toegevoegd om de grenzen voor de andere regels aan te geven, en wel naar twee kanten: enerzijds waarschuwt Newton ervoor dat men conclusies die door inductie getrokken zijn, niet in twijfel mag trekken, wanneer men oncontroleerbare hypothesen kan bedenken die deze conclusies aanvechten; anderzijds moeten we ons te allen tijde laten corrigeren door waarnemingen en experimenten, als daaruit mocht blijken dat onze eerdere conclusies onjuist waren. De combinatie empirie en inductie verdient dus verre de voorkeur boven welke gefantaseerde hypothese dan ook. Alleen nieuwe waarnemingsfeiten kunnen en mogen corrigerend werken. De ervaring behoort het eind van alle tegenspraak te zijn.

Hoewel de *Regulae* in algemene bewoordingen zijn gesteld, lijkt het evident dat Newton ze met een heel speciaal doel had opgesteld, namelijk om hem in staat te stellen de beginselen van zijn mathematische constructies toe te passen op de planetenbeweging. Met name gebruikte hij ze om vanuit de beschikbare gegevens de stap te maken naar het principe van de algemene gravitatie, waardoor hij in staat was de eeuwenlange scherpe scheiding tussen hemelse en aardse fysica op te heffen. Eerst toonde Newton, mede op grond van de wetten van Kepler aan dat in vier systemen (nl. a. Jupiter en zijn manen; b. Saturnus en zijn manen; c. de zon en de (primaire) planeten en d. de aarde en haar maan) twee lichamen elkaar aantrekken (precieser: zwaar zijn of graviteren ten opzichte van elkaar) met een kracht die evenredig is met hun massa's en omgekeerd evenredig met het kwadraat van hun afstand. Vervolgens verklaarde hij op grond van regel 3 deze wet geldig voor alle lichamen in het heelal, hoe klein of groot ze ook zijn. Wie vraagt naar een empirisch bewijs, omdat de stap van hemel-

lichamen naar kleine lichamen, en zeker die naar atomen, toch niet vanzelfsprekend is, krijgt als antwoord dat de kracht tussen lichamen, waarmee wij proeven kunnen doen, onwaarneembaar klein is. Met zijn gravitatiewet kon Newton een groot aantal uiteenlopende verschijnselen verklaren: de beweging van planeten, manen en kometen, de afplatting van de aarde bij de polen, eb en vloed, een aantal eigenschappen van de maanbeweging, de valbeweging e.d. Met zijn algemene gravitatie had Newton de definitieve synthese tussen hemel en aarde tot stand gebracht: één wet beheerst alle bewegingen in het universum.

### **Newtons methode**

Van de bovengenoemde regels van redeneren vertelt alleen de vierde ons iets over Newtons methode, waarin, zoals we zagen, experiment en inductie een belangrijke rol spelen, terwijl het fantaseren van hypothesen als ondeugdelijk wordt afgewezen. De gegeven informatie is echter uiterst summier, zodat de vraag voor de hand ligt of hij elders wellicht meer over zijn methode van onderzoek heeft gezegd dan dit weinige van regel 4. Dat is inderdaad het geval, al betreft het steeds min of meer losse opmerkingen. Een aparte, samenhangende verhandeling over zijn methode heeft Newton nooit geschreven.

In de natuurwetenschap van Oudheid en Middeleeuwen nam men, in het algemeen gesproken, in het voetspoor van Aristoteles genoeg met de alledaagse ervaring, waaruit men langs deductieve weg dikwijls vergaande conclusies trok. De op deze wijze ontwikkelde fysica was een kwaliteitenfysica: men trachtte alle verschijnselen te verklaren in termen van 'kwaliteiten' (specifieke eigenschappen of hoedanigheden) en 'naturen' van lichamen. In de zestiende en vooral in de zeventiende eeuw vinden echter drie wezenlijke veranderingen plaats:

#### **1. De mechanisering van het wereldbeeld.**

Het oude organistische wereldbeeld, waarin de analogie met processen in de levende natuur een fundamentele rol speelt, maakt plaats voor een mechanistisch wereldbeeld, waarin de analogie met de machine essentieel is en waarin de verschijnselen worden verklaard door contactwerking (druk, stoot) van bewegende materiedeeltjes. Vooral de Franse filosoof Descartes had deze aanpak bepleit en tegelijkertijd de oude aristotelische kwaliteitenfysica als ondeugdelijk afgewezen. Ook zijn landgenoot Pierre Gassendi, die het antieke atomisme in geker-

stende vorm liet herleven, was voorstander van een mechanistische natuurbeschouwing.

## **2. De mathematisering van de natuurwetenschap.**

Met name Kepler en Galilei waren de pleitbezorgers van een natuurwetenschap waarin de verschijnselen met behulp van de wiskunde beschreven werden. Volgens Galilei is het boek der natuur in wiskundige (dat wil zeggen, meetkundige) taal geschreven. Wie de letters daarvan -driehoeken, cirkels en andere meetkundige figuren- niet kende, zou geen woord van dit boek kunnen lezen. Kepler meende zelfs dat de schepper de kosmos volgens een meetkundig 'bestek' had geschapen. Het ideaal van de natuurkunde wordt dan ook steeds meer het zoeken naar wiskundig geformuleerde natuurwetten. Descartes ging in die zin het verst dat hij de menselijke geest in staat achtte de natuurwetenschap op dezelfde manier als de meetkunde uit evidente beginselen te deduceren, zodat zij bij hem een soort wiskunde is geworden. Het gebruik van de deductieve methode op basis van een meetkundige ontologie, waarin de primaire eigenschappen van de materie meetkundig van aard zijn, leidde echter bij de Franse filosoof niet tot werkelijke mathematisering van de natuurwetenschap. Wiskundig geformuleerde natuurwetten komen in zijn werk nauwelijks voor.

## **3. Het systematisch en doelgericht experimenteren.**

De nieuwe natuurwetenschap van de zeventiende eeuw is voor alles ook een experimentele wetenschap. Met name Bacon voerde in het begin van deze eeuw een krachtig pleidooi voor het doen van waarnemingen en experimenten, terwijl hij bovendien pleitte voor internationale samenwerking tussen natuuronderzoekers. Waarnemingen alleen waren niet voldoende; men diende door middel van experimenten de natuur op de pijnbank te leggen en haar zo te ontfoetselen wat zij niet spontaan prijs wilde geven. Zonder een betrouwbare *historia naturalis* (verzameling empirisch feitenmateriaal) achtte Bacon een goede natuurwetenschap onmogelijk. Ook bij Galilei en Kepler speelde de empirie een belangrijke rol, maar in de natuurbeschouwing van Descartes was zij duidelijk ondergeschikt aan de deductieve vermogens van de menselijke rede. De Franse filosoof heeft niet voldoende ingezien dat de natuur een contingent karakter heeft.

Ook Newton was in die zin voorstander van een mechanistische natuurbeschouwing dat hij de verschijnselen alleen wilde verklaren met behulp van bewegende deeltjes. Hij ging echter minder ver dan Descartes: terwijl voor de Franse filosoof een beweging enkel en alleen

**OPTICKS:**  
OR, A  
**TREATISE**  
OF THE  
REFLEXIONS, REFRACTIONS,  
INFLEXIONS and COLOURS  
OF  
**L I G H T.**  
ALSO  
**TWO TREATISES**  
OF THE  
SPECIES and MAGNITUDE  
OF  
**Curvilinear Figures.**

LONDON,  
Printed for SAM SMITH, and BENJ. WALFORD,  
Printers to the Royal Society, at the *Prince's Arms* in  
St. Paul's Church-yard. MDCCIV.

Figuur 5.

het gevolg kon zijn van contact tussen deeltjes, nam de Brit het bestaan van actieve beginselen aan, zoals aantrekkende en afstotende krachten, die de van zichzelf passieve materiedeeltjes in beweging konden zetten; een belangrijk probleem waarop ik nog terugkom. Wat de wiskunde betreft, ook voor Newton verschaft deze wetenschap ons de taal waarmee we de verschijnselen dienen te beschrijven. Het doel van de natuurkunde is het vinden en formuleren van grondbeginselen met behulp van de wiskunde, wat o.a. naar voren komt in de volledige titel van de *Principia*. Newtons eigen inbreng daarin was, zoals we gezien hebben, dat hij een mathematische fysica ontwikkelde van steeds verder verfijnde wiskundige systemen, waarvoor wetten werden afgeleid, waarvan sommige op de verschijnselen werden toegepast.

Tenslotte kan men Newton tot op zekere hoogte ook een volgeling van Bacon noemen. Het belang dat hij hechtte aan experimenten blijkt immers overduidelijk uit de vierde regel van redeneren. Toch gaat hij ook hier een eigen weg. Het was hem niet zo zeer te doen om een 'voorraad' proeven aan te leggen als wel om, na een eerste analyse van een verschijnsel, een zo doeltreffend mogelijke reeks experimenten of waarnemingen op te zetten waarmee de vermoedens die in de explorerende fase over dit verschijnsel waren ontstaan, hopelijk ondubbelzinnig konden worden gestaafd of weerlegd. Essentieel is ook dat Newtons experimenten overwegend kwantitatief van aard zijn, in tegenstelling tot die van 'verzamelende' baconianen als Robert Boyle of sommige cartesiaanse onderzoekers die bij kwalitatieve experimenten steun hoopten te vinden voor een of andere hypothese waarvan de juistheid voor hen al bij voorbaat vaststond.

Een klassiek geworden passage waarin Newton tamelijk uitvoerig op zijn methode ingaat, is te vinden in zijn *Opticks* (figuur 5). Aan dit werk is een groot aantal vragen toegevoegd, de zogenaamde *Queries*, die nagenoeg het gehele terrein der natuurwetenschappen bestrijken. In Query 31 komt Newtons werkwijze ter sprake, die hij kwalificeerde als een methode bestaande uit twee componenten, namelijk analyse en synthese:

Deze analyse bestaat in het doen van waarnemingen en experimenten, alsmede in het trekken van algemene conclusies hieruit door middel van inductie, waarbij men geen andere tegenwerpingen tegen deze conclusies mag accepteren dan die welke aan experimenten of aan andere vaststaande waarheden ontleend zijn. Want hypothesen moe-

ten in de experimentele natuurwetenschap niet in overweging genomen worden. En hoewel het betogen op grond van experimenten en waarnemingen door middel van inductie geen bewijs is voor algemene conclusies, is het toch de beste manier van argumenteren die de aard der dingen toestaat en ze kan als des te sterker beschouwd worden, naarmate de inductie algemener is. En als er onder de verschijnselen geen uitzondering voorkomt, mag de slotsom in het algemeen worden uitgesproken. Maar als zich, wanneer dan ook, daarna een uitzondering voordoet vanuit de experimenten, dan moet men ertoe overgaan de slotsom uit te spreken met zulke uitzonderingen, zoals ze zich voordoen.

Langs deze weg van de analyse komen we van samenstellingen tot onderdelen en van bewegingen tot de krachten die ze voortbrengen, en in het algemeen van werkingen tot hun oorzaken en van bijzondere oorzaken tot meer algemene, totdat het argumenteren eindigt in de meest algemene oorzaak. Dit is de methode van de analyse. En de synthese bestaat in het aannemen van de ontdekte en tot beginselen gemaakte oorzaken en het met behulp daarvan verklaren van de eruit voortvloeiende verschijnselen, alsmede in het bewijzen van de verklaringen.

In de analytische fase van deze analytisch-synthetische methode worden de grondbeginselen geformuleerd in de vorm van wiskundige betrekkingen tussen verschijnselen. Elders blijkt dat in deze fase reeds toetsing plaatsvindt: alvorens men de definitieve grondbeginselen formuleert, moeten de eerste conclusies experimenteel getoetst worden en moet men een aantal malen van conclusies naar beginselen gaan en vice versa. Wanneer de beginselen eenmaal vastgelegd zijn, gaat de synthetische fase in, waarin de volgende elementen aanwijsbaar zijn:

1. Reeds bestudeerde relaties tussen verschijnselen worden nu streng uit de beginselen afgeleid, bijvoorbeeld de wetten van Kepler uit het principe van de algemene gravitatie.
2. Er worden zoveel mogelijk waargenomen verschijnselen verklaard die tot nog toe buiten de behandeling gebleven waren; in het geval van de gravitatie bijvoorbeeld de getijdenbeweging.
3. Nieuwe verschijnselen worden voorspeld en (soms veel later) ontdekt, waardoor volgens de vierde regel het algemene grondbeginsel versterkt tevoorschijn komt. Dit geldt, wat de gravitatie betreft, bijvoorbeeld de afplatting van de aarde bij de polen, en de voorspelde terugkeer van de komeet van Halley in 1759.

Deze benadering van de verschijnselen is vruchtbaar gebleken. Ondanks de geweldige veranderingen in de natuurwetenschappen van de twintigste eeuw is haar methode in de kern niet gewijzigd. Nog altijd is een theorie voor ons 'goed', als ze op experimenten en waarnemingen is gebaseerd en als er niet alleen bekende verschijnselen door verklaard worden, maar ook nieuwe worden voorspeld en waargenomen.

Onwillekeurig komt bij ons de vraag op of Newton zich strikt aan zijn eigen 'spelregels' gehouden heeft. Wat de gravitatie betreft, de afleiding van de wet van de zwaartekracht voor de hemellichamen is uiteraard meer dan een inductiestap met behulp van de wiskunde op basis van de regels van redeneren. Ook de generalisatie van deze wet van macro- tot microschaal volgt niet rechtstreeks uit de verschijnselen. Dat voor de microwereld geheel andere wetten van toepassing kunnen zijn dan voor de macrowereld, blijkt bijvoorbeeld uit de ontwikkeling van de atoomfysica en quantummechanica van de twintigste eeuw. Bovendien is de geldigheid van Newtons regels van redeneren onbewijsbaar binnen de fysica. Ze gaan er immers aan vooraf. Dikwijls wordt dan ook gesteld dat het analyse-synthese schema een constructie achteraf is, die, gezien de sterke nadruk op het experiment, bovendien beter past bij de *Opticks* dan bij de *Principia*. Inderdaad bestaat er een verschil tussen de volgende twee problemen:

1. Als wit licht door een prisma gaat, worden de lichtstralen gebroken en treedt kleurschifting op (*Opticks*). De langs inductieve weg getrokken conclusie is dat dit verschijnsel bij elk prisma zal optreden.
2. De traagheidswet zegt dat alle lichamen zich in een toestand van rust of eenparige rechte beweging bevinden, tenzij een krachtwerking van buitenaf hierin verandering brengt (*Principia*). Er is echter geen direct experiment mogelijk om dit voor een aantal lichamen vast te stellen en dan door inductie algemeen te maken. De traagheidswet is dus -ik wees er reeds op- meer dan een generalisatie van een ervaringsfeit.

Dat neemt niet weg dat Newton zelf er ten stelligste van overtuigd was dat de *Principia* evenzeer op waarnemingen en proeven gebaseerd was als de *Opticks*. Voor hem was de gravitatie een waargenomen verschijnsel en in een nabeschouwing bij de bespreking van zijn drie bewegingswetten (waarvan de traagheidswet er een is) stelde hij (en daaruit blijkt tevens de fysische 'horizon'):

Tot nu toe heb ik beginselen neergelegd, zoals ze door mathematici aanvaard zijn en door een overvloed aan experimenten bevestigd worden.

Ook in het voorwoord van de *Principia* komt Newtons werkwijze ter sprake en in het eerder genoemde *Scholium Generale* aan het eind van boek III geeft hij de volgende korte typering van zijn methode:

In deze [experimentele, d.P.] natuurwetenschap worden stellingen uit verschijnselen afgeleid en algemeen gemaakt door inductie.

Het gaat daarom te ver de analytisch-synthetische methode uitsluitend als constructie achteraf te zien. Het is stellig Newtons bedoeling geweest op de door hem aangegeven wijze te werk te gaan. Dat wij nu, duidelijker dan hijzelf, inzien dat zijn principe van de algemene gravitatie meer vereist dan generalisatie van wiskundig bewerkte empirische gegevens, is een andere kwestie.

### Newton contra Descartes

Hoewel Newton zelf het in zijn voorwoord van de *Principia* doet voorkomen dat zijn beschrijving in boek III van het wereldsysteem met behulp van het gravitatiebeginsel niet meer is dan een uitgewerkt voorbeeld bij de wiskundige beginselen van boek I en II, speelt de gravitatie in werkelijkheid een centrale rol. Hierop richtte zich dan ook voornamelijk de kritiek van de cartesianen en van Leibniz. Weliswaar erkenden ze Newtons meesterschap in de mathematische boeken I en II, maar zijn filosofie (fysica) van boek III konden ze niet accepteren, omdat hij geen strikt mechanistische verklaring van de gravitatie had gegeven. Daar komt nog bij dat Newtons eigen opvatting over het wezen van de zwaarte gewoonlijk werd geïdentificeerd met de interpretatie van zijn volgelingen, die dikwijls verder gingen dan de meester zelf. Sommige epigonen namen aan dat de gravitatie niet slechts een algemene, maar ook een essentiële eigenschap van de materie is en dus onlosmakelijk daarmee verbonden. Bovendien gingen ze uit van *actio in distans* (werking op afstand): de gravitatie zou de afstand tussen twee lichamen overbruggen door een lege ruimte heen, zonder tussenkomst van een of ander medium.

Newton zelf heeft echter ten stelligste ontkend dat de zwaarte inherent is aan de materie, terwijl hij ook nooit *actio in distans* heeft aangenomen. Telkens weer stelde hij dat de gravitatie een waarneembaar

feit is, maar dat hij zich niet uitliet over een achterliggend mechanisme. Hij beschouwde haar slechts als een mathematische kracht waarvan de fysische oorzaak hem onbekend was. Desondanks verweten zijn critici hem dat hij was teruggevallen in de nietszeggende terminologie van de middeleeuwse scholastiek, met zijn specifieke, onherleidbare, occulte eigenschappen, zoals die aan elke plant of steen of geneesmiddel werden toegeschreven. Een fraai voorbeeld hiervan is te vinden in *Le malade imaginaire* (1673) van Molière, die in dit stuk een kandidaat in de geneeskunde belachelijk maakt, omdat deze op de examenvraag waarom opium slaapverwekkend is, antwoordt dat het een slaapverwekkende eigenschap heeft, zeer tot genoegen van de faculteit. De mechanistische natuurfilosofie wilde juist met dit nietszeggende verbalisme afrekenen. Omdat Newtons gravitatiebeginsel het zonder mechanistische verklaring moest stellen, was het voor leibnizianen en cartesianen een inhoudsloos begrip en als zodanig dus niets anders dan een terugkeer naar de middeleeuwse duisternis. Dit verwijt was echter niet terecht, want in tegenstelling tot de slaapverwekkende eigenschap van het opium in het stuk van Molière konden over de zwaartekracht kwantitatieve uitspraken gedaan worden. Telkens weer heeft Newton erop gewezen dat hij met de term 'gravitatie' geen verklaring bedoelde te geven, maar slechts een verschijnsel mathematisch wilde beschrijven. Zo schrijft hij in het *Scholium Generale* van de *Principia*:

Tot dusver ben ik er echter niet in geslaagd de oorzaak van deze eigenschappen van de zwaarte uit de verschijnselen te ontdekken en hypothesen verzin (fanataseer) 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.

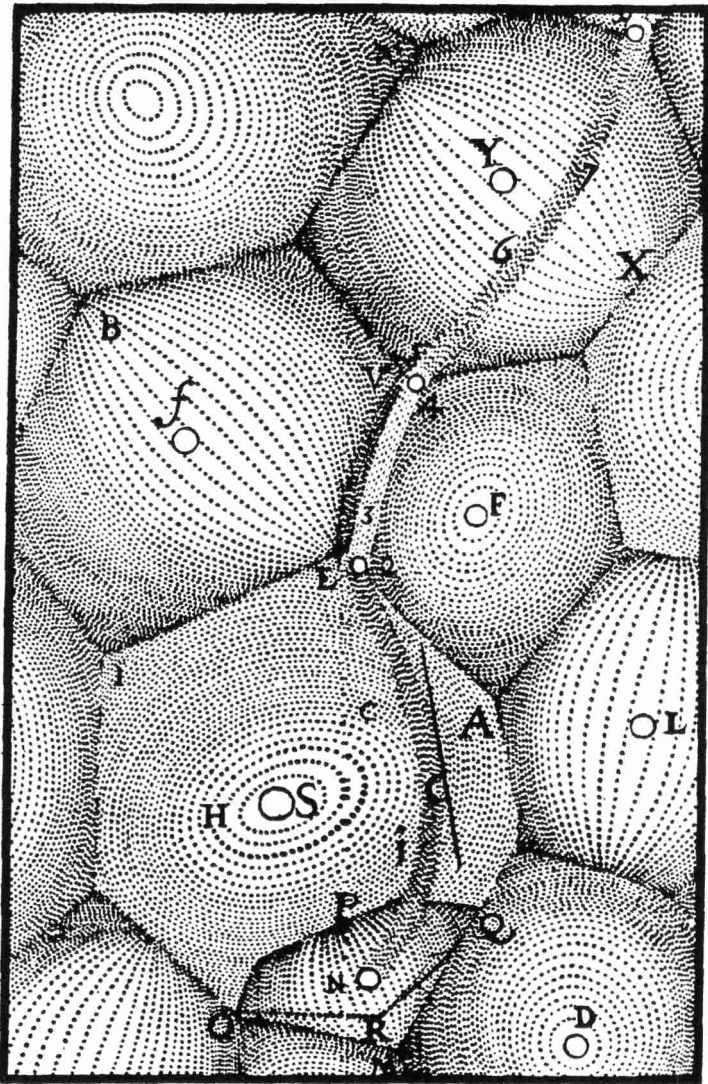
Uit dit citaat blijkt dat Newton niet alleen de argumenten van zijn tegenstanders poogde te weerleggen, maar dat hij ook zelf de aanval opende door scherp stelling te nemen tegen het ongelimiteerd gebruik van hypothesen. Een soortgelijke kritiek hierop vinden we o.a. in de eerder gegeven passage over de analytisch-synthetische methode en in de hierboven behandelde vierde regel van redeneren. Toch heeft Newton zelf ook diverse hypothesen uitgesproken. Zijn methodologisch standpunt dat experimenten het laatste woord hebben en dat we door inductie tot algemene uitspraken moeten komen, heeft een hypothetisch element in zich. Ook het aannemen van een absolute ruimte,

waarvan hij zelf erkent dat ze voor onze zintuigen niet waarneembaar is, kan men als een hypothese beschouwen. Maar nog afgezien daarvan, in hetzelfde *Scholium Generale*, waarin Newton zijn veto over het verzinnen van hypothesen uitsprak, opperde hij de mogelijkheid van het bestaan van een uiterst fijn verdeelde *spiritus* (geest), een medium dat alle 'grove' lichamen zou doordringen en waarmee wellicht natuurverschijnselen, zoals cohesie, elektriciteit, breking en terugkaatsing van het licht en prikkelgeleiding in het lichaam verklaard zouden kunnen worden. Vooral echter in de *Queries* van de *Opticks* heeft Newton in vragende vorm allerlei vermoedens en gissingen uitgesproken over alle mogelijke natuurverschijnselen.

De vraag rijst dan ook: als Newton zelf allerlei hypothesen heeft uitgesproken, wat bedoelde hij dan precies met *Hypotheses non fingo*? Om hierop een antwoord te geven moeten we niet alleen op het woord 'hypothesen' letten, maar ook op 'fingo', dat hier 'verzinnen' in de zin van 'fantaseren' betekent. Er zijn namelijk hypothesen die aan de hand van de verschijnselen worden opgesteld en zich experimenteel laten toetsen en hypothesen die niets anders zijn dan oncontroleerbare speculaties en vooropgezette meningen. En dan maakt het nog een groot verschil of men hypothesen van de laatste soort als zodanig erkent en er verder geen conclusies aan verbindt of dat men ze tot hoeksteen van een theorie maakt. Dat laatste deed Descartes, wiens fysica in belangrijke mate steunt op oncontroleerbare a priori aannames over vorm en afmetingen van onzichtbaar kleine materiedeeltjes. Het waren dit soort ad hoc hypothesen die Newton onmogelijk kon aanvaarden. Daarentegen was een zinvol gebruik van hypothesen voor hem niet alleen volkomen acceptabel, maar zelfs gewenst. In een brief aan Henri Oldenburg (1672) schreef hij:

... de beste en veiligste wijze van filosoferen lijkt mij dat we in de eerste plaats de eigenschappen der dingen nauwkeurig onderzoeken en door experimenten vaststellen, en ons vervolgens tot hypothesen wenden om ze te verklaren. Want hypothesen mogen slechts dienen ter *verklaring* van de eigenschappen der dingen, en niet ter *bepaling* (cursiv. van mij, d.P.) ervan, tenzij voor zover ze experimenten aan de hand kunnen doen.

Hieruit blijkt duidelijk Newtons kritiek op Descartes: wat hij afwijst zijn hypothesen die een dwingende verklaring voorschrijven en niet op empirische feiten berusten. Zulk soort fantasieën leidt alleen maar tot



**Figuur 6.**

De vortextheorie van Descartes (1644). Tussen de wervels van de zon (S) en de vaste sterren (f, F, enz.) loopt de baan van een komeet (1-7).

systemen die op hersenschimmen zijn gebouwd. Zijn eigen niet of niet voldoende onderzochte hypothesen houdt Newton dan ook gewoonlijk zorgvuldig buiten zijn eigenlijke betoog. Zo staan bijv. zijn speculaties over het mechanisme van de gravitatie of het wezen van het licht geheel los van de behandeling van de gravitatiewet en de wetten voor de kleurschifting. Ze worden dikwijls 'opgeborgen' in diverse nabeschouwingen (*scholia*) of in de *queries* van de *Opticks*. Zo is bijv. de zoëven genoemde *spiritus* naar het *Scholium Generale* verbannen, omdat Newton naar zijn eigen zeggen over niet genoeg experimentele gegevens beschikte om de werking van dit medium nauwkeurig te bepalen.

Newtons kritiek betrof echter niet slechts dit ene facet van het cartesianisme, maar zij gold het systeem van Descartes in zijn totaliteit, omdat de Brit ervan overtuigd was dat het tot atheïsme leidde. Reeds de titel van Newtons hoofdwerk verraadde iets van zijn polemieken met Descartes. De Franse wijsgeer had zijn natuurfilosofische denkbeelden uiteengezet in zijn *Principia philosophiae* (1644) en daar stelde Newton in 1687 zijn *Principia* tegenover, beginselen tegenover beginselen. Ook de plaats die boek II in de *Principia* inneemt, heeft met dit dispuut te maken. We hebben immers 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 dient. Men krijgt sterk de indruk dat de in boek II behandelde onderwerpen het brede kader vormen voor het uiteindelijke doel van dit boek, namelijk een grondige weerlegging van de werveltheorie van Descartes. De Franse filosoof nam aan dat de oneindige ruimte uit onzichtbaar kleine bolletjes hemelmaterie bestond en dat de overblijvende poriën waren opgevuld met uiterst fijn verdeelde subtiele materie (al moet men bij Descartes eigenlijk zeggen dat deze poriën de subtiele materie zelf zijn, omdat hij uitgebreidheid en materie identificeerde, zodat een vacuüm voor hem onbestaanbaar was). Elk hemellichaam heeft een kolk of wervel (*vortex*) hemelmaterie om zich heen, waarin eventuele lichamen in een baan om dat hemellichaam worden meegesleept (*figuur 6*). Zo worden de planeten door de zonnewervel meegenomen in een baan om de zon. Descartes had met zijn nogal vage en uitsluitend kwalitatieve wervelhypothese veel succes ge oogst. Ook in Newtons tijd waren Descartes' inzichten nog toonaangevend, zodat ze een sta-in-de-weg vormden voor de acceptatie van de gravitatie-theorie. Pas toen Newton er in boek II in geslaagd was door middel van een wiskundige behandeling van de wervelbeweging aan te tonen dat de

vortexhypothese in strijd was met de astronomische verschijnselen, kon hij er in boek III zijn eigen gravitatie-theorie tegenover stellen.

Blijkbaar was er Newton veel aangelegen definitief met Descartes' werveltheorie af te rekenen, want in het *Scholium Generale* vat hij zijn fysische bezwaren ertegen nog eens samen. Daarmee is echter nog niet de achtergrond van zijn kritiek blootgelegd. Die was religieus van aard. Toen Newton als student kennis maakte met de werken van Descartes, werd hij daardoor voorgoed gewonnen voor de gedachte dat verschijnselen verklaard dienden te worden met behulp van bewegende deeltjes. Van meet af aan had hij echter bezwaren tegen de opvatting van het 'orthodoxe' mechanisme dat de beweging van een lichaam alleen het gevolg kon zijn van de beweging van een ander lichaam, met andere woorden, dat beweging uitsluitend veroorzaakt werd door contactwerking van deeltjes. Het blijkt dat hij op dit punt onder invloed stond van de zogenaamde Cambridge-platonisten, met name Ralph Cudworth en Henri More, die beducht waren voor de scheiding tussen materie en geest, zoals deze voorgestaan werd door Descartes, Hobbes en anderen, die voor de verklaring van verschijnselen in de stoffelijke wereld alleen materiële oorzaken accepteerden.

In hun voetspoor meende ook Newton dat een dergelijke scheiding ertoe leidt dat God wordt losgemaakt van zijn schepping. Hij was ervan overtuigd dat de identiteit van materie en uitgebreidheid in het systeem van Descartes, gekoppeld aan het idee dat de verklaring van het hele natuurgebeuren uitsluitend op rekening komt van bewegende materiedeeltjes, de weg opende naar het atheïsme. Op het eerste gezicht lijkt deze beschuldiging onterecht. Niet alleen had Descartes in zijn *Principia philosophiae* een bewijs gegeven voor het bestaan van God, maar ook had hij op grond van Diens onveranderlijkheid het behoud van 'hoeveelheid beweging' aangenomen -dat wil zeggen, de som van massa maal versnelling van alle deeltjes in het heelal is constant. Dat neemt echter niet weg dat de Franse filosoof van mening was dat hij uit zijn beginselen over materie en beweging de hele kosmos kon deduceren, inclusief het ontstaan ervan, zodat God in het cartesische systeem in feite toch overbodig werd. Reeds Pascal had erop gewezen dat er in de wereld van Descartes voor God niet meer te doen was dan een 'vingerknip' te geven, die de deeltjes in beweging zette, waarna de rest vanzelf zou gaan. Newton, die deze overbodig-

heid van God echter evenmin als Pascal kon aannemen, wees allereerst elke speculatie over het ontstaan van het heelal af:

De prachtige schikking van zon, kometen en planeten kon alleen maar ontstaan door het overleg en het vermogen van een denkend en machtig Wezen.

Daarmee is voor hem echter Gods activiteit niet teneinde. Naar het inzicht van Newton is hij blijvend bij zijn wereld betrokken, zowel door zijn alomtegenwoordigheid in de absolute ruimte, waardoor hij ononderbroken in contact staat met zijn schepping, als door zijn rechtstreeks ingrijpen, bijvoorbeeld in de door Newton noodzakelijk geachte herhaalde regeneratie van het zonnestelsel. In dit licht bezien is het niet verwonderlijk dat hij in zijn *Principia* stelt dat het spreken over God aan de hand van de verschijnselen tot de experimentele natuurwetenschap behoort, maar dat betreft dan wel een God die souverain en vrij is. Wie met Descartes poneert dat de totale hoeveelheid beweging in het heelal constant is en dat terugvoert op de onveranderlijkheid van God, legt volgens Newton diens vrijheid en macht aan banden. Het menselijk intellect heeft niet uit te maken wat God doen of laten kan. Het is de taak van de fysicus door onderzoek van de verschijnselen uit te vinden wat God in de schepping tot stand gebracht hééft en niet wat hij tot stand had kunnen of moeten brengen, omdat ons denken hem dat voorschrijft. Een standpunt dat we al bij Bacon vinden uitgedrukt in diens adagium: *de natuur wordt slechts overwonnen door haar te gehoorzamen.*

### **Alchemie en actieve beginselen**

Newton heeft altijd vastgehouden aan het mechanistische beginsel dat deeltjes-in-beweging een realiteit vormen in de natuur, maar tegelijkertijd ontkend dat dit de volledige realiteit is. Bovendien nam hij, in navolging van Gassendi, het bestaan van kleinste deeltjes (atomen) aan, iets wat Descartes niet deed en ook niet kon doen, omdat hij immers materie en uitgebreidheid identificeerde. Voor Newton was de uitgebreidheid slechts een van de eigenschappen van de materie. Andere voor ons waarneembare kenmerken zijn bijvoorbeeld haar ondoordringbaarheid, hardheid, beweegbaarheid en zwarte, maar het wezen van de stof zullen we nooit volledig kunnen doorgronden, omdat zij haar bestaan dankt aan de vrije wil van God.

In Newtons visie is Descartes' dichotomie in denkende en uitgebreide substantie, in materie en geest er de oorzaak van dat God ten onrechte van de stoffelijke wereld wordt losgemaakt. Voor Newton was zij blijvend afhankelijk van Gods bemoeienis. Zo stelde hij tegenover Descartes dat de hoeveelheid beweging altijd afneemt en dat dus het bestaan van door God geschapen actieve beginselen vereist wordt om deze afname te compenseren, al wordt ook de mogelijkheid van een rechtstreeks ingrijpen van God opengelaten. Zulke principes zijn bijvoorbeeld de oorzaak van de zwaarte, waardoor lichamen hun baanbeweging houden of een snelle valbeweging ontvangen, de oorzaak van de fermentatie waardoor hart en bloed in beweging blijven, en de warmte. In de lijn van Boyle meende Newton verder te kunnen constateren dat ook bepaalde chemische verschijnselen zich niet afdoende met behulp van contactwerking tussen deeltjes laten verklaren. Van de chemie kwam hij tot de alchemie -van een strikte scheiding tussen die twee is overigens nog geen sprake- en het is bekend dat hij zich daarmee in verschillende perioden intensief heeft beziggehouden, o.a. kort voor het verschijnen van de *Principia*, in verband met het probleem van de gravitatie: kan de zwaarte verklaard worden door middel van contactwerking van een of ander medium, 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. In de alchemie vond hij de tegenpool van het cartesische mechanisme: de wereld als levend organisme tegenover de wereld als machine. Zelfs een steen is daar lichaam (Venus en het vrouwelijke), ziel (zon en maan) en geest (Mercurius en het mannelijke). Zowel in de neoplatonische traditie, o.a. van de eerder genoemde Cambridge-platonisten Cudworth en More, als in de alchemistische traditie wordt de nadruk gelegd op actieve beginselen die op de passieve materie inwerken, zoals aantreking en afstoting. En aangezien hij overtuigd was van de 'analogie van de natuur' was zijn conclusie dat niet alleen in de (al)chemie, maar ook elders, zoals bij gravitatie, fermentatie, warmte, elektriciteit, prikkelgeleiding en magnetisme actieve principes werkzaam waren. Juist aan het feit dat hij de enge mechanistische categorieën aanvulde met andere, aan de alchemie ontleende beginselen heeft Newton zijn blijvende faam te danken. Of om het compact te zeggen; zonder alchemie geen gravitatietheorie.

Het is gezien het bovenstaande geen wonder dat Leibniz en de cartesianen Newton, zoals we al zagen, beschuldigden van het herinvoeren

van middeleeuwse, occulte eigenschappen. Newton heeft trouwens ook nooit ontkend dat zijn actieve beginselen occult waren in die zin dat hij hun oorzaken niet kende. Hij verwierp echter de aristotelische occulte eigenschappen even hartgrondig als zijn tegenstanders, omdat deze kwaliteiten niet alleen onbekend, maar ook onkenbaar waren. Newtons actieve beginselen stammen niet uit de scholastieke traditie, maar uit een heel andere, namelijk die van de natuurlijke magie, die in de Renaissance een sterke opleving kende. In de scholastiek betekende het invoeren van occulte eigenschappen alleen maar een poging om het concept van het bestaan van specifieke (aristotelische) 'vormen' of 'naturen' in stand te houden, zonder dat er verder onderzoek naar plaatsvond. Wanneer echter in de natuurlijke magie van de Renaissance voor een of ander verschijnsel het bestaan van occulte krachten werd aangenomen, was dit voor haar beoefenaars een stimulans om experimenten op te zetten, die ten doel hadden de verborgen oorzaak manifest te maken, zoals ook de zwaarte weliswaar een verborgen oorzaak heeft, maar als zodanig een manifeste eigenschap van lichamen is.

De verwevenheid van Newtons opvatting over krachtwerkingen bij fysische en alchemistische verschijnselen is evident. 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 toe te nemen en te vermenigvuldigen. Een van deze vermeende geesten is de ether, die Newton onderscheidde in de *maine flegmatic body of aether* en de verschillende andere *aethereal spirits*, zoals elektrische en magnetische *effluvia* (uitvloeiels) en het gravitatieprincipe. Een tweede, die zich volledig door de eerste verspreid heeft, is licht. En deze twee geesten, ether en licht, werken onophoudelijk op elkaar in, zodat "*nature is a perpetual worker*". Dit soort denkbeelden is ook te vinden in het alchemistisch geschrift *Of nature's obvious laws and processes in vegetation* (ca. 1674). 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.

Terwijl voor ons alchemie en (natuur)wetenschap onverenigbare benaderingen zijn om grip op onze wereld te krijgen, is dit voor Newton en vele van zijn tijdgenoten niet het geval, zodat het ook niet nodig is

hem te zien als een gespleten persoonlijkheid. Integendeel, modern historisch onderzoek van Newtons manuscripten heeft afdoende aangetoond, dat hij geen aantrekkende en afstotende krachten als de hoeksteen van zijn fysisch systeem had aangenomen, als hij zich niet intens met alchemie en andere uitingen van de magische traditie had beziggehouden.

## Geloof en wetenschap

Er is echter meer: datzelfde onderzoek heeft ook laten zien dat de basisbegrippen van Newtons natuurfilosofie nog verder kunnen worden opgehelderd, wanneer men niet alleen de alchemie erbij betreft, maar ook oog heeft voor het theologisch raamwerk van zijn denken. Ik heb er al op gewezen dat de joods-christelijke leer van de schepping en de voorzienigheid een fundamentele rol speelde in het denken van Newton. Het aandragen van argumenten voor de voortdurende aanwezigheid en werkzaamheid van God in de natuur behoorde naar zijn diepste overtuiging tot het terrein van de natuurwetenschappen. Zijn opvatting dat de materie slechts een klein deel van de oneindige ruimte vult en dat elk lichaam vanwege de atomaire structuur van de stof een groot aantal kleine vacua bezit, hangt nauw samen met zijn standpunt over Gods handelen in de natuur, al dan niet door middel van actieve beginselen. Immers, dank zij deze corpusculaire opbouw van de materie is er voldoende tussenruimte beschikbaar voor de werking van deze principes.

Een moeilijk probleem voor Newton is de mate van (im)materialiteit van de actieve beginselen. Voor de wijze waarop hij deze kwestie trachtte op te lossen, kan men een parallel trekken met zijn ariaanse christologie. Allereerst is er de overeenkomst dat Christus middelaar is tussen God en mensen, terwijl de actieve beginselen bemiddelen tussen God en de materie. Daarnaast is er de overeenkomst in rangorde: zoals Christus ten opzichte van de mens goddelijk is, zijn de actieve beginselen ten opzichte van de materie onstoffelijk. Ten opzichte van God die een geest is, zijn de actieve beginselen echter stoffelijk, zoals ook Christus ten opzichte van God zelf zijn goddelijkheid verliest. Het lijkt een soort evenredigheid:

1. God : Christus = Christus : mens (mate van goddelijkheid).
2. God : actief beginsel = actief beginsel : materie (mate van stoffelijkheid).

Dat de natuurwetenschap bij Newton in dienst staat van de geloofsverdediging blijkt uit diverse plaatsen in zijn werken. Zo wijst hij er op dat men met de gravitatie niet kan verklaren waarom de banen van de planeten nagenoeg in hetzelfde vlak liggen en bovendien nog in dezelfde richting worden doorlopen, terwijl de kometen in alle mogelijke banen, vlakken en richtingen bewegen. Hetzelfde geldt voor het feit dat de planeten precies de snelheid hebben die past bij hun massa en afstand tot de zon. De Schepper plaatste de planeten, vooral Jupiter en Saturnus, op grote afstand van de zon. Op kortere afstand zouden ze immers vanwege hun massa zo'n sterke storing in het systeem teweegbrengen, dat ze op den duur op de zon zouden storten. Om precies dezelfde reden staan ook de veel grotere sterren zo onvoorstelbaar ver van ons zonnestelsel af, dat de gravitatie, ondanks de grote massa van de sterren, geen merkbare invloed heeft. Volgens Newton is het uitgesloten dat een dergelijk heelal door blinde en toevallige noodzaak tot stand gekomen is: het kan niet anders of we hebben hier te maken met het resultaat van de raad en het overleg van een uit vrije wil handelende Schepper, die bedreven is in wiskunde en mechanica.

Omdat Newton de natuurverschijnselen niet uitsluitend met behulp van bewegende deeltjes verklaarde, maar ook Gods actieve bemoeienis -middellijk dan wel onmiddellijk- met zijn schepping noodzakelijk achtte, was zijn natuurwetenschap in de ogen van sommige apologeten van het christendom een welkome bondgenoot in de strijd tegen atheïsme en deïsme. Aan het eind van de zeventiende eeuw was er in Engeland een groot aantal vrijdenkers, dat het christelijk geloof scherp bekritiseerde, met als gevolg dat er een stroom van apologetische geschriften verscheen. Het was aanvankelijk vooral de natuuronderzoeker Boyle, die zich veel moeite gaf het christelijk geloof te verdedigen met behulp van de nieuwe mechanistische natuurwetenschap, omdat diverse vrijdenkers daarmee juist het materialisme propageerden. Hij liet zelfs een legaat na om daarmee lezingen te bekostigen ter bestrijding van het atheïsme. Deze lezingen zijn bekend geworden onder de naam *Boyle-lectures*. De eerste die ze hield was de theoloog-filoloog Richard Bentley (1692), die daarvoor steun zocht bij Newton. Om te weten of hij de *Principia* goed begrepen had, correspondeerde hij met de auteur over diverse onderwerpen. Uit deze briefwisseling, waarin Newton ook de boven genoemde argumenten over de massa, baanvorm enz. van de planeten naar voren bracht, blijkt dat hij het initiatief van Bentley toejuichte:

Toen ik mijn verhandeling over ons systeem schreef [het zonnestelsel, d.P.] had ik het oog op zulke beginselen die zouden kunnen bewerken dat de mensen het geloof in een godheid zouden gaan overwegen, en niets kan mij meer verheugen dan te ervaren dat het nuttig is voor dat doel.

## De ontvangst van Newtons denkbeelden

Het werk van Newton verschafte het denkkader waarbinnen de natuurwetenschap zich de komende twee eeuwen zou bewegen. In het voorwoord van de *Principia* had hij de suggestie gedaan het door hem begonnen onderzoek voort te zetten met als uitgangspunt dat aan alle verschijnselen krachtwerkingen ten grondslag liggen. In zijn voetspoor bouwde men in de achttiende eeuw dan ook niet alleen de mechanica verder uit, 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 na 1715. In dat jaar hield Herman Boerhaave, hoogleraar geneeskunde te Leiden, een rede over het verkrijgen van zekerheid in de fysica, waarin hij de loftrumpet over Newton opstak, kort nadat in 1714 te Amsterdam een roefdruk verschenen was van de tweede editie (1713) van de *Principia*. 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. Hun Latijnse leerboeken werden uitgegeven in een groot aantal Europese landen, terwijl er vertalingen verschenen in het Nederlands, Frans, Duits, Engels en Zweeds. Frankrijk bleef nog geruime tijd een cartesians bolwerk, maar onder andere door het populariserende boek *Élémen[t]s de la philosophie de Neuton* (1736) van Voltaire, die in Leiden 's Gravesande had bezocht, kregen de ideeën van Newton ook in Frankrijk grote invloed.

Wat de aard van de reacties op Newtons denkbeelden betreft, wij zijn al enkele eeuwen zo vertrouwd met het gravitatieprincipe dat we ons enerzijds niet meer kunnen voorstellen dat cartesianen en leibnizianen er een terugval in de middeleeuwse duisternis in zagen, maar ander-



**Figuur 7.**

Titelprent van Voltaires *Élémen[t]s de la philosophie de Neuton* (1736).

zijds kunnen we ook niet meer navoelen wat een geweldige indruk de gravitatiewet op de mensen uit het tijdperk van de Verlichting maakte. Om dat laatste te begrijpen, dienen we ons te realiseren dat, dank zij het werk van Newton, hemelse en aardse bewegingen voor het eerst met één eenvoudige wiskundige wet beschreven konden worden. Men was ervan overtuigd dat nu de grondwet van de kosmos was gevonden voor een kracht die zich tot in alle uithoeken van het heelal manifesteerde. Daarnaast spraken zijn proeven over de kleurschifting sterk tot de verbeelding van een breed publiek, toen ze algemeen bekend geworden waren door de publikatie van de *Opticks* in 1704. Het aanvankelijke verzet tegen Newtons denkbeelden dat er eerst was van de kant van de 'oude garde' verdween in de loop van de achttiende eeuw tenslotte vrijwel geheel. Hiertoe droegen onder andere bij de expedities naar Peru (1735) en Lapland (1736), georganiseerd door de Parijse *Académie des Sciences*, waardoor kwam vast te staan dat de aarde aan de polen was afgeplat, zoals Newton op grond van zijn theorie van de zwaartekracht had geconcludeerd, en niet aan de evenaar, zoals de cartesianen meenden.

De gravitatie, de kleurschifting, de differentiaal- en integraalrekening en het succes van Newtons methode maakten dat hij in de achttiende eeuw als een halfgod werd vereerd. 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 vatte hij blijkbaar niet alleen Newtons gravitatiewet en zijn optische ontdekkingen samen, maar bracht hij bovendien het gevoel dat vele achttiende-eeuwers hadden, kernachtig onder woorden, 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 ja-loers waren op de grote Newton. En op de titelprent (*figuur 7*) van zijn reeds genoemde *Élémen[t]s de la philosophie de Neuton* zit hij achter zijn schrijftafel en vangt daar iets op van het hemels licht dat Newton omstraalt en via een spiegel in de hand van een vrouw, die mogelijk de (natuur)wetenschap voorstelt, ook de Franse literator verlicht. Newton is voor hem de initiator van de Verlichting, bij wie zelfs beroemde staatslieden en veroveraars tot figuren in een schelmengalerij ineenschrompelen. Zijn vriendin, de markiezin du Châtelet vertaalde en becommentarieerde zelfs de *Principia*.

Velen werden ertoe geïnspireerd Newtons zo succesvol gebleken methode toe te passen op terreinen buiten de natuurwetenschappen. Het voor ons wonderlijkste voorbeeld daarvan is wellicht het boek *Theologiae christianae principia mathematica* (wiskundige beginselen van de christelijke theologie, 1699) van John Craig. Het werk is evenals de *Principia* opgebouwd uit definities, axioma's en stellingen en volledig newtoniaans in zijn presentatie. Met behulp van algebraïsche vergelijkingen werd de waarheid van de evangeliën beargumenteerd en de maximale tijdsduur berekend waarbinnen de wederkomst van Christus noodzakelijkerwijs moest plaatsvinden. Ook op het terrein van de economie, de fysiologie, de filosofie en de letteren is de invloed van Newton merkbaar. Zo meende de Nederlandse graecist Tiberius Hemsterhuis, achtereenvolgens hoogleraar te Amsterdam, Franeker en Leiden, dat de Griekse taal onderzocht moest worden volgens de empirische methode, met het analogiebeginsel als leidraad, terwijl conclusies inductief getrokken dienden te worden. Zijn zoon, de bekende filosoof Frans Hemsterhuis, was van mening dat er slechts twee ware filosofieën waren, die van Socrates en die van Newton.

De grote belangstelling die men in de achttiende eeuw had voor de natuurwetenschappen, niet alleen onder geleerden, maar ook onder de (gegoede) burgerij, is in belangrijke mate 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 in het algemeen en de verdiensten van Newton in het bijzonder. 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 Aantrekkingskracht*. In dialoogvorm wordt een markgravin onderwezen in de fysica van Newton, "deze Goddelyke man, die voor de grontlegger der wetenschappen kan gehouden worden". Bij sommige Newton-dweperen sloegen zelfs alle stoppen door: in 1796 stelde Champlain de la Blancherie voor de kalender zo te wijzigen dat Newtons geboortjaar 1642 het jaar 1 zou zijn, terwijl zijn huis in Woolsthorpe een soort heiligdom moest worden ...

Newtons *Principia* is geen gemakkelijke lectuur. Slechts weinigen waren in staat het boek volledig te begrijpen. Desondanks heeft het, vooral vanwege de gravitatiewet en het succes van de empirisch-mathematische methode een uitstraling gehad die veel verder reikt dan de natuurwetenschap. De Europese cultuur van de achttiende eeuw is er in al haar geledingen diepgaand door beïnvloed. Vanwege zijn symboolfunctie in het tijdvak van de Verlichting, ontstond er een beeld van Newton dat van hem een positivist *avant-la-lettre* maakte, iemand die zich weliswaar (helaas) ook met theologie en alchemie had bezighouden, maar dat was uiteraard pas op zijn oude dag, toen hij na de mentale inzinking in 1693, zijn scheppende geest verloren had. Dit Newton-beeld is in de twintigste eeuw, zoals we gezien hebben, radicaal gewijzigd en juist daardoor raakten velen opnieuw gefascineerd, niet alleen door de mathematicus, fysicus, chemicus, alchemist, theoloog en kerkhistoricus, maar ook door de *mèns* Newton. De stroom publikaties over hem houdt nog steeds aan. In het afgelopen decennium verschenen twee omvangrijke biografieën, en tientallen artikelen. Mogelijk verdient Newton, die in een gravure van G. Bickham uit 1732 is afgebeeld als een zon temidden van de planeten, een even zorgvuldige behandeling in de geschiedenisboeken van de scholen als de zonnekoning Lodewijk XIV. Tenslotte zagen zijn tijdgenoten hem, om de achttiende-eeuwse literator en wiskundige Pieter Nieuwland te citeren, als degene

Die het eerst den sterveling tot licht van kennis riep  
Wiens geest het grootsch gesticht van ware wijsheid schiep,  
De nevelen van waan en twijfling deed verdwijnen  
En goddelijken glans in sterfelijken oogen schijnen.

## Literatuur

Beth, H.J.E., *Newton's 'Principia'*, 2 dln. (Groningen/Batavia, 1932).

Cohen, I.B., *The birth of a new physics*, (rev. ed., Hammondsworth, 1987).

Christianson, G.E., *In the presence of the Creator: Isaac Newton and his times*, (New York, 1984).

Dijksterhuis, E.J., *De mechanisering van het wereldbeeld*, (Amsterdam, 1950<sup>1</sup>, 1990<sup>4</sup>).

Dobbs, B.J.T., *The foundations of Newton's alchemy or 'the hunting of the greene lyon'*, (Cambridge etc., 1975, 1989<sup>2</sup>)

Fauvel, J., e.a., eds., *Let Newton be! A new perspective on his life and works*, (Oxford, etc., 1988).

Hoeven, P. van der, *Newton, een inleiding tot zijn wijsgerige inzichten*, (Baarn, 1979).

Hall, A.R., *The revolution in science 1500-1750*, (London/New York, 1983).

Koyré, A., *Newtonian studies*, (London, 1965).

[Newton, I.], *Sir Isaac Newton's Mathematical principles of natural philosophy and his system of the world*. Translated into English by Andrew Motte in 1729. The translations revised, and supplied with an historical and explanatory appendix, by Florian Cajori (Berkeley/Los Angeles, 1934; pb. 2 dln. 1966<sup>6</sup>).

Newton, I., *Opticks: or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. (...), (London, 1704<sup>1</sup>, 1731<sup>4</sup>; herdruk van vierde editie met 'pre-face' (I.B. Cohen), 'Foreword' (A. Einstein), 'Introduction' (E.T. Whittaker), 'Analytical table of contents' (D.H.D. Roller), (New York, 1931, 1952).

Westfall, R.S., *Never at rest: A biography of Isaac Newton*, (Cambridge, 1980).